

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ У ЗОНІ
БОЙОВИХ ДІЙ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ»**

Виконала: студентка групи ТЗД-23мз
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» червня 25 Кирилюк А. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. ЕХТЗД

«10» червня 25 Кватернюк С. М.

(прізвище та ініціали)

Опонент: д.х.н., професор кафедри ЕХТЗД

«10» червня 25 Ранський А. П.

(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕХТЗД

к.т.н., доц. Іщенко В. А.

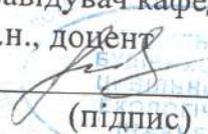
(прізвище та ініціали)

«10» червня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Галузь знань 18 – Виробництво та технології
Спеціальність 183 – «Технології захисту навколишнього середовища»
Освітньо-професійна програма – Технології захисту навколишнього середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕХТЗД
к.т.н., доцент

В.А. Іщенко
(підпис)
« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу студентці

Кирилюк Анна Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ У ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ»

керівник роботи Кватернюк Сергій Михайлович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи

Площі та кількість об'єктів ПЗФ, які розташовані в межах небезпечних зон та на окупованих територіях (додаток Б).

4. Зміст текстової частини

1 Аналіз сучасних методів та засобів дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій.

2 Огляд інвентаризації та моніторингу лісів методами дистанційного зондування.

3 Аналіз лісоуправління на територіях, забруднених в ході військових дій.

4 Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод лісопереробного підприємства.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Приклад моніторингу порушень лісових насаджень у зоні бойових дій

(Луганська область)

2. Моніторинг порушень лісових насаджень у зоні бойових дій (Луганська область) на основі системи Dynamic World

3. Розподіл площі та запасу лісів, які опинилися в зоні військових дій та на тимчасово окупованій території

4. Площі ділянок лісового фонду держлісгоспів Чернігівської області, які потенційно можуть бути забрудненими за даними ДСНС

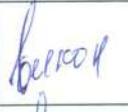
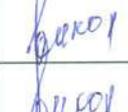
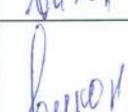
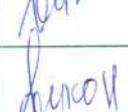
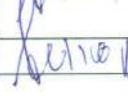
5. Площі ділянок лісового фонду держлісгоспів Чернігівської області, які потенційно можуть бути забрудненими за даними Чернігівського ОУЛМГ.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4 Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод лісопереробного підприємства.	Декан ФМБ, к.е.н., доц. Краєвська Алла Станіславівна		

7. Дата видачі завдання « 25 » березня _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Аналіз сучасних методів та засобів дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій.	25.03.2025	07.04.2025	
2	Огляд інвентаризації та моніторингу лісів методами дистанційного зондування.	07.04.2025	27.04.2025	
3	Аналіз лісоуправління на територіях, забруднених в ході військових дій.	27.04.2025	12.05.2025	
4	Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод лісопереробного підприємства.	12.05.2025	26.05.2025	
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.05.2025	05.06.2025	
6	Підготовка презентації та доповіді	05.06.2025	10.06.2025	

Студент 
(підпис)

Кирилук А. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Кватернюк С. М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з 114 сторінок формату А4, на яких є 7 рисунки, 7 таблиць, список використаних джерел містить 16 найменувань.

Метою роботи є вдосконалення методів моніторингу структурних змінних лісових екосистем із застосуванням дистанційного зондування та статистичної обробки результатів вимірювань.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню проблеми оцінки пошкоджень лісових насаджень у зонах збройних конфліктів, що є критично важливим завданням з огляду на значну роль лісів у світовій економіці, екології та соціальній сфері. Встановлено, що військові дії спричиняють багатогранні пошкодження – від прямих фізичних руйнувань до довгострокових наслідків. У дослідженні підкреслюється складність та небезпечність доступу до таких територій для традиційних методів оцінки. З метою подолання цих викликів, робота обґрунтовує та підтверджує ключову роль технологій дистанційного зондування для моніторингу та точного виявлення пошкоджень. Результати дослідження наголошують на нагальній потребі у розробці та впровадженні інноваційних, безпечних та ефективних методів оцінки збитків лісовим насадженням, що є запорукою успішного післявоєнного відновлення.

Ключові слова: лісові пожежі, дистанційне зондування, статистичні дослідження.

ABSTRACT

The master's qualification work consists of 114 pages of A4 format, which include 7 figures, 7 tables, and the list of used sources contains 16 names.

The purpose of the work is to improve methods for monitoring structural variables of forest ecosystems using remote sensing and statistical processing of measurement results.

The master's qualification work is devoted to the study of the problem of assessing damage to forest stands in zones of armed conflicts, which is a critically important task given the significant role of forests in the global economy, ecology, and social sphere. It has been established that military actions cause multifaceted damage - from direct physical destruction to long-term consequences. The study emphasizes the complexity and danger of access to such territories for traditional assessment methods. In order to overcome these challenges, the work substantiates and confirms the key role of remote sensing technologies for monitoring and accurate detection of damage. The results of the study emphasize the urgent need to develop and implement innovative, safe and effective methods for assessing forest damage, which is the key to successful post-war recovery.

Keywords: forest fires, remote sensing, statistical research.

ВІДГУК

наукового керівника на магістерську кваліфікаційну роботу студентки заочної форми навчання групи ТЗД – 23м (з/ф) Кирилюк Анни Олександрівни “Дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій методами дистанційного зондування”

Магістерська кваліфікаційна робота є надзвичайно актуальною та важливою в контексті сучасних глобальних викликів, зокрема військових конфліктів та їх руйнівного впливу на екосистеми. У вступі роботи чітко обґрунтовано виняткову важливість лісових насаджень для планети та їхня вразливість до збройних конфліктів. Автором переконливо продемонстровано, що оцінка пошкоджень лісів у зонах бойових дій є не лише екологічним, а й соціально-економічним та навіть миротворчим завданням. Особливо цінним є акцент на недоступності таких територій для традиційних польових досліджень через мінну небезпеку та активні бойові дії, що підкреслює необхідність застосування інноваційних підходів, зокрема дистанційного зондування. Висвітлення глобальних економічних наслідків та впливу на енергетичну безпеку свідчить про глибоке розуміння автором багатогранного характеру проблеми. Детально класифіковано та описано різноманітні типи пошкоджень – від прямих фізичних (вибухи, хімічне ураження, пожежі) до опосередкованих та довгострокових (незаконна вирубка, деградація ґрунту, втрата біорізноманіття, вплив НРБ). Автор вичерпно розглядає можливості супутникових зображень, БПЛА та LiDAR для оцінки пошкоджень. Також розглянуто інтеграцію штучного інтелекту та геоінформаційних систем, що свідчить про усвідомлення автором найсучасніших тенденцій у галузі..

Кирилюк А. О. вчасно і повністю виконала всі поставлені завдання, характеризується виключно з позитивного боку. В цілому магістерська кваліфікаційна робота виконана на високому рівні і має наукову цінність. Тому рекомендую оцінити роботу на оцінку «А».

Керівник роботи,

д.т.н., професор каф. ЕХТЗД



Сергій КВАТЕРНЮК

ВІДГУК

на магістерську кваліфікаційну роботу студентки заочної форми навчання групи ТЗД-23м (з/ф) зі спеціальності 183 “Технології захисту навколишнього середовища” Кирилюк Анни Олександрівни на тему: “Дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій методами дистанційного зондування”.

Актуальність обраної теми не викликає сумнівів. Збройні конфлікти, особливо повномасштабна війна в Україні, завдають колосальних збитків лісовим екосистемам, які є ключовими для підтримання кліматичного балансу, збереження біорізноманіття та забезпечення економічної стабільності. Автор обґрунтовує важливість дистанційного зондування як інструменту для оцінки цих пошкоджень, особливо враховуючи недоступність та небезпечність уражених територій. Визначено, що наземні методи залишаються важливими для отримання детальної інформації та верифікації даних дистанційного зондування. Проте, їх застосування у зонах конфліктів критично обмежене ризиками безпеки, пов'язаними з наявністю НРБ та активними бойовими діями. Запропоновано комплекс із десяти інноваційних рішень, що поєднують передові технології дистанційного зондування, штучний інтелект та інтегровані наземні інновації. Такий багатоплатформний та інтегрований підхід є оптимальним для подолання існуючих викликів та забезпечення всебічної, точної та безпечної оцінки наслідків військових дій для лісів.

У магістерській роботі можна відзначити такий недолік: хоча робота добре обґрунтовує необхідність використання дистанційного зондування та ШІ, їй бракує конкретних прикладів застосування цих методів до реальних випадків пошкоджень лісів у зонах конфліктів. Було б корисно навести дані з пілотних досліджень, якщо такі проводились, або розглянути гіпотетичні сценарії застосування запропонованих рішень.

Робота має практичне значення, виконана на належному науково-методичному рівні і заслуговує оцінки «А».

Опонент

д.х.н., професор каф. ЕХТЗД



Анатолій РАНСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ У ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ	6
1.1 Типи пошкоджень лісових насаджень у зонах бойових дій	6
1.2 Сучасні технології дистанційного зондування для оцінки пошкоджень ...	8
1.3 Наземні методи оцінювання в умовах військових дій	14
1.4 Виклики та обмеження в оцінці пошкоджень у зонах конфліктів	16
1.5 Інноваційні рішення для дослідження пошкоджень лісових насаджень у зонах бойових дій	17
1.6 Методи виявлення та кількісної оцінки хімічного забруднення та важких металів від боєприпасів	31
1.7 Ключові технології та сенсори у лісовому господарстві	36
1.8 Застосування дистанційного зондування в ефективному управлінні лісовим господарством	40
2 ОГЛЯД ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ТА МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ	48
2.1 Основи дистанційного зондування для лісового господарства	48
2.2. Принципи збору та обробки даних	49
2.3 Застосування дистанційного зондування в інвентаризації лісів	50
2.4 Виявлення змін лісового покриву	52
2.5 Переваги та обмеження дистанційного зондування	54
3 АНАЛІЗ ЛІСОУПРАВЛІННЯ НА ТЕРИТОРІЯХ, ЗАБРУДНЕНИХ В ХОДІ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ	60
3.1 Ушкодження лісових екосистем в ході військових дій	60
3.2 Оцінювання характеру та масштабів пошкоджень лісів	62
3.3 Військове забруднення та його екологічні наслідки	67
3.4 Передові технології оцінки та моніторингу	74
3.5 Стратегії лісоуправління та реабілітації на забруднених територіях	78

3.6 Виклики та ризики для лісового персоналу	82
3.7 Екологічна політика ефективного лісоуправління на територіях, забруднених військовими діями	84
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЛІСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА	89
4.1 Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти	89
4.2 Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти	93
4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод	96
4.4 Визначення економічного ефекту та терміну окупності під час використання обладнання очищення стічних вод	98
4.5 Розрахунок терміну окупності витрат під час використання обладнання очищення стічних вод	99
4.6 Висновки до четвертого розділу	100
ВИСНОВКИ	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	103
ДОДАТОК А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	105
ДОДАТОК Б Площі та кількість об'єктів ПЗФ, які розташовані в межах небезпечних зон та на окупованих територіях	106
ДОДАТОК В Ілюстративна частина	109

ВСТУП

Актуальність. Лісові насадження є життєво важливими екосистемами, що забезпечують планету ключовими послугами, такими як регулювання клімату, збереження біорізноманіття та підтримка засобів до існування для понад 1,6 мільярда людей у всьому світі. Вони відіграють значну роль у світовій економіці, причому лісове господарство становить 2-3% світового ВВП, а міжнародна торгівля деревиною – 3% від загальної вартості світової торгівлі. Однак збройні конфлікти становлять значну, часто недооцінену загрозу для цих екосистем. Військові дії спричиняють як пряме руйнування лісів, так і довгострокову деградацію, що має далекосяжні екологічні, соціальні та економічні наслідки. Екологічні наслідки війни можуть посилити глобальні виклики, такі як зміна клімату та втрата біорізноманіття. Вплив збройних конфліктів на лісові екосистеми виходить за рамки безпосереднього екологічного збитку, створюючи циклічну модель руйнування. Це переміщення, у свою чергу, посилює вже існуючу напруженість між групами та збільшує навантаження на природні ресурси в районах прибуття, що знову ж таки посилює напруженість, створюючи самопідтримуваний цикл екологічної деградації та конфлікту. Таким чином, точна оцінка пошкоджень лісів є не лише екологічним завданням, а й критично важливим компонентом миробудівництва, оскільки розуміння та пом'якшення цих екологічних наслідків може допомогти розірвати це порочне коло.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалась у напрямку проведення держбюджетної науково-дослідної роботи Вінницького національного технічного університету “Підвищення еколого-енергетичної безпеки урбанізованих територій шляхом поетапного раціонального впровадження енергоефективних заходів в сфері теплопостачання” на 2023-2025 рр.

Метою роботи є вдосконалення методів моніторингу структурних змінних лісових екосистем із застосуванням дистанційного зондування та статистичної обробки результатів вимірювань.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Аналіз сучасних методів та засобів дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій.
2. Огляд інвентаризації та моніторингу лісів методами дистанційного зондування.
3. Аналіз лісоуправління на територіях, забруднених в ході військових дій.
4. Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод лісопереробного підприємства.

Об'єкт досліджень – процес дистанційного екологічного моніторингу лісових екосистем.

Предмет дослідження – методи і засоби дистанційного екологічного моніторингу лісових екосистем.

Новизна одержаних результатів полягає у розробці комплексного, інтегрованого підходу до оцінки пошкоджень лісових насаджень у зонах бойових дій, що поєднує передові технології дистанційного зондування, штучний інтелект та інноваційні наземні методи в єдину методологічну рамку, адаптовану до умов високого ризику та обмеженого доступу..

Практична цінність роботи полягає в тому, що вона дозволяє забезпечити швидку та точну та оцінку збитків для лісових ресурсів в ході військових дій, яка є фундаментом для подальшого процесу відновлення українських лісів.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Викладені у МКР положення доповідались на Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)».

Кирилюк А. О., Кватернюк С. М., Мандебура С. В. , Латуша Д. Р. , Максименко М. П. Дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій методами дистанційного зондування. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025) [Електронне мережне наукове видання] : матеріали конференції. (м. Вінниця, 15–16 червня 2025 р.). Вінниця, 2025.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ У ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ

1.1 Типи пошкоджень лісових насаджень у зонах бойових дій

Збройні конфлікти завдають лісовим екосистемам широкого спектру пошкоджень, від безпосереднього фізичного руйнування до складних, довгострокових екологічних та соціально-економічних наслідків. Розуміння цих різноманітних типів пошкоджень є вирішальним для ефективної оцінки та планування відновлення [1].

Прямі фізичні пошкодження є найбільш очевидними наслідками бойових дій і часто є результатом цілеспрямованих військових операцій або побічних ефектів інтенсивних боїв.

- Вибухи, кратери та уламки: Вибухові боєприпаси безпосередньо порушують поверхню ґрунту та змішують ґрунтові горизонти. Цей процес створює кратери та розкидає викиди, значно змінюючи топографію та педогенез ґрунту. Уламки від снарядів можуть вбудовуватися у стовбури дерев, залишаючи тривалі фізичні докази конфлікту. Величезна кількість боєприпасів, використаних у сучасній війні, може перетворити ландшафти на "розколоту пустку". Наприклад, під час Першої світової війни ландшафти Франції були перетворені на місячні пейзажі через інтенсивні артилерійські обстріли.
- Хімічне ураження: Окрім дефоліантів, військова амуніція та вибухові речовини вводять численні токсичні речовини, включаючи важкі метали, такі як свинець (Pb), сурма (Sb) та барій (Ba), а також енергетичні сполуки, такі як тротил (TNT) та гексоген (RDX), у ґрунт та воду. Ці хімічні речовини можуть зберігатися в навколишньому середовищі десятиліттями, вимиваючись у ґрунтові води та створюючи серйозні ризики для здоров'я дикої природи та людей.
- Пожежі, спричинені бойовими діями: Військові дії часто викликають лісові пожежі, або безпосередньо через вибухи, або опосередковано через політику "випаленої землі". Ці пожежі є основною причиною знищення лісів у зонах

конфліктів, як це спостерігається в Україні, де 40-45% лісових територій у Харківській області постраждали від пожеж, спричинених військовими операціями. Такі пожежі призводять до збільшення викидів вуглецю, погіршення якості повітря, виснаження водних ресурсів та загрожують засобам до існування. Частота лісових пожеж в Україні зросла у 7,6 раза під час військового конфлікту порівняно з довоєнним рівнем.

На додаток до прямих руйнувань, конфлікти спричиняють низку опосередкованих та довгострокових наслідків, які можуть мати ще більш глибокий вплив на лісові екосистеми та залежні від них спільноти [2].

- Незаконна вирубка та надмірний збір: Збройні конфлікти руйнують системи управління та посилюють бідність, що призводить до різкого зростання попиту на деревину та паливо як з боку збройних сил, так і місцевого населення.
- Деградація ґрунту та гідрологічні зміни: Знищення лісів, вибухи та політика "випаленої землі" руйнують ґрунт, роблячи його непридатним для сільського господарства. Військовий рух спричиняє ущільнення ґрунту, що різко впливає на його властивості, такі як гідравлічна провідність, та збільшує ерозію. Знеліснення змінює розподіл опадів, що призводить до змін у водозборі та стоці, впливаючи на якість та кількість води.
- Втрата біорізноманіття та екосистемних послуг: Екологічне руйнування в зонах конфліктів шкодить як біорізноманіттю, так і георозмаїттю. Знищення середовищ існування, втрата видів та порушення природних процесів є поширеними явищами. Це зменшує здатність лісів надавати необхідні екосистемні послуги, такі як стабільність ґрунту, регулювання водного режиму, поглинання вуглецю та підтримка місцевого населення. Деградація лісів також може збільшити ризик зоонозних захворювань.
- Вплив нерозірваних боєприпасів (НРБ): НРБ, включаючи міни, бомби та гранати, становлять приховану, небезпечну для життя загрозу, залишаючись похованими десятиліттями. Вони роблять величезні ділянки землі непридатними для сільського господарства, лісового господарства та розвитку, перешкоджаючи постконфліктному відновленню. НРБ також можуть кородувати та виділяти

токсичні речовини в навколишнє середовище.

Еволюція військової тактики впливає на характер пошкоджень лісів, які необхідно оцінювати. Історично ліси часто були прямими цілями військової окупації через потребу в деревині, наприклад, для суднобудування. Однак у сучасних конфліктах ліси частіше використовуються як укриття та захисні бар'єри. Ця зміна тактики означає, що, хоча пряме цілеспрямоване знищення лісів може бути менш поширеним, опосередковані наслідки, такі як надмірна вирубка через потребу в паливі, лісові пожежі та забруднення води, стають більш значущими. Таким чином, методи оцінки повинні адаптуватися для виявлення як явних руйнувань, так і тонкої, кумулятивної деградації, що є результатом цих непрямих тисків.

1.2 Сучасні технології дистанційного зондування для оцінки пошкоджень

Технології дистанційного зондування є незамінними для оцінки пошкоджень лісів у зонах конфліктів, оскільки вони дозволяють збирати дані з недоступних або небезпечних територій без загрози для людського життя [3].

Супутникові зображення є основою для широкомасштабного моніторингу та оцінки пошкоджень. Супутники забезпечують широкий та безперервний огляд уражених поверхонь, дозволяючи швидко аналізувати великомасштабні події, такі як лісові пожежі або широкомасштабне знеліснення. Програми, такі як Copernicus Європейського Союзу, пропонують відкриті та доступні дані для реагування на катастрофи. Радари із синтетичною апертурою (SAR) є особливо цінними, оскільки вони можуть генерувати зображення високої роздільної здатності, які проникають крізь хмари, дим та рослинність, полегшуючи аналіз структурних впливів та топографічних змін навіть за несприятливих погодних умов. На відміну від звичайних методів, гіперспектральні датчики зображень здатні збирати дані в сотнях вузьких суміжних спектральних діапазонів, забезпечуючи новий рівень точності. Це дозволяє отримати детальну інформацію про стан лісів, розподіл видів, біомасу та рівні стресу, виявляючи тонкі спектральні варіації, які вказують на ранні ознаки пошкодження або хвороби. Це дозволяє виявляти зміни, невидимі для людського ока,

такі як водний стрес у посівах або хімічні зміни.

БПЛА та LiDAR забезпечують деталізацію на рівні землі, доповнюючи широкомасштабні супутникові дані. Дрони доповнюють супутники, надаючи детальне бачення на рівні землі з міліметровою точністю, здатні отримувати доступ до конкретних районів. Системи LiDAR (Light Detection and Ranging) на основі БПЛА досягають дуже високої щільності точок, що є вирішальним для виявлення дрібномасштабних аномалій рельєфу (наприклад, кратерів) та проникнення крізь крону рослинності для виявлення підкранових об'єктів. Це дозволяє детально 3D-картографувати структуру лісу, індивідуальні характеристики дерев (висоту, діаметр на висоті грудей) та оцінювати біомасу. Для БПЛА-LiDAR оптимальні параметри польоту залежать від цілі. Для підповерхневих аномалій у частково рослинних районах рекомендуються нижчі швидкості (1–2 м/с). На безлісних відкритих ділянках можливі вищі швидкості (до 6 м/с). Висота 50–75 м над землею, як правило, рекомендується для балансу між деталізацією та ефективністю, оскільки вищі висоти (100–120 м) ризикують пропустити невеликі характеристики рельєфу (<50 см). Ділянки з листяними лісами в ідеалі слід обстежувати в період безлистя, щоб максимізувати інформацію про ґрунт [4].

Спектральні індекси є математичними формулами, які поєднують дані відбиття від двох або більше спектральних діапазонів для виділення конкретних особливостей або умов, посилюючи контраст між різними типами земного покриву:

- Нормалізований різницевий індекс рослинності (NDVI): Використовується для оцінки здоров'я рослинності, фотосинтетичної активності та відновлення. Високі значення NDVI вказують на здорову, щільну рослинність.
- Нормалізований індекс вигорання (NBR): Широко використовуваний індекс для оцінки інтенсивності пожежі та виявлення вигорілих ділянок. Він чутливий до змін у рослинності, спричинених пожежами.
- Дельта NBR (dNBR) та Дельта NDVI (dNDVI): Диференційовані індекси, розраховані шляхом порівняння до- та післяпожежних сцен, що надають інформацію про зміни у стані рослинності та інтенсивності пожежі. Ці моделі можуть класифікувати інтенсивність пожежі на кілька рівнів. Наприклад,

dNBR та dNDVI продемонстрували відмінну ефективність для моделей інтенсивності пожежі.

- Індекс вигорілої площі (BAI): Спеціально розроблений для дискримінації вигорілих земель, підкреслюючи сигнал вугілля на післяпожежних зображеннях.
- Нормалізований різницевий водний індекс (NDWI) для картографування водних об'єктів та Індекс співвідношення зеленого (RGI), який підкреслює червоний компонент поверхні.

Взаємодоповнюючий характер супутників (широке покриття, проникнення SAR) та БПЛА (висока точність, низька висота польоту) вказує на те, що інтегрований багатоплатформний підхід є оптимальним для всебічної оцінки пошкоджень лісів у зонах конфліктів. Супутники можуть ефективно ідентифікувати великі ділянки потенційних пошкоджень та гарячих точок, спрямовуючи розгортання БПЛА. Потім БПЛА можуть проводити високодетальні обстеження цих конкретних ділянок, збираючи дрібнозернисту інформацію, яку супутники можуть пропустити, таку як пошкодження окремих дерев від уламків, невеликі кратери або навіть надаючи дані для виявлення НРБ. Цей інтегрований підхід максимізує як ефективність, так і точність, що є першочерговим у небезпечних та обмежених ресурсами конфліктних середовищах [5].

Крім того, акцент на "безлистому сезоні" для БПЛА-LiDAR у листяних лісах та здатність SAR проникати крізь рослинність підкреслює необхідність сезонно-специфічних та сенсорно-агностичних стратегій для подолання екологічних обмежень (наприклад, листя, хмарність) при отриманні даних. Це забезпечує постійні можливості моніторингу в динамічних конфліктних середовищах. Наприклад, використання радарних даних Sentinel-1 дозволяє подолати хмарність та забезпечує просторову роздільну здатність 10 м², що покращує розуміння вибіркової вирубки. Така адаптивна стратегія є критично важливою для дистанційного зондування в зонах конфліктів, де екологічні умови (наприклад, постійна хмарність або дим від триваючих пожеж) часто непередбачувані, а доступ до землі обмежений.

Таблиця 1.1 – Ключові спектральні індекси для оцінки стану лісів та пошкоджень

Назва індексу	Призначення/ що вимірює	Основа розрахунку
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Здоров'я рослинності, фотосинтетична активність, відновлення, врожайність	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$
NBR (Normalized Burn Ratio)	Інтенсивність пожежі, вигорілі ділянки, стан рослинності	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$
dNBR (delta Normalized Burn Ratio)	Зміна інтенсивності пожежі, відновлення рослинності після пожежі	$(\text{Pre-fire NBR} - \text{Post-fire NBR})$
dNDVI (delta Normalized Difference Vegetation Index)	Зміна здоров'я рослинності та відновлення після події	$(\text{Pre-fire NDVI} - \text{Post-fire NDVI})$
BAI (Burned Area Index)	Дискримінація вигорілих земель, підкреслення сигналу вугілля	$(\text{Red} - \text{Blue}) / (\text{Red} + \text{Blue})$ (залежить від конкретної формули)
EVI (Enhanced Vegetation Index)	Здоров'я посівів, продуктивність рослинності (менш насичений, ніж NDVI)	$2.5 * ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 * \text{Red} - 7.5 * \text{Blue} + 1))$
NDWI (Normalized Difference Water Index)	Вміст води, картографування водних об'єктів, посуха	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$
RGI (Ratio Green Index)	Виділення червоного компонента поверхні	$\text{Red} / \text{Green}$

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання (МН), глибокого навчання (ГН) та географічних інформаційних систем (ГІС) революціонізувала оцінку пошкоджень лісів, особливо у складних та динамічних середовищах, таких як

зони конфліктів. ШІ та його підгалузі, МН та ГН, значно покращили можливості аналізу великих обсягів даних дистанційного зондування.

Моделі на основі ШІ, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), U-Net та Mask R-CNN, можуть автоматично ідентифікувати, класифікувати та кількісно оцінювати пошкодження в реальному часі за допомогою супутникових та аерофотознімків високої роздільної здатності. Це значно підвищує ефективність реагування на руйнування, пов'язані з війною. Виявлення змін, що передбачає порівняння зображень до та після катастрофи, є ключовою методикою для виявлення відмінностей у фізичній цілісності [6].

ШІ може моделювати еволюцію катастроф, таких як поширення лісових пожеж, оптимізуючи зусилля з евакуації та розподіл ресурсів. Алгоритми МН можуть аналізувати історичні записи та інші набори даних для отримання інформації для розширеної оцінки ризиків катастроф та систем раннього попередження. Наприклад, прогностичний ШІ може моделювати траєкторії ураганів, оптимізуючи зусилля з евакуації.

ГІС є основою для інтеграції та візуалізації просторових даних, що робить їх незамінними для оцінки пошкоджень. ГІС є фундаментальним інструментом для збору, аналізу та візуалізації просторових даних, що дозволяє ідентифікувати вразливі місця, відстежувати розвиток катастроф та планувати заходи реагування на надзвичайні ситуації. Вона надає платформу для візуалізації інформації, згенерованої алгоритмами ШІ та МН, роблячи складні дані більш доступними для осіб, які приймають рішення.

Платформи ГІС полегшують інтеграцію різноманітних наборів даних із супутників, дронів та наземних датчиків, створюючи всебічну картину постраждалих районів. Модель глибокого навчання Esri, наприклад, використовує інформацію про контури будівель у поєднанні з післякатастрофними зображеннями для класифікації пошкоджених структур з високою точністю. Ця інтеграція дозволяє об'єднувати дані LiDAR та зображень із супутників та наземних датчиків у єдину веб-платформу картографування, що надає повну картину впливу на лісові екосистеми.

Штучний інтелект, машинне навчання та глибоке навчання, особливо моделі

глибокого навчання, такі як CNN, трансформують оцінку пошкоджень з ручних, трудомістких та небезпечних процесів на автоматизовані, швидкі та точні операції. Цей перехід є критично важливим для своєчасної гуманітарної допомоги, планування реконструкції та навіть правової документації в зонах конфліктів. Наприклад, моделі на основі ШІ можуть автоматично ідентифікувати, класифікувати та кількісно оцінювати пошкодження в реальному часі, значно покращуючи ефективність реагування. У контексті конфліктів, де фізичний доступ сильно обмежений та небезпечний, а швидка інформація є вирішальною для гуманітарного реагування та постконфліктного планування, здатність ШІ автоматизувати великомасштабні, точні оцінки на основі даних дистанційного зондування є не просто покращенням, а необхідністю, що дозволяє здійснювати дії, які раніше були непрактичними або неможливими [7].

Однак ефективність моделей ШІ сильно залежить від високоякісних, різноманітних та добре збалансованих навчальних наборів даних. Проблема дефіциту даних та відмінності характеристик воєнних пошкоджень від даних про природні катастрофи підкреслює критичне обмеження для розгортання ШІ в зонах конфліктів. Наприклад, точність моделей, навчених на даних про природні катастрофи, знизилася приблизно на 10% при застосуванні до воєнних пошкоджень в Україні, що свідчить про потребу в спеціалізованих даних. Це ускладнюється загальною "нестачею якісних та кількісних наборів даних" для дистанційного зондування, особливо для специфічних характеристик, таких як воєнні пошкодження. Це означає, що, хоча моделі ШІ є потужними, їхня продуктивність принципово обмежена доступністю та специфічністю навчальних даних. Це передбачає, що простої адаптації існуючих моделей ШІ, розроблених для інших контекстів (наприклад, природних катастроф), недостатньо для точної оцінки воєнних пошкоджень. Необхідні значні інвестиції у створення конфліктно-специфічних, високороздільних та різноманітних наборів даних, або розробка передових методів трансферного навчання та адаптації домену для подолання цього розриву в даних, що забезпечить надійність та узагальнюваність ШІ-оцінок у цих унікальних середовищах.

1.3 Наземні методи оцінювання в умовах військових дій

Хоча дистанційне зондування забезпечує широке покриття, наземні методи пропонують безцінні детальні, прямі спостереження та збір зразків, які часто є необхідними для всебічної оцінки пошкоджень. Однак їх застосування в зонах конфліктів значно ускладнюється проблемами безпеки.

Традиційні польові дослідження залишаються важливими для глибокого розуміння екологічного стану лісів. Інструмент оцінки лісових ландшафтів (FLAT) — це систематичний, гнучкий та економічно ефективний метод для швидкого визначення екологічного стану лісів та потенційних загроз. Він передбачає, що навчені польові групи проводять візуальну оцінку на місці, часто за допомогою дистанційного зондування, для створення лісового кадастру та оцінки таких атрибутів, як видовий склад, загрози для здоров'я (наприклад, інвазивні види) та структурні особливості. FLAT може використовуватися для збору базових даних, пріоритезації потреб у відновленні та постійного моніторингу. Польові методи оцінки біорізноманіття включають оцінку екосистемного, видового та генетичного різноманіття. Концепція "природності" (ступінь свободи екосистеми від людських модифікацій її структури, складу та функцій) є ключовим показником здоров'я лісу. Флора та фауна можуть слугувати "біоіндикаторами" для оцінки екологічного здоров'я та якості навколишнього середовища, виявляючи сигнали у різних часових та просторових масштабах. Це включає моніторинг змін у складі видів, структурі та функціях екосистеми [8].

Прямий відбір проб є єдиним способом точного визначення хімічного забруднення. Прямий відбір проб ґрунту та води є вирішальним для виявлення хімічного забруднення від військової діяльності, включаючи важкі метали (наприклад, свинець, сурма) та енергетичні сполуки (наприклад, тротил, гексоген). Ці забруднювачі можуть становити значні ризики для здоров'я людини та екосистем. Аналіз хімічного складу листя рослин може відображати стан забруднення навколишнього середовища, оскільки рослини можуть біоакумулювати важкі метали та інші забруднювачі. Це надає докази довгострокового забруднення та його

інтеграції в екосистему. Наприклад, сосна звичайна є хорошим індикатором поточного промислового забруднення завдяки своїй здатності накопичувати забруднювачі в голках.

Виявлення та знешкодження нерозірваних боєприпасів (НРБ) є першочерговим завданням для забезпечення безпеки та відновлення доступу до лісових територій. Розмінування НРБ є високоспеціалізованим та небезпечним завданням. Воно включає фазу обстеження, виявлення та безпечного видалення або знищення. Ключове обладнання включає металодетектори, георадари (GPR) та магнітометри, які виявляють феромагнітні матеріали. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та роботи все частіше використовуються для безпечніших початкових оцінок у недоступних або небезпечних районах. Процес включає аерофотозйомку, наземні інспекції, перегляд історичних даних про конфлікти, опитування місцевих жителів та систематичний пошук. Виявлені НРБ можуть бути піддані процедурам "підриву на місці" (VIP) для мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Наземні оцінки, хоча й надають безцінну деталізацію (наприклад, прямий хімічний відбір проб, детальний стан дерев, показники біорізноманіття), критично обмежені повсюдною присутністю НРБ. Наприклад, в Україні "наземні дослідження неможливі через міни". Це означає необхідність послідовного або інтегрованого підходу, коли дистанційне зондування ідентифікує безпечні зони та потенційні місця НРБ перед тим, як наземні групи зможуть розгорнутися. Це підкреслює незамінну роль зусиль з розмінування в уможливленні будь-якої форми фізичної оцінки або відновлення [9].

Крім того, біоаккумуляція важких металів та стійких хімічних речовин у флорі вказує на те, що забруднення становить довгострокову загрозу для здоров'я екосистеми та потенційно для харчових ланцюгів людини, навіть у, здавалося б, відновлених районах. Наприклад, хімічний склад листя дерев відображає стан навколишнього середовища у сильно забруднених районах. Це вимагає довгострокового біомоніторингу та спеціалізованих стратегій ремедіації, виходячи за рамки негайної оцінки фізичних пошкоджень, щоб охопити хронічний екологічний ризик.

1.4 Виклики та обмеження в оцінці пошкоджень у зонах конфліктів

Оцінка пошкоджень лісів у зонах конфліктів пов'язана з унікальними та серйозними викликами, які часто перешкоджають всебічній та своєчасній оцінці.

Доступ до постраждалих територій є головною перешкодою.

Нерозірвані боєприпаси (НРБ) та міни: Присутність НРБ та мін є основною перешкодою, що робить величезні території недоступними та небезпечними для наземних груп оцінки. Це вимагає покладатися на дистанційне зондування та масштабні зусилля з розмінування, які є повільними та дорогими.

Активні бойові дії та обмежений доступ: Триваючі військові операції, зміщення ліній фронту та відсутність державного контролю над певними територіями унеможливають збір польових даних або роблять його надзвичайно небезпечним. Логістичні обмеження та ризики безпеки ще більше перешкоджають доступу.

Надійність оцінок безпосередньо залежить від якості та повноти доступних даних. Дані із зон конфліктів часто є дефіцитними, суперечливими та неповними, що значно перешкоджає зусиллям з надання гуманітарної допомоги та точній оцінці пошкоджень. Існує загальний "недолік якості та кількості наборів даних" для дистанційного зондування, особливо для специфічних характеристик, таких як пошкодження від війни. Постійний хмарний покрив може перешкоджати отриманню оптичних супутникових зображень, створюючи прогалини в даних та обмежуючи безперервний моніторинг. Хоча SAR може проникати крізь хмари, він має власні обмеження [10].

Навіть за наявності технологій, їх ефективне розгортання стикається з перешкодами. Хоча ШІ пропонує автоматизацію, залишаються проблеми щодо якості даних, інтерпретованості моделей та етичних міркувань. Моделі, навчені на даних про природні катастрофи, можуть погано працювати при застосуванні до пошкоджень від війни, що підкреслює потребу в спеціалізованих навчальних даних та трансферному навчанні. Проблеми, такі як системна сумісність та конфіденційність даних, створюють перешкоди для ефективної інтеграції різноманітних, високоякісних наборів даних. Оцінка пошкоджень та подальші

зусилля з відновлення є дорогими і часто залежать від непередбачуваного міжнародного фінансування. Також спостерігається нестача достатніх ресурсів та рівня експертизи в постраждалих регіонах. Конфлікти призводять до руйнування управління, систем державного контролю та зростання корупції, що посилює деградацію навколишнього середовища (наприклад, незаконні рубки) та перешкоджає ефективному управлінню та оцінці. Повсюдне руйнування систем управління та державного контролю під час конфлікту посилює екологічні пошкодження (наприклад, незаконні рубки, нерегульований розвиток) і одночасно перешкоджає ефективним зусиллям з оцінки та ремедіації.

Залежність від ШІ/МН для оцінки пошкоджень, хоча й ефективна, створює проблеми, пов'язані з якістю даних, інтерпретованістю моделей та упередженістю.⁴⁷ Це особливо проблематично в зонах конфліктів, де дані наземної перевірки є дефіцитними та чутливими, що викликає етичні занепокоєння щодо точності та справедливості оцінок, які можуть вплинути на гуманітарну допомогу або юридичну відповідальність. Наприклад, точність моделей ШІ знижується, коли вони застосовуються до воєнних пошкоджень, відмінних від тих, на яких вони були навчені. Ця ситуація створює значну етичну та практичну дилему: хоча ШІ пропонує швидкість та безпеку в недоступних районах, його результати можуть бути неточними або упередженими, якщо вони навчені на недостатніх або нерепрезентативних даних. Такі неточності можуть неправильно спрямувати гуманітарну допомогу, призвести до неправильного приписування воєнних злочинів або до несправедливих вимог щодо репарацій. Це означає, що сувора перевірка, прозорість у розробці моделей ШІ та ретельний розгляд їхніх обмежень є першочерговими, особливо в чутливих конфліктних контекстах, де ставки надзвичайно високі [11].

1.5 Інноваційні рішення для дослідження пошкоджень лісових насаджень у зонах бойових дій

Збройні конфлікти спричиняють значні та часто недооцінені екологічні збитки,

особливо лісовим екосистемам. Це руйнування впливає не лише на біорізноманіття та екологічні функції, а й на засоби до існування людей та перспективи довгострокового відновлення. Традиційні наземні методи оцінки суттєво обмежені ризиками безпеки, включаючи наявність мін та невибухлих боєприпасів (НВБ), а також недоступність у активних або нещодавно конфліктних зонах. Це вимагає термінового впровадження інноваційних, безпечних та ефективних рішень для комплексної оцінки збитків та безперервного моніторингу.

У цьому звіті пропонується десять передових рішень, що використовують передові технології дистанційного зондування (оптичні, SAR, гіперспектральні, LiDAR), штучний інтелект (глибоке навчання, прогностичний ШІ, пояснюваний ШІ, мультисенсорне злиття даних) та інтегровані наземні інновації (веб-ГІС платформи, безпілотні наземні транспортні засоби). Ці технології спільно пропонують можливість подолати обмеження традиційних методів, забезпечуючи безпрецедентну точність, швидкість та безпеку в оцінці багатогранних наслідків військових дій для лісів, від прямого фізичного руйнування та пожеж до незначного стресу рослинності та хімічного забруднення.

Лісові екосистеми часто є мовчазними жертвами збройних конфліктів, зазнаючи значних та різноманітних форм пошкоджень. В Україні понад 60 000 гектарів лісів було знищено на окупованих територіях, причому лише збитки від знищення деревини перевищують 14 мільярдів гривень. У Харківській області 40-45% лісових масивів постраждали від лісових пожеж, спричинених військовими діями. Ці приклади підкреслюють всеосяжний та серйозний вплив конфлікту на лісові соціо-екологічні системи [12].

Аналіз показує, що збитки лісам, спричинені війною, мають багато вимірів. Це включає пряме знищення через бомбардування, обстріли та використання дефоліантів, а також непрямі наслідки, такі як лісові пожежі (спричинені військовими діями або збільшеним попитом на паливо), незаконні рубки, надмірний збір деревини для палива, розчищення земель для поселень або сільськогосподарських угідь, а також загальний розпад управління лісовим господарством. Це не просто спалені дерева; це системний напад на лісову екосистему та її функції. Отже, комплексна

стратегія оцінки повинна бути багатогранною, здатною виявляти та кількісно оцінювати всі ці різноманітні типи пошкоджень, а не лише найочевидніші. Це також означає, що післявоєнне відновлення повинно вирішувати як прямі фізичні збитки, так і соціо-економічні чинники деградації.

Традиційні польові методи оцінки лісів є трудомісткими, вимагають значних витрат часу та часто небезпечні. У зонах конфліктів наземні дослідження часто неможливі через наявність мін та невибухлих боєприпасів (НВБ), які забруднюють величезні території та створюють серйозні загрози життю. Навіть після конфліктів НВБ можуть залишатися небезпечними протягом десятиліть, вимагаючи постійних зусиль з розмінування. Крім прямої небезпеки, наземний доступ також обмежений активними лініями фронту, відсутністю урядового контролю на окупованих територіях та зруйнованою інфраструктурою.

Наявність НВБ є не лише прямою фізичною небезпекою, а й довгостроковою екологічною та економічною перешкодою. Це також призводить до значних економічних втрат від незібраної деревини. Таким чином, НВБ є не тільки прямою небезпекою, але й довгостроковою екологічною та економічною перешкодою. Будь-яке рішення щодо оцінки повинно надавати пріоритет дистанційним методам та інтегрувати зусилля з розмінування у плани відновлення. Наявність НВБ також означає, що навіть після закінчення конфлікту, непрямий екологічний збиток продовжує накопичуватися через відсутність управління [13].

Масштаб та складність пошкоджень лісів, спричинених війною, у поєднанні з невід'ємними небезпеками зон конфліктів, вимагають зміни парадигми від традиційних методів до передових технологічних рішень. Технології дистанційного зондування, інтегровані зі штучним інтелектом та машинним навчанням, пропонують потенціал для швидкої, автоматизованої, великомасштабної та неруйнівної оцінки, надаючи критично важливі дані для гуманітарної допомоги, планування реконструкції, юридичної документації та довгострокового відновлення навколишнього середовища. Цей перехід має вирішальне значення для прийняття обґрунтованих рішень та ефективного розподілу ресурсів у складних умовах.

Ці рішення охоплюють передові технології дистанційного зондування, інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання для поглибленого аналізу, а також інновації на рівні платформ та наземного моніторингу. Кожне рішення аналізується з точки зору його основних технологій, ключових переваг у конфліктних умовах та основних проблем, що необхідно вирішити. Представлена нижче таблиця узагальнює ці рішення, надаючи швидкий огляд їхніх можливостей та обмежень. Ця таблиця є цінним інструментом для осіб, які приймають рішення, оскільки вона дозволяє швидко порівняти та зіставити різні технології на основі їхніх можливостей, обмежень та придатності для конкретних потреб оцінки збитків у зонах конфліктів. Вона перетворює складну технічну інформацію на легкозасвоюваний формат, слугуючи дорожньою картою для подальших поглиблених обговорень.

– Супутникова зйомка високої роздільної здатності.

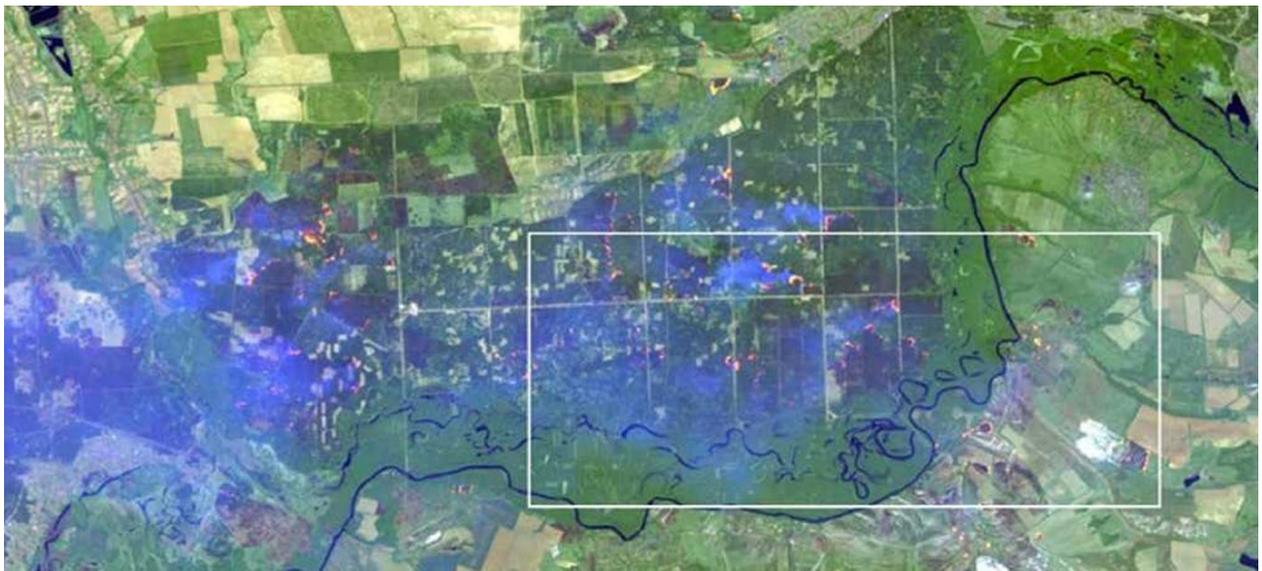
Оптичні та мультиспектральні супутникові знімки є фундаментальним та економічно ефективним засобом для великомасштабного моніторингу лісів. Такі платформи, як Landsat та Sentinel-2, пропонують безперервні, надійні джерела даних з широким охопленням та різною просторовою роздільною здатністю. Вони мають вирішальне значення для відстеження змін площі лісів, щільності крон та загального стану з часом. Наприклад, карти класифікації Dynamic World та індекс листової поверхні (LAI) з продуктів MODIS були використані для оцінки пошкоджень лісів у Куп'янському лісовому господарстві, Україна, що виявило зменшення площі лісів у 1,7 рази та падіння значень LAI у 1,92 рази між 2021 та 2024 роками. Мультиспектральні зображення, з їхніми численними спектральними смугами, особливо корисні для виявлення здоров'я рослин та змін у вегетаційних індексах.

Традиційні оцінки лісів часто створюють статичні карти. Однак безперервний та мультитемпоральний характер супутникових даних дозволяє проводити аналіз часових рядів. Це означає, що можна відстежувати зміни з часом, а не лише миттєві знімки. Можливість виявляти різкі та поступові зміни та аналізувати тенденції перетворює статичні дані на динамічну екологічну інформацію. Цей динамічний моніторинг має життєво важливе значення для розуміння прогресування пошкоджень, спричинених війною, виявлення критичних періодів деградації та,

згодом, для оцінки ефективності зусиль з відновлення. Він змінює підхід від посмертного аналізу до безперервного, адаптивного управління.

Незважаючи на значні можливості, існують виклики, пов'язані з визначенням "лісу" та прогалинами в даних. Деякі джерела вказують, що "втрата деревного покриву" не завжди еквівалентна "втраті лісу" через відмінності у визначеннях (наприклад, лісові культури можуть не включатися до визначення лісу). Крім того, глобальні продукти, такі як Global Forest Watch, можуть недооцінювати втрати в лісах з низькою щільністю. Дані про чинники втрати деревного покриву часто відображають лише домінуючий чинник, пропускаючи часову динаміку. Зони конфліктів також страждають від дефіциту даних та проблем з їх якістю. Отже, існує критична потреба у стандартизованих визначеннях "пошкодження лісів" у контексті конфліктів та у покращених, високороздільних просторових даних, які розрізняють типи лісів (наприклад, природні та штучні насадження) та фіксують нюанси деградації. Це також підкреслює важливість інтеграції кількох джерел даних та наземної перевірки, де це можливо, для подолання властивих обмежень та упереджень окремих наборів даних.

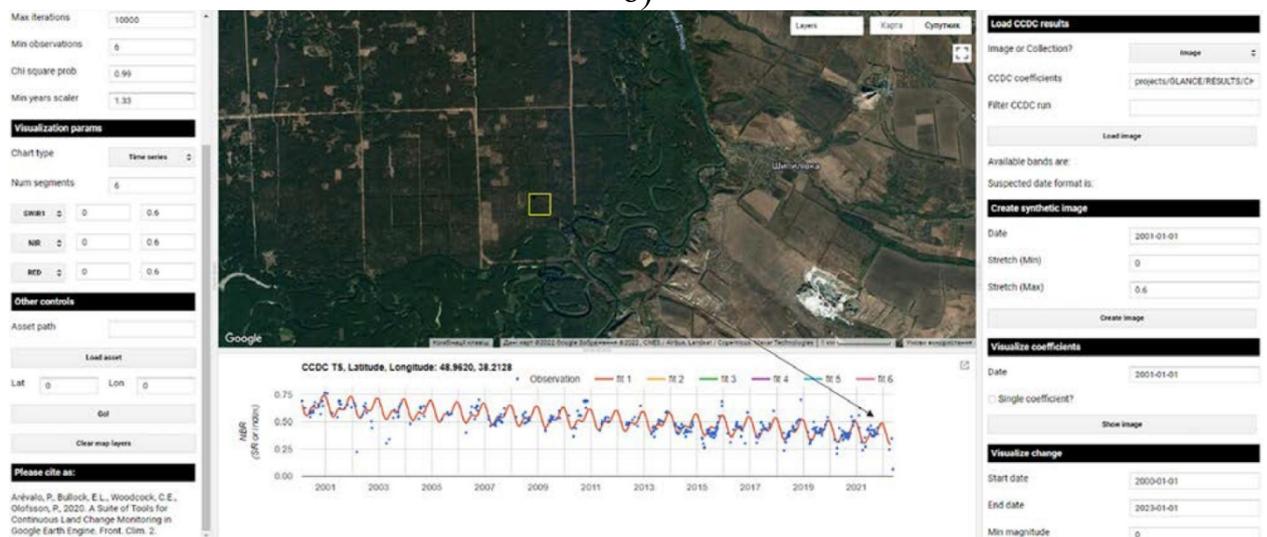
У дослідженні [86] було запропоновано нову концепцію моніторингу під назвою Dynamic World, яка базується на безперервній класифікації актуальних супутникових даних Sentinel-2. Завдяки інтеграції з платформою Google Earth Engine (GEE), ця система функціонує в режимі реального часу, що робить її цінним інструментом для спостереження за станом лісів у зонах бойових дій в Україні (рис. 1.1).



а)



б)



в)

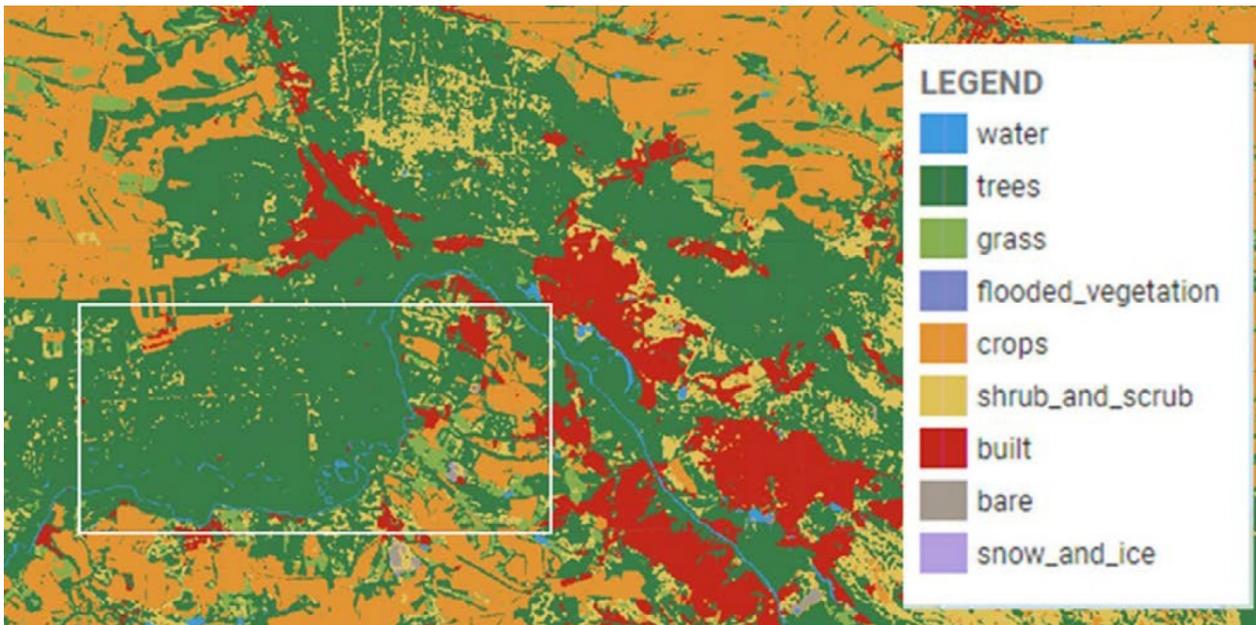
Рисунок 1.1 – Ілюстрація моніторингу пошкодження лісу в зоні бойових дій (Луганська область) на основі порівняння: а) супутникового знімка Sentinel-2 від 8 травня 2022 року; б) результату роботи алгоритму LandTrendr, який до червня 2022 року коректно виявив ділянку лісової пожежі; в) результату роботи алгоритму CCDC, який це порушення не ідентифікував.

Система Dynamic World розпізнає дев'ять класів земного покриття (вода, дерева, трава, забудова тощо), вказуючи ймовірність кожного з них для окремого пікселя. Вона спирається на глобальні моделі машинного навчання, точність яких для ідентифікації лісів становить близько 70%. Хоча система може припускатися помилок — наприклад, на території, показаній на рис. 1.1, свіже згарище було хибно класифіковане як "затоплена територія", — її головною перевагою є здатність оперативно сигналізувати про факт порушень лісового покриття (рис. 1.2).

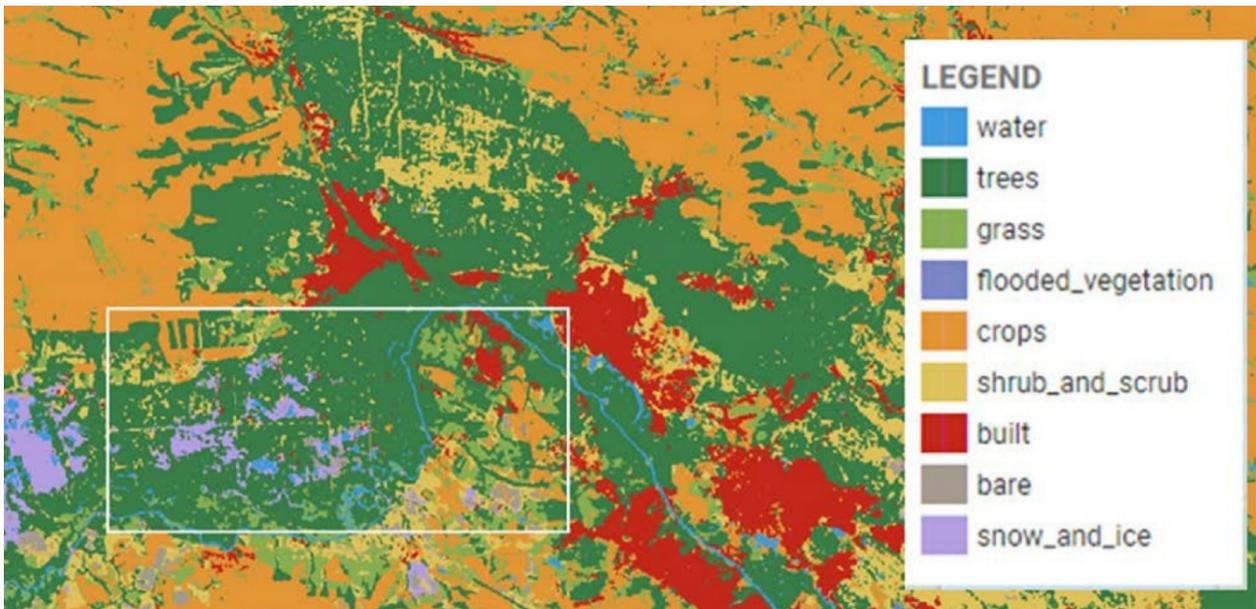
Аналіз наукової літератури визначає ключові вимоги до розробки системи дистанційного моніторингу лісів на територіях, що постраждали від військової агресії:

- Основою моніторингу мають слугувати щільні часові ряди супутникових даних.
- Необхідно використовувати мультиспектральні знімки, що пройшли ортокорекцію та радіометричне калібрування для отримання значень відбивної здатності поверхні.
- Пріоритет слід надавати даним із відкритих джерел, зокрема проєктів Landsat та Sentinel, що забезпечують повне покриття території України.
- Для обробки та класифікації зображень доцільно залучати хмарні обчислювальні платформи, зокрема Google Earth Engine (GEE).
- Для створення хронологічно узгоджених карт лісового покриття та його змін слід застосовувати алгоритми темпоральної (часової) сегментації.
- Для оперативного моніторингу в режимі, близькому до реального часу, можна використовувати готові глобальні продукти, такі як Dynamic World.

Загалом, пропонується розробити онлайн систему (потенційно, на базі платформи Google Earth Engine) для неперервного відслідковування пошкоджень у лісах, де проводяться бойові дії. Ця система забезпечить неперервну ідентифікацію та інформування про втрати лісів з періодичністю, що відповідає часу накопичення для відповідної території шести-десяти безхмарних спостережень. Попередня оцінка потенційно пошкоджених ділянок зможе відбуватися в режимі близькому до реального часу після отримання доступу до найостаннішого супутникового знімка.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Результати моніторингу лісових порушень у Луганській області за даними Dynamic World. Порівняння карт земельного покриття: а) станом на червень-серпень 2021 р. та б) станом на 10 травня – 10 червня 2022 р.

– Синтетична апертурна радіолокація (SAR).

Технологія SAR пропонує унікальну перевагу в зонах конфліктів завдяки своїй здатності проникати крізь хмари, дим та рослинність, надаючи надійні дані незалежно від погодних умов або часу доби. Це особливо важливо в районах, де оптичні

зображення часто закриті хмарністю або димом від пожеж. SAR може виявляти структурні пошкодження та топографічні зміни, що робить його цінним для оцінки фізичних пошкоджень лісів та змін біомаси. Наприклад, дані Sentinel-1 з просторовою роздільною здатністю 10 м використовуються системою сповіщень RADD для подолання хмарності та надання інформації про вибіркові рубки. Знімки ICEYE SAR можуть аналізувати зміни в структурі лісів вночі та крізь дим, і добре підходять для постійного моніторингу вирубки лісів та лісових пожеж [14].

Оптичні супутники є ефективними, але обмежені хмарністю та денним світлом. Всепогодна, цілодобова можливість SAR робить його інструментом безперервного моніторингу. Це особливо важливо в зонах конфліктів, де відбуваються швидкі, непередбачувані події, а хмарність може бути стійкою. Отже, SAR значно розширює можливості моніторингу динамічних явищ, таких як активні лісові пожежі або швидкі незаконні рубки, надаючи розвідувальні дані майже в реальному часі для реагування та втручання. Його здатність проникати крізь крони також дозволяє виявляти пошкодження або діяльність під кронами, які оптичні датчики можуть пропустити.

– Гіперспектральна зйомка.

Гіперспектральні знімальні системи (HSI) збирають дані у сотнях вузьких, суміжних спектральних смуг, пропонуючи безпрецедентну точність у виявленні незначних змін у здоров'ї лісів. Ця можливість має вирішальне значення для виявлення стресу рослинності, спалахів хвороб та навіть хімічного забруднення, які можуть бути невидимими для людського ока або звичайних мультиспектральних датчиків. HSI може картографувати різноманітність видів дерев, оцінювати надземну біомасу та вимірювати вміст вуглецю, надаючи детальну інформацію для управління лісовим господарством. Наприклад, HSI у поєднанні з ШІ/МН може виявляти хімічні речовини шляхом аналізу спектральних закономірностей.

Хоча оптичні зображення показують видимі пошкодження (вирубка лісів, пожежі), здатність HSI виявляти тонкі спектральні зміни означає, що вона може ідентифікувати стрес або хімічний вплив до того, як вони проявляться як очевидні фізичні пошкодження. Це ключова відмінність від базових мультиспектральних даних. Отже, HSI пропонує систему раннього попередження про деградацію лісів, що

дозволяє здійснювати проактивні втручання для вирішення таких проблем, як хімічна дефоліація або забруднення від боєприпасів, які в іншому випадку могли б залишитися непоміченими до виникнення серйозних пошкоджень. Це особливо актуально для довгострокового екологічного здоров'я в зонах конфліктів.

– LiDAR.

Системи LiDAR (виявлення світла та визначення дальності), зокрема платформи на основі БПЛА та повітряні платформи, надають високоточні 3D-дані хмар точок лісових середовищ. Ця технологія має вирішальне значення для вимірювання висоти дерев, товщини крон, об'єму біомаси та виявлення незначних змін у структурі лісів. БПЛА-LiDAR може досягати дуже високої щільності точок, що має вирішальне значення для виявлення невеликих аномалій рельєфу, таких як неглибокі кратери. Він може проникати крізь крони рослинності, щоб надати інформацію про підкранові об'єкти та наземний рельєф, що є життєво важливим для картографування історичних ландшафтів конфліктів та виявлення прихованих залишків.

На відміну від 2D-зображень, LiDAR надає 3D-представлення лісу. Це дозволяє точно вимірювати характеристики дерев (висоту, об'єм, структуру крон) та виявляти фізичні зміни, які 2D-зображення можуть пропустити або неправильно інтерпретувати. Наприклад, він може виявляти невеликі аномалії рельєфу (кратери) та проникати крізь рослинність. Таким чином, LiDAR має вирішальне значення для кількісної оцінки масштабу та серйозності фізичних пошкоджень, таких як вплив осколків на крони або утворення кратерів, які є прямими наслідками бойових дій. Він також допомагає оцінювати об'єм деревини, що підлягає заготівлі, та високоточно планувати заходи з лісовідновлення.

– Штучний інтелект та машинне навчання для розширеного аналізу

Моделі глибокого навчання (DL), зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), революціонізували застосування дистанційного зондування, автоматизуючи ідентифікацію, класифікацію та кількісну оцінку пошкоджень за допомогою супутникових та аерофотознімків високої роздільної здатності. Ці моделі можуть виявляти структурні аномалії шляхом порівняння зображень до та після катастрофи

(виявлення змін), значно покращуючи швидкість та точність оцінки. Архітектури, такі як U-Net та Mask R-CNN, ефективні для сегментації зображень, локалізації та класифікації пошкоджених будівель або лісових ділянок. Алгоритми серії YOLO також пропонують переваги в точності та ефективності для виявлення об'єктів.

Ручна оцінка збитків є трудомісткою, вимагає значних витрат часу та є небезпечною. Глибоке навчання автоматизує цей процес, дозволяючи проводити швидко, великомасштабну оцінку, яка була б неможливою лише для людських команд. Це особливо важливо у великих, недоступних зонах конфліктів. Ця автоматизація звільняє людських експертів для більш складних завдань, прискорює координацію гуманітарної допомоги, планування реконструкції та юридичну документацію. Вона також дозволяє частіше проводити моніторинг, забезпечуючи динамічну адаптацію стратегій реагування [15].

Незважаючи на потужні можливості, ефективність моделей глибокого навчання залежить від високоякісних, різноманітних та добре збалансованих навчальних наборів даних. Пошкодження, спричинені війною, часто мають інші структурні характеристики, ніж природні катастрофи, що призводить до зниження продуктивності, коли моделі, навчені на одному типі даних, застосовуються до іншого. Дефіцит даних та проблеми з їх якістю поширені в зонах конфліктів. Отже, існує критична потреба у розробці спеціалізованих, анотованих наборів даних для пошкоджень лісів, спричинених війною. Це вимагає значних інвестицій у збір даних, можливо, через спільні зусилля, та застосування методів трансферного навчання та адаптації домену для покращення узагальнення моделі в різних сценаріях конфліктів.

– Прогностичний ШІ для деградації лісів та ризику пожеж:

Прогностичні моделі ШІ використовують історичні дані та дані в реальному часі для прогнозування екологічних ризиків, таких як поширення лісових пожеж або районів, схильних до вирубки лісів. Інструмент WWF "Forest Foresight", наприклад, прогнозує втрату лісів до шести місяців наперед з точністю 80%, аналізуючи топографію, щільність населення та минулий лісовий покрив, а потім обробляючи супутникові знімки в реальному часі для виявлення ранніх показників вирубки лісів, таких як розширення доріг. Системи виявлення лісових пожеж на основі ШІ, що

використовують CNN, навчені на супутникових знімках, показали високий рівень успіху (93%) у класифікації постраждалих від пожеж територій, покращуючи стратегії раннього попередження.

Традиційна оцінка збитків здебільшого є реактивною – оцінюється після події. Прогностичний ШІ дозволяє передбачати збитки. Це фундаментальна зміна стратегії. Прогнозуючи, де ймовірно відбудеться вирубка лісів або пожежі, органи влади можуть втрутитися до того, як буде завдано збитків. Такий проактивний підхід може значно зменшити екологічні та соціально-економічні втрати, оптимізувати розподіл ресурсів для запобігання (наприклад, цільові патрулі, протипожежні смуги) та потенційно зменшити серйозність та поширення деградації, спричиненої війною. Це виходить за рамки простої оцінки до активного запобігання.

– Моделі ШІ

Оскільки моделі ШІ стають все складнішими ("чорні ящики"), методи пояснюваного ШІ (XAI) мають вирішальне значення для розуміння того, як ці моделі приймають свої рішення, особливо в критично важливих застосуваннях, таких як моніторинг навколишнього середовища. Інструменти XAI, такі як SHAP (SHapley Additive exPlanations), LRP (Layer-wise Relevance Propagation) та Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping), допомагають візуалізувати, які просторові ознаки найбільше сприяють класифікації ШІ. Ця інтерпретованість має життєво важливе значення для експертів, щоб виявляти слабкі сторони моделі, покращувати продуктивність та будувати довіру до результатів ШІ.

Моделі ШІ можуть обробляти величезні обсяги даних та виявляти закономірності, але якщо їхні рішення є непрозорими ("чорний ящик"), людські експерти та політики можуть вагатися довіряти їм та діяти відповідно.⁹¹ XAI надає "чому" за "що", дозволяючи експертам у галузі перевіряти, уточнювати та, зрештою, *довіряти* оцінці ШІ. Отже, XAI є важливим для ефективної інтеграції ШІ у реальне прийняття екологічних рішень у зонах конфліктів. Він сприяє зворотному зв'язку між розробниками ШІ та екологами-практиками, що призводить до більш надійних, достовірних та придатних для розгортання рішень ШІ, які справді розширюють можливості людини.

– Мультисенсорне злиття даних зі ШІ

Мультисенсорне злиття даних поєднує інформацію з різних платформ дистанційного зондування (оптичні, SAR, LiDAR) та навіть наземних датчиків для досягнення більш комплексного, точного та надійного розуміння пошкоджень лісів, ніж будь-яке окреме джерело могло б надати. Цей підхід долає індивідуальні обмеження датчиків (наприклад, оптичні обмеження через хмари, складність SAR, вартість LiDAR). Алгоритми ШІ, включаючи моделі машинного навчання, такі як Random Forest, Support Vector Machine та K-Nearest Neighbor, є інструментальними в обробці та інтеграції цих різноманітних наборів даних.

Кожна технологія дистанційного зондування має свої сильні та слабкі сторони (наприклад, оптична для видимих змін, SAR для всепогодних умов, LiDAR для 3D-структури, HSI для тонкого стресу). Шляхом злиття даних з кількох датчиків ШІ може створити більш повну та насичену картину пошкоджень, компенсуючи обмеження окремих датчиків. Наприклад, поєднання Sentinel-1 (SAR) та Sentinel-2 (оптичний) може значно покращити оцінку надземної біомаси. Цей інтегрований підхід має вирішальне значення для оцінки складних та багатограних наслідків війни для лісів, де пошкодження можуть варіюватися від видимих руйнувань до прихованого хімічного забруднення або структурних змін. Він забезпечує більш надійну та стійку систему оцінки, зменшуючи невизначеність та покращуючи основу для планування відновлення.

– Інтегровані платформи та наземні інновації

Веб-ГІС платформи інтегрують різні джерела просторових даних, включаючи зображення дистанційного зондування, та представляють їх за допомогою інтерактивних карт та панелей моніторингу. Ці платформи забезпечують централізований центр для візуалізації, аналізу та обміну екологічними даними в реальному часі, що має вирішальне значення для швидкого реагування та прийняття обґрунтованих рішень у сценаріях катастроф та конфліктів. Наприклад, модель глибокого навчання Esri інтегрує ГІС та ШІ для точної оцінки збитків, а результати легко інтегруються у веб-карти та панелі моніторингу. Інструмент MORFO Dash консолідує дані моніторингу та надає ключові показники ефективності для

відстеження прогресу відновлення.

Необроблені дані дистанційного зондування та моделі ШІ є складними та вимагають спеціалізованих знань. Веб-ГІС платформи перетворюють цю складність на зручні, інтерактивні візуалізації (панелі моніторингу, карти). Це робить критично важливу екологічну інформацію доступною для ширшого кола зацікавлених сторін, включаючи політиків, рятувальників та місцеві громади, які можуть не мати глибоких технічних знань. Ця широка доступність сприяє співпраці, покращує ситуаційну обізнаність між різними установами та дозволяє приймати рішення на основі даних на різних рівнях, від стратегічного планування до тактичних дій на місцях, що має вирішальне значення для скоординованих зусиль у регіонах, що постраждали від конфлікту.

– Безпілотні наземні транспортні засоби (БНТЗ) для відбору проб у небезпечних зонах.

Безпілотні наземні транспортні засоби (БНТЗ) пропонують критично важливе рішення для проведення екологічних оцінок у небезпечних районах, зокрема тих, що забруднені НВБ або хімічними речовинами. Ці роботизовані системи можуть безпечно отримувати доступ та пересуватися в небезпечних зонах, збирати проби ґрунту та навколишнього середовища, а також здійснювати довгостроковий безперервний моніторинг рівнів радіації або хімічних розливів, тим самим мінімізуючи вплив небезпеки на людину. БНТЗ, оснащені датчиками на основі ШІ та тепловізійними камерами, можуть надавати дані в реальному часі, ідентифікувати та відстежувати цілі, а також картографувати небезпечні зони.

Хоча дистанційне зондування чудово підходить для широкомасштабної оцінки, для точної кількісної оцінки збитків, особливо щодо хімічного забруднення або впливу НВБ, часто необхідні детальна наземна перевірка та фізичний відбір проб. БНТЗ забезпечують безпечний засіб для збору цих критично важливих наземних даних у районах, занадто небезпечних для людей, ефективно розширюючи охоплення оцінки на раніше недоступні зони. БНТЗ заповнюють прогалину між даними дистанційного зондування та реальною ситуацією на місці, надаючи необхідну перевірку та детальну інформацію для цільових заходів з відновлення. Це має

вирішальне значення для оцінки довгострокових ризиків для здоров'я від хімічного забруднення та забезпечення безпеки майбутнього відновлення лісів та операцій з розмінування.

1.6 Методи виявлення та кількісної оцінки хімічного забруднення та важких металів від боєприпасів.

Збройні конфлікти призводять до потрапляння численних токсичних речовин, включаючи важкі метали (свинець, сурма, уран) та енергетичні сполуки (вибухові речовини, паливо), у ґрунт та воду. Ці забруднювачі можуть зберігатися протягом десятиліть, створюючи довгострокові ризики для здоров'я людини, дикої природи та екосистем.

Хоча фізичні пошкодження очевидні, хімічне забруднення від боєприпасів часто є невидимим, але створює серйозні довгострокові ризики. Традиційні методи є трудомісткими. Дистанційне зондування, особливо гіперспектральне, пропонує неінвазивний спосіб виявлення стресу рослинності як індикатора забруднення. Таким чином, багатосторонній підхід, що поєднує передові дистанційні зондування для широкомасштабного скринінгу (виявлення гарячих точок) та цільовий наземний відбір проб на основі БНТЗ для точної кількісної оцінки, є важливим. Це має вирішальне значення для захисту здоров'я людини, забезпечення продовольчої та водної безпеки та забезпечення безпечного відновлення лісів у довгостроковій перспективі.

Методи оцінки:

- Польовий відбір проб та лабораторний аналіз: Традиційні методи включають ретельний польовий відбір проб ґрунту, води та повітря, з подальшим лабораторним аналізом для кількісної оцінки забруднювачів. Це часто уточнюється з урахуванням шляхів впливу.
- Дистанційне зондування як індикатор: Технології дистанційного зондування, зокрема гіперспектральна зйомка та мультиспектральні БПЛА, можуть виявляти стрес рослинності як індикатор основного забруднення ґрунту. Зміни

у спектральній відбиваності, особливо у видимій та ближній інфрачервоній областях, можуть вказувати на стрес рослин через забруднювачі.

- Біоіндикатори: Флора та фауна можуть слугувати біоіндикаторами, накопичуючи важкі метали та демонструючи фізіологічні реакції на стрес, надаючи інформацію про стан навколишнього середовища.

Відновлення лісів після війни може зайняти десятиліття. Обговорювані інноваційні рішення призначені не лише для негайної оцінки збитків, а й для безперервного, довгострокового моніторингу стану та відновлення лісів. Це включає відстеження змін площі лісів, їх стану та ефективності зусиль з відновлення. Дані цих оцінок мають вирішальне значення для розробки планів сталого управління лісами, визначення пріоритетів відновлення та оптимізації розподілу ресурсів для відновлення.

Звіт виходить за рамки простої кількісної оцінки збитків, зосереджуючись на "інноваційних рішеннях для дослідження пошкоджень лісів". Це передбачає зосередження на розумінні динаміки пошкоджень та відновлення. Довгостроковий моніторинг має вирішальне значення для цього, оскільки він дозволяє адаптивне управління, де стратегії коригуються на основі спостережуваних змін. Таким чином, ці технології дозволяють перейти від реагування на кризу до довгострокового екологічного відновлення та підвищення стійкості. Вони надають дані, необхідні для оцінки успіху втручань, адаптації методів управління до мінливих умов (включаючи вплив зміни клімату) та забезпечення стійких лісових екосистем для майбутніх поколінь.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є фундаментальним методом отримання інформації про об'єкти, матеріали або явища шляхом вимірювань, здійснених на відстані, без прямого фізичного контакту з об'єктом спостереження. Цей неінвазивний підхід є особливо цінним для моніторингу великих та часто важкодоступних екосистем, таких як ліси. Принцип роботи ДЗЗ ґрунтується на взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнею Землі, де спеціалізовані сенсори реєструють відбиту або випромінювану енергію. Розуміння різних діапазонів електромагнітного спектра: ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного та

мікрохвильового є ключовим для вибору відповідної апаратури та коректної інтерпретації отриманих даних.

Система ДЗЗ складається з кількох основних компонентів: носіїв знімальної апаратури (штучні супутники, літаки, аероплани, дрони), власне знімальної апаратури (цільові сенсори) та бортових засобів для прийому, обробки та передачі інформації на Землю. Ця комплексна архітектура дозволяє збирати дані з різною висотою та деталізацією, що забезпечує гнучкість у застосуванні. Сфера застосування ДЗЗ є надзвичайно широкою, охоплюючи землекористування, контроль водних ресурсів, спостереження прибережних зон та океанів, а також лісове господарство. Така універсальність підкреслює значущість технології для комплексного та сталого управління природними ресурсами.

Історично ДЗЗ трансформувалося з простого інструменту спостереження на потужний засіб для моніторингу та управління лісами, сприяючи їх сталому використанню та захисту. Ранні дослідження вже демонстрували потенціал супутникових знімків Landsat TM для відстеження змін у хвойних плантаціях, закладаючи основу для подальшого розвитку. З плином часу ДЗЗ стало не просто джерелом інформації, а ключовим елементом для прийняття обґрунтованих рішень у лісовій політиці та управлінні. Цей перехід від пасивного спостереження до активного інструменту управління означає, що ефективність ДЗЗ у лісовому господарстві оцінюється не лише за якістю зібраних даних, а й за тим, наскільки ці дані інтегруються в процеси прийняття рішень та призводять до конкретних, вимірених покращень у сталому управлінні лісами. Це вимагає від лісогосподарських організацій не лише технічної експертизи, а й здатності до аналізу та трансформації даних у дієві стратегії. Сучасні методи, зокрема супутниковий моніторинг, розглядаються як ключ до точного лісівництва, з перспективами автоматизації та роботизації процесів, що обіцяє значне підвищення ефективності та зменшення потреби у прямому людському втручанні.

Методи дистанційного зондування класифікуються за джерелом сигналу на активні та пасивні. Ця класифікація є фундаментальною, оскільки вона визначає принципи роботи сенсорів та їхню придатність для різних умов спостереження.

Активне дистанційне зондування передбачає використання приладів, які самостійно випромінюють сигнал або мають власне джерело світла, а потім аналізують інтенсивність поверненого сигналу. Основною перевагою активних систем є їхня незалежність від сонячного світла, що дозволяє збір даних у будь-який час доби, та менша залежність від атмосферних умов, оскільки мікрохвилі, що часто використовуються, здатні проникати крізь хмари. До прикладів активних сенсорів належать:

– Радар (Radio Detection and Ranging): Використовує радіохвилі для вимірювання відстані. Радіохвилі завдовжки від 1 см до 1 м вільно проходять крізь земну атмосферу, не відбиваючись від хмар і не розсіюючись через погані погодні умови.⁷ Це дозволяє збирати дані про поверхню, рослинність і навіть підповерхневі деталі незалежно від погодних умов.

– LiDAR (Light Detection and Ranging): Використовує лазерні імпульси світла для вимірювання відстані та створення детальних 3D-моделей. LiDAR-сенсори випромінюють імпульси світла, які відбиваються від об'єктів і повертаються до сенсора, дозволяючи обчислити відстань та створити тривимірне зображення. Інші активні прилади включають лазерні висотоміри, далекоміри та скаттерометри.

Пасивне дистанційне зондування, на відміну від активного, не має власного джерела енергії. Воно покладається на природну енергію, зокрема сонячні промені, відбиті від об'єкта або випромінювані ним. Це означає, що пасивне ДЗЗ можливе лише за наявності достатнього сонячного світла. Пасивні сенсори, такі як мультиспектральні або гіперспектральні, вимірюють інтенсивність сигналу в різних діапазонах спектра, включаючи видимий, ближній та термальний інфрачервоний, а також мікрохвильовий. Прикладами пасивних сенсорів є спектрометри, радіометри, спектрорадіометри та гіперспектральні радіометри. Програма Landsat є яскравим прикладом пасивного ДЗЗ, оскільки її супутники збирають та записують дані про планету понад 40 років, надаючи їх у відкритому доступі для історичного аналізу.

Важливо відзначити, що активні та пасивні системи ДЗЗ не є взаємовиключними, а скоріше взаємодоповнювальними. Пасивні системи, такі як оптичні супутники, залежать від сонячного світла та можуть бути обмежені хмарним

покривом або часом доби. Вони надають широке, регулярне покриття, що робить їх ідеальними для загального, широкомасштабного моніторингу та виявлення початкових змін або аномалій. Натомість, активні системи, зокрема LiDAR та Radar, мають власне джерело сигналу і функціонують незалежно від освітлення та значною мірою від атмосферних умов, особливо радар, який здатний проникати крізь хмари та щільні крони. Ця відмінність створює природну синергію: після виявлення потенційно проблемних ділянок за допомогою пасивних даних, активні системи можуть бути застосовані для більш детального аналізу, навіть якщо погодні умови несприятливі для оптичних сенсорів. Таким чином, оптимальне застосування ДЗЗ у лісовому господарстві вимагає інтеграції даних з різних типів сенсорів. Це дозволяє отримати найбільш повну та надійну інформацію, компенсуючи обмеження кожної окремої технології. Такий багатосенсорний підхід забезпечує неперервний моніторинг та підвищує точність оцінок, що є критично важливим для комплексного управління лісовими ресурсами.

Вибір платформи для збору даних дистанційного зондування є вирішальним і залежить від конкретних цілей, середовища та необхідного рівня деталізації. Кожна платформа має свої унікальні переваги та недоліки, які впливають на масштаб охоплення, роздільну здатність, вартість та оперативність.

Супутники забезпечують глобальне або регіональне охоплення та регулярні повторні спостереження, дозволяючи моніторинг величезних територій. Вони є економічно ефективною основою для великомасштабних інвентаризацій лісів на національному рівні. Однак, супутникові зображення можуть мати грубу роздільну здатність і бути схильними до хмарного покриття, що ускладнює отримання детальної інформації. Це обмежує їх використання для завдань, що вимагають дуже високої деталізації або безперервного моніторингу за будь-яких погодних умов.

Літаки, оснащені LiDAR-сканерами, здатні збирати 3D-зображення високої деталізації, надаючи точні карти рельєфу та інформацію про структуру лісу, включаючи висоту, відстань та щільність дерев. Важливою перевагою є здатність "бачити" крізь лісовий покрив до лісової підстилки, що дає цілісне уявлення про лісову структуру. Проте, використання літаків може бути дорогим, трудомістким та

вимагати спеціалізованих літаків і навченого персоналу. Це обмежує їх застосування для регулярного моніторингу на дуже великих територіях.

Дрони (БПЛА) літають значно нижче, що дозволяє збирати надзвичайно деталізовані дані з надвисокою просторовою та часовою роздільною здатністю. Вони надають доступ до важкодоступних районів і є економічно ефективною та гнучкою альтернативою для детальної інвентаризації лісів, особливо для вимірювань на рівні окремих дерев. Однак, дрони можуть охоплювати лише невеликі території за один політ, вимагають кваліфікованих операторів та мають обмежену вантажопідйомність.

Вибір платформи ДЗЗ для конкретного завдання в лісовому господарстві має бути стратегічним рішенням, що ґрунтується на балансі між необхідною просторовою та часовою роздільною здатністю, бюджетом та розміром досліджуваної території. Це може призвести до багатоплатформного підходу, де різні платформи використовуються для різних етапів або типів моніторингу: супутники для виявлення "гарячих точок" та широкомасштабного моніторингу, літаки для регіональної деталізації, а дрони для локальних, високоточних обстежень. Цей підхід дозволяє максимально ефективно використовувати переваги кожної технології, мінімізуючи при цьому їхні обмеження.

Ця таблиця є цінною, оскільки вона дозволяє фахівцям швидко візуалізувати компроміси, пов'язані з вибором платформи ДЗЗ. Вона чітко демонструє, що супутники оптимальні для широкого охоплення та регулярності, літаки — для деталізованих 3D-даних на великих територіях, а дрони — для дуже високої деталізації на малих ділянках. Така систематизація допомагає не лише зрозуміти технічні відмінності, а й прийняти обґрунтоване рішення щодо вибору інструментів, що є фундаментальним для ефективного планування та управління в лісовому господарстві.

1.7 Ключові технології та сенсори у лісовому господарстві

У сучасному лісовому господарстві використовуються різноманітні технології дистанційного зондування, кожна з яких має свої унікальні можливості та

застосування. Серед них особливо виділяються LiDAR, Radar та оптичні сенсори.

LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR є активною технологією дистанційного зондування, яка використовує імпульси світла (лазери) для вимірювання відстані. Система випромінює лазерний імпульс до об'єкта, такого як дерево або поверхня землі, і вимірює час, необхідний для повернення відбитого сигналу до сенсора. Використовуючи швидкість світла, система точно розраховує відстань до об'єкта. Цей метод дозволяє отримати надзвичайно точні дані про висоту.

Крім вимірювання відстані, LiDAR збирає додаткові дані, такі як кут світла, висота та нахил платформи, що дозволяє точно визначити висоту над рівнем моря. Це призводить до створення високодеталізованих тривимірних зображень лісових структур, відомих як "хмари точок". Ці хмари точок є основою для детального аналізу лісового покриву та підстилки.

Застосування у лісовому господарстві:

- Картографування рельєфу: LiDAR дозволяє створювати точні карти рельєфу, бачити прогалени між об'єктами та ідентифікувати водні потоки та русла струмків навіть під щільним лісовим покривом. Це критично важливо для планування лісгосподарських робіт та охорони водних ресурсів.
- Вимірювання структури лісу в 3D: Технологія дозволяє вимірювати висоту дерев, відстань між ними, щільність лісового покриву та інші структурні характеристики. Це дає змогу отримувати таксаційні характеристики, які раніше вимагали трудомістких наземних вимірювань.
- Проникнення крізь лісовий покрив: LiDAR-сенсори здатні проникати крізь крони дерев, збираючи дані про лісову підстилку. Це забезпечує цілісне уявлення про структуру лісу, а не лише про верхівки дерев. Ця унікальна перевага LiDAR робить його незамінним для оцінки підліску, ґрунту та водних об'єктів.
- Оцінка запасів деревини та вуглецевих запасів: LiDAR є цінним інструментом для оцінки біомаси та вуглецевих запасів у лісах. Важливою особливістю є те, що LiDAR не насичується навіть при дуже високих рівнях біомаси (понад 1000 т/га), що робить його ідеальним для оцінки щільних лісів.

- Точне картографування та лісові інвентаризації: Завдяки високій точності, LiDAR застосовується для детального картографування та проведення лісових інвентаризацій, що дозволяє оцінювати здоров'я лісу, виявляти стресові або уражені ділянки та вживати своєчасних заходів.

Radar (Radio Detection and Ranging)

Radar є ще однією активною технологією, яка використовує радіохвилі для визначення відстані, кута або швидкості об'єктів. Система передає електромагнітні хвилі в радіочастотному спектрі, виявляє відбиті хвилі (відлуння) та вимірює час, необхідний для повернення радіосигналів. Радіохвилі (від 0.3 до 100 см) є довшими за світлові хвилі LiDAR (700-1550 нм), що дозволяє їм вільно проходити крізь земну атмосферу, не відбиваючись від хмар і не розсіюючись через погані погодні умови.⁷

Застосування у лісовому господарстві:

- Моніторинг лісових пожеж: Радарні дані можуть використовуватися для відстеження динаміки лісових пожеж та оцінки вигорілих площ.
- Вивчення характеристик поверхні Землі: Radar допомагає досліджувати такі особливості, як вміст вологи на поверхні Землі, що є важливим для розуміння стану лісових угідь.
- Моніторинг змін лісового покриву: Завдяки здатності проникати крізь хмарність, Radar є цінним для безперервного моніторингу змін у лісовому покриві, особливо в регіонах з частими хмарами.
- Оцінка біомаси: Radar чутливий до просторової структури лісу та стоячої біомаси, особливо на довших довжинах хвиль, що дозволяє використовувати його для оцінки біомаси.

Оптичні сенсори (мультиспектральні та гіперспектральні)

Оптичні сенсори є пасивними системами, які реєструють відбите сонячне світло від поверхні Землі. Мультиспектральні сенсори збирають дані у кількох широких спектральних діапазонах (смугах), тоді як гіперспектральні сенсори розрізняють сотні дуже вузьких спектральних діапазонів у видимому, ближньому та середньому інфрачервоному випромінюванні. Це дозволяє отримувати детальну інформацію про спектральні характеристики об'єктів.

Застосування у лісовому господарстві:

- Моніторинг здоров'я лісу: Оптичні дані, зокрема індекси вегетації (наприклад, NDVI), використовуються для оцінки стану здоров'я лісу та виявлення стресу або захворювань.
- Класифікація порід дерев: Гіперспектральні зображення дозволяють розрізнити різні породи дерев на основі їх унікальних спектральних сигнатур.
- Картографування лісового покриву та змін: Оптичні супутникові знімки широко використовуються для моніторингу лісового покриву, виявлення знеліснення та відстеження лісовідновлення.
- Оцінка вигорілих площ: Супутникові зображення до та після пожежі дозволяють оцінити збитки та класифікувати постраждалі території за ступенем вигорання.

Вибір між LiDAR, Radar та оптичними технологіями залежить від конкретних завдань зондування, обмежень застосування та наявних ресурсів.

- Точність та роздільна здатність: LiDAR, завдяки коротшій довжині хвилі світла, забезпечує надзвичайно високу точність та роздільну здатність (до кількох сантиметрів) для виявлення та картографування дрібніших об'єктів та створення 3D-карт. Radar, працюючи на довших радіохвилях, має дещо меншу роздільну здатність, але його точність значно зросла завдяки розвитку технологій. Оптичні сенсори можуть надавати високу роздільну здатність, але їхня здатність розрізнити дрібні об'єкти залежить від якості сенсора та умов освітлення.
- Дальність та зона покриття: Radar має широкий радіус дії, що може сягати сотень кілометрів, і забезпечує ефективний контроль за великими територіями незалежно від пори року. Дальність дії LiDAR, встановлених на дронах або супутниках, в ідеальних умовах становить кілька кілометрів, але може суттєво знижуватися за поганих погодних умов. Оптичні супутники забезпечують глобальне покриття, але їхня ефективність залежить від відсутності хмарності.
- Чутливість до умов середовища: Недоліком LiDAR є висока чутливість до атмосферних перешкод, таких як дощ, сніг та туман, які можуть знижувати його ефективність, розсіюючи, поглинаючи або відбиваючи лазерні промені. У таких умовах Radar є надійнішим, оскільки радіохвилі менш схильні до впливу опадів.

Оптичні сенсори також сильно залежать від хмарності.

- Економічна ефективність: Системи LiDAR, як правило, є складнішими та дорожчими у придбанні та експлуатації через необхідність використання високоточних лазерів та датчиків, а також потужних обчислювальних ресурсів. Компоненти радіолокаційних систем часто коштують дешевше, і вони мають нижчі витрати на експлуатацію та обслуговування. Оптичні супутникові дані можуть бути доступними у відкритому доступі (наприклад, Landsat, Sentinel-2), що робить їх економічно вигідними для широкомасштабного моніторингу.
- Взаємодоповнюваність технологій: Поєднання можливостей радарних та лідарних технологій у дистанційному зондуванні може значно підвищити точність досліджень та надати більше інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Наприклад, LiDAR чудово підходить для точного 3D-картографування, тоді як Radar є кращим для дальнього виявлення та роботи в несприятливих погодних умовах. Оптичні дані доповнюють ці системи, надаючи інформацію про спектральні властивості рослинності.

Оптимальний вибір сенсора залежить від конкретного завдання та умов. Наприклад, для детального картографування структури лісу та оцінки біомаси LiDAR є найкращим вибором завдяки його високій точності та здатності проникати крізь крони. Для моніторингу великих територій незалежно від погодних умов Radar може бути більш ефективним. А для широкомасштабного моніторингу здоров'я лісу та виявлення змін у лісовому покриві оптичні сенсори є незамінними. У багатьох випадках найкращі результати досягаються шляхом інтеграції даних з різних типів сенсорів, що дозволяє компенсувати індивідуальні обмеження кожної технології та отримати максимально повну та точну картину стану лісових ресурсів.

1.8 Застосування дистанційного зондування в ефективному управлінні лісовим господарством

Дистанційне зондування (ДЗЗ) революціонує управління лісовим господарством, надаючи безпрецедентні можливості для збору, аналізу та

інтерпретації даних про лісові ресурси. Це дозволяє переходити від традиційних, трудомістких методів до більш ефективних, точних та масштабованих підходів, що є каталізатором переходу до прецизійного лісівництва.

ДЗЗ значно покращує процеси лісової інвентаризації, які є основою для сталого управління лісами.

Вимірювання висоти та діаметра дерев: Традиційні методи вимірювання висоти та діаметра (ДГП – діаметр на висоті грудей) є трудомісткими. Технології ДЗЗ, зокрема LiDAR, дозволяють отримувати ці дані з високою точністю. LiDAR-системи, встановлені на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), можуть вимірювати висоту, щільність та структуру рослинного покриву з високою точністю, забезпечуючи комплексну оцінку лісових ландшафтів. Хоча пряме вимірювання ДГП за допомогою аеро-LiDAR є складним через відсутність точок на нижній частині стовбурів, його можна прогнозувати з висоти дерев та інших змінних, отриманих за допомогою LiDAR. Машинне навчання та глибоке навчання відіграють значну роль у розробці моделей для високоточної картографії висоти лісового покриву.

Визначення видового складу дерев: Мультиспектральні та гіперспектральні зображення дозволяють ідентифікувати різні породи дерев на основі їх унікальних спектральних сигнатур. Аналіз сезонних змін у вегетації також допомагає розрізняти види на основі їх фенологічних особливостей. Дослідження показують, що поєднання LiDAR-даних з іншими типами сенсорів, а також використання методів машинного навчання, значно підвищує точність класифікації порід дерев.

Оцінка біомаси та вуглецевих запасів: ДЗЗ є ключовим для оцінки біомаси та вуглецевих запасів у лісах, що є критично важливим для кліматичних ініціатив та проектів секвестрації вуглецю. LiDAR, зокрема, є домінуючим інструментом для оцінки надземної біомаси, оскільки він не насичується навіть при дуже високих рівнях біомаси. Супутникові дані, такі як Sentinel-2, Sentinel-1 та продукти висоти крон GEDI, використовуються для оцінки запасів вуглецю, і їх комбінація значно покращує точність моделей.

ДЗЗ дозволяє ефективно відстежувати динамічні зміни в лісових екосистемах.

Виявлення та моніторинг знеліснення (незаконні рубки, наслідки стихійних

лих): Супутникові зображення дозволяють виявляти та кількісно оцінювати втрати лісового покриву з високою точністю, навіть у віддалених або важкодоступних регіонах. Це включає виявлення незаконних суцільних рубок, оцінку збитків від стихійних лих, таких як урагани чи пожежі, та аналіз історичної лісозаготівельної діяльності. Платформи, такі як Global Forest Watch, використовують радарні системи для надання майже реального часу сповіщень про порушення лісового покриву.

Моніторинг лісовідновлення та росту молодих насаджень: ДЗЗ дозволяє відстежувати зміни земного покриву, спостерігати за ростом дерев та відновленими ділянками лісу для координації зусиль з лісовідновлення. Це підтримує екологічні ініціативи, спрямовані на боротьбу з ерозією та збереження біорізноманіття.

Моніторинг здоров'я лісу та виявлення пошкоджень (хвороби, шкідники): Супутникові зображення (наприклад, Sentinel-2 або MODIS) використовуються для моніторингу змін стану здоров'я лісу шляхом аналізу історичних та поточних значень індексів вегетації (NDVI). Це дозволяє оцінювати загальний стан лісу та виявляти зміни внаслідок природних явищ або лісовідновлювальних заходів.

ДЗЗ є незамінним інструментом для управління лісовими пожежами.

Виявлення активних пожеж та оцінка вигорілих площ: Термальні сенсори на супутниках можуть виявляти активні пожежі, навіть у віддалених районах, забезпечуючи швидке реагування. Супутникові зображення, зроблені до та після пожежі, дозволяють оцінити збитки та класифікувати постраждалі території за ступенем вигорання дерев, що є критично важливим для планування післяпожежних дій та лісовідновлення.

Картографування ризиків пожеж: Аналізуючи дані про вологість ґрунту, стан рослинності, погодні умови та історичні дані, супутники допомагають створювати карти ризиків пожеж, що сприяє превентивним заходам.

Інтеграція ДЗЗ з іншими геопросторовими методами підвищує точність та ефективність збору даних, допомагаючи в оцінці лісового покриву, біомаси, виявленні порушень та моніторингу біорізноманіття.

Підтримка сталого лісового господарства: ДЗЗ є ключовим для забезпечення сталого управління лісами, дозволяючи моніторинг показників та оцінку

ефективності лісогосподарських заходів. Це допомагає збалансувати заготівлю деревини з зусиллями з лісовідновлення.

Оцінка екосистемних послуг та біорізноманіття: Технології ДЗЗ дозволяють оцінювати екосистемні послуги, що надаються лісами, та моніторити біорізноманіття. ШІ-моделі аналізують дані з камер-пасток, супутникових знімків та історичних даних для оцінки екологічних потреб та оптимізації природоохоронних заходів.

Роль у міжнародних програмах (наприклад, REDD+): ДЗЗ є важливим інструментом для програм, спрямованих на скорочення викидів від знеліснення та деградації лісів (REDD+), забезпечуючи точні та надійні системи вимірювання, звітності та верифікації (MRV).³⁸ Це дозволяє відстежувати діяльність, що призводить до змін лісового покриву, та оцінювати її вплив.

Загалом, ДЗЗ є інструментом, що трансформує лісове господарство, надаючи можливість для переходу до прецизійного лісівництва. Ця технологія дозволяє не тільки збирати великі обсяги даних, а й перетворювати їх на дієві знання для ефективного управління, оптимізації ресурсів та забезпечення сталого розвитку лісових екосистем.

Незважаючи на значні переваги, застосування дистанційного зондування (ДЗЗ) у лісовому господарстві стикається з низкою викликів та обмежень, які потребують постійного вдосконалення методологій та технологій. Ці обмеження обумовлюють необхідність гібридних підходів, що поєднують ДЗЗ з наземними даними.

Сучасні системи ДЗЗ генерують величезні обсяги даних, що створює значні труднощі в їх управлінні, обробці та інтерпретації. Цей "потік даних" вимагає значних обчислювальних потужностей та спеціалізованого програмного забезпечення. Якість зображень та їх інтерпретація забирають багато часу у дослідницьких команд. Крім того, мінливість даних, насичення сигналу в щільних лісах та екологічні обмеження ускладнюють точну оцінку, наприклад, вуглецевих запасів. Розробка надійних алгоритмів та моделей для автоматизованої інтерпретації є постійним завданням.

Погодні умови значно впливають на ефективність ДЗЗ, особливо для пасивних та деяких активних систем.

Хмарність: Оптичні супутникові знімки вимагають безхмарних умов, що є

значним обмеженням, особливо у тропічних регіонах або в періоди з частими опадами. Хмари можуть повністю приховувати об'єкти, роблячи неможливим збір даних.

Туман та сніг: LiDAR-прилади, хоча й є активними, дуже чутливі до атмосферних перешкод, таких як дощ, сніг та туман. Ці явища можуть розсіювати, поглинати або відбивати лазерні промені, знижуючи ефективність та точність системи. Наприклад, густий туман може значно послабити лазерне випромінювання, зменшуючи ефективну дальність роботи LiDAR. Хоча існують стратегії для підвищення ефективності LiDAR в умовах туману (наприклад, використання лазерів з більшою довжиною хвилі), ці проблеми залишаються актуальними. Натомість, Radar-системи менш схильні до впливу дощу, снігу та туману завдяки більшій довжині радіохвиль, що робить їх надійнішими в суворих погодних умовах.

Незважаючи на всі переваги ДЗЗ, воно не може повністю замінити наземний збір даних. Дані дистанційного зондування повинні доповнюватися наземними вимірюваннями для калібрування, валідації та підвищення точності моделей. Проблеми виникають через високу вартість та трудомісткість наземних робіт, особливо у віддалених районах, а також через обмежену доступність даних для польової валідації.

Придбання та експлуатація високоточних систем ДЗЗ, таких як LiDAR, можуть бути досить дорогими. Це обмежує їх широке застосування, особливо для менших організацій або в країнах, що розвиваються. Хоча супутникові дані з відкритих джерел (наприклад, Landsat, Sentinel) є економічно вигідними, дані високої роздільної здатності від комерційних постачальників можуть бути значно дорожчими.

Лісові екосистеми є надзвичайно складними та динамічними. Моделі, що використовуються для інтерпретації даних ДЗЗ, повинні враховувати численні фактори, такі як вікова структура лісу, видовий склад, топографія, щільність крон та інші. Традиційні емпіричні регресійні моделі, хоча й прості та ефективні, можуть не відображати складні, нелінійні динаміки в лісових екосистемах. Вони також чутливі до якості даних та викидів, що знижує їх надійність та узагальнюваність. Розробка та адаптація моделей для різних регіонів та типів лісів залишається викликом.

Ці виклики підкреслюють, що ДЗЗ не є панацеєю, але його ефективність значно зростає при інтеграції з іншими методами та постійному вдосконаленні. Потреба у гібридних підходах, що поєднують сильні сторони дистанційного зондування з точністю наземних вимірювань, є очевидною. Це дозволяє компенсувати обмеження кожної технології окремо та забезпечити найбільш точну та надійну інформацію для сталого управління лісовими ресурсами.

Порівняння дистанційного зондування (ДЗЗ) з традиційними методами лісової інвентаризації виявляє значні переваги ДЗЗ у багатьох аспектах, хоча і підкреслює його роль як інструменту трансформації, а не повної заміни.

Наземні вимірювання, хоча і вважаються "золотим стандартом" для окремих дерев, є трудомісткими та схильними до людських помилок при масштабуванні на великі площі. Точність залежить від кваліфікації операторів та ретельності дотримання протоколів.

Сучасні технології ДЗЗ, особливо LiDAR, забезпечують високу точність у 3D-картографуванні та вимірюванні структурних характеристик лісу, таких як висота та щільність. Наприклад, LiDAR-датчики можуть визначати відстані з точністю до кількох сантиметрів. Точність вимірювань висоти дерев за допомогою дронів може бути порівнянною з наземними вимірюваннями. Однак, точність ДЗЗ може знижуватися через погодні умови (хмарність, туман), насичення сигналу в дуже щільних лісах та потребу в наземній верифікації для калібрування моделей.

Польові обстеження є надзвичайно трудомісткими та часозатратними, особливо для великих або важкодоступних територій. Вони обмежують просторовий та часовий масштаб досліджень, що компрометує ефективність безперервного моніторингу. ДЗЗ дозволяє збирати дані швидко та у великих масштабах, охоплюючи величезні території, що було б неможливо або надзвичайно дорого за допомогою традиційних методів. Супутники можуть моніторити цілі регіони на регулярній основі, забезпечуючи глобальний огляд. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію та вирішувати проблеми лісогосподарського комплексу.

Наземні інвентаризації є дуже дорогими через високі витрати на робочу силу, транспорт та логістику, особливо у віддалених районах. ДЗЗ значно знижує витрати

на польові роботи та матеріальні ресурси, забезпечуючи економічно ефективний підхід до моніторингу та управління лісами. Хоча початкові інвестиції у високоточне обладнання (наприклад, LiDAR) можуть бути значними, довгострокова економія часу та ресурсів робить ДЗЗ вигідним.

Традиційні методи вимагають значної кількості кваліфікованого персоналу для проведення польових вимірювань, що збільшує трудомісткість та складність управління. ДЗЗ значно скорочує потребу в ручній праці, автоматизуючи збір та первинну обробку даних. Хоча для інтерпретації та аналізу даних все ще потрібні експерти, загальний обсяг необхідних людських ресурсів для охоплення великих територій значно зменшується.

Наведені відмінності чітко показують, що ДЗЗ є інструментом трансформації, а не повної заміни традиційних методів. Воно доповнює наземні дані, надаючи можливість для швидкого, широкомасштабного та економічно ефективного моніторингу, що дозволяє виявляти зміни та проблеми на ранніх стадіях. Традиційні методи залишаються важливими для детальної верифікації, калібрування та збору специфічних даних, які важко отримати дистанційно. Поєднання обох підходів створює синергію, що забезпечує найбільш точне, повне та стійке управління лісовими ресурсами.

Майбутнє дистанційного зондування у лісовому господарстві обіцяє подальшу інтеграцію з передовими технологіями, що дозволить підвищити точність, оперативність та автономізацію процесів. Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) вже стали потужними інструментами, що вдосконалюють лісгосподарську практику. Вони дозволяють аналізувати величезні масиви даних, виявляти закономірності та прогнозувати майбутні результати. Алгоритми ШІ, поєднані із супутниковими зображеннями та даними ДЗЗ, можуть автоматизувати моніторинг росту рослин, їх розподілу та змін популяцій у лісах. Техніки глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), можуть бути навчені для моніторингу та виявлення будь-яких змін у лісовому рослинному покриві, ідентифікації порід дерев, аналізу та запису висоти та діаметра рослин, а також оцінки їх здоров'я. Це значно підвищує точність картографування розподілу видів. ШІ та МН

можуть покращити прогнозування лісових пожеж, виявлення хвороб та шкідників, а також моделювання секвестрації вуглецю. Масштабні дані, що генеруються системами ДЗЗ, вимагають ефективних методів обробки та аналізу. ШІ та МН, зокрема алгоритми глибокого навчання, демонструють значний успіх в автоматизації інтерпретації даних ДЗЗ, що дозволяє ефективно обробляти масивні обсяги інформації про структуру лісу, біомасу та зміни земного покриву. Інтеграція даних ДЗЗ з ГІС дозволяє створювати комплексні геопросторові моделі, які надають глибокі знання про склад, щільність та здоров'я лісу. Це допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу ресурсів, природоохоронних ініціатив та сталого лісогосподарювання. Розвиток аналізу великих даних та ШІ-моделей дозволяє переходити до моніторингу в майже реальному часі, що є критично важливим для швидкого реагування на надзвичайні ситуації, такі як лісові пожежі або незаконні рубки.¹⁴

Постійний розвиток технологій призводить до появи нових, більш досконалих сенсорів та платформ. Нові супутники, такі як EOS SAT-1, спеціально розроблені для завдань сільського та лісового господарства, надаючи оптичні знімки високої роздільної здатності. Розвиток компактного LiDAR-обладнання, включаючи системи на базі смартфонів та мобільні додатки, робить польові вимірювання більш доступними та практичними. Майбутні місії, такі як DESDynI, розглядають синергетичне використання LiDAR та Radar для вимірювання структури лісу та біомаси на глобальному рівні.

2 ОГЛЯД ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ТА МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

2.1 Основи дистанційного зондування для лісового господарства

Дистанційне зондування в лісовому господарстві спирається на різноманітні технології та платформи, кожна з яких має унікальні можливості для збору даних.

Супутники є основою для моніторингу лісів у глобальному масштабі. Вони забезпечують широке географічне охоплення, часті спостереження (щоденно або щотижнево) та високу роздільну здатність, дозволяючи ідентифікувати окремі дерева та невеликі зміни в лісовому покриві.

Супутникові системи поділяються на:

- Пасивні оптичні супутники: Ці системи використовують сонячне світло, відбите від поверхні Землі, для збору інформації. Дані з часових рядів вільно доступних пасивних оптичних супутникових даних, таких як Landsat, SPOT та Sentinel-2, широко використовуються для створення карт типів лісів або інформації про види дерев.
- Активні супутникові системи: До них належать системи, такі як синтетичний апертурний радар (SAR), які випромінюють власне електромагнітне випромінювання та вимірюють відбиті сигнали. Радарні системи мають значну перевагу, оскільки можуть проникати крізь хмарний покрив та лісові насадження, надаючи дані про структуру лісу та біомасу навіть у складних погодних умовах.

LiDAR (Light Detection and Ranging) є активною оптичною технологією, яка використовує лазерні імпульси для виявлення цілей, таких як лісовий намет або ґрунт, та обчислення відстані до них. Ця технологія стала незамінною для картування структури лісу та є ключовою допоміжною інформацією для покращення оцінок атрибутів лісу, що надаються лісовими інвентаризаціями. LiDAR дозволяє створювати детальні 3D-моделі структури лісу, що є критично важливим для точної оцінки біомаси. Місія GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) NASA,

запущена у 2018 році, надає цінні космічні дані LiDAR, спеціально розроблені для вивчення рослинності, що дозволяє точно фіксувати вертикальну структуру лісу та створювати великомасштабні карти щільності надземної біомаси. Порівняно з радарними системами, LiDAR, завдяки меншій довжині хвилі світла, дозволяє виявляти та картографувати дрібніші об'єкти з точністю до кількох сантиметрів.

Дрони (безпілотні літальні апарати, БПЛА), літаки та супутники є основними платформами для збору даних дистанційного зондування. Збір даних за допомогою дронів є економічно ефективним для вимірювання рослинності на менших територіях, забезпечуючи подібну точність порівняно з повітряним лазерним скануванням. Вони дозволяють отримувати високодеталізовані дані для локального моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації.

2.2. Принципи збору та обробки даних

Збір даних дистанційного зондування включає використання спектральних знімків, які надають інформацію про відбиваючі та поглинальні властивості ґрунтів, склад гірських порід та рослинності. Ці дані є основою для подальшого аналізу та інтерпретації.

Для обробки даних, особливо отриманих за допомогою LiDAR, створюються цифрові моделі висоти:

- Цифрова модель рельєфу (DTM): Ця модель представляє поверхню землі без рослинності та штучних споруд.
- Цифрова модель поверхні (DSM): Ця модель включає висоту рослинності та всіх споруд, що знаходяться на поверхні.
- Нормалізована цифрова модель поверхні (nDSM): Отримується шляхом віднімання DTM від DSM ($nDSM = DSM - DTM$), що дозволяє точно визначити висоту рослинного покриву, виключаючи вплив рельєфу.

Автоматизований розрахунок висоти також можливий за допомогою зіставлення стереозображень, що є ще одним методом отримання тривимірної інформації про лісовий покрив.

Різні технології дистанційного зондування, такі як оптичні, радарні та LiDAR, мають свої унікальні переваги та обмеження. Наприклад, оптичні дані чутливі до хмарності, тоді як радарні системи здатні проникати крізь неї. LiDAR надає детальні 3D-структури лісового намету, а гіперспектральні дані дозволяють розрізняти окремі види дерев. Жодна з цих технологій не є універсальним рішенням для всіх завдань. Тому їх синергетичне використання дозволяє долати індивідуальні обмеження кожної системи та отримувати більш повну та точну картину лісових екосистем. Це означає, що майбутні дослідження та оперативні програми повинні зосереджуватися на інтеграції даних з різних джерел та сенсорів, а не на ізольованому використанні однієї технології, що вимагає розробки складних алгоритмів обробки даних та платформ для мультисенсорної інтеграції.

2.3 Застосування дистанційного зондування в інвентаризації лісів

Дистанційне зондування є провідним джерелом даних для великомасштабної оцінки біомаси, оскільки воно є значно економічно ефективнішим та часоефективнішим порівняно з традиційними наземними вимірюваннями. Надземна біомаса (AGB) та її щільність (AGBD) є ключовими показниками для моніторингу глобального вуглецевого циклу та прийняття рішень щодо управління лісами.

Дані LiDAR, зокрема отримані з місії GEDI, є особливо важливими для оцінки AGBD, оскільки вони дозволяють точно фіксувати вертикальну структуру лісу. Це дає змогу створювати детальні 3D-моделі лісового намету, що є критично важливим для точних розрахунків. Крім того, використання мультиспектральних діапазонів та вегетаційних індексів також сприяє оцінці біомаси. Проте важливо відзначити, що супутникові дані іноді можуть призводити до ненадійних оцінок біомаси лісу та навіть переоцінювати надземну біомасу до порядку величини, що підкреслює необхідність валідації та інтеграції з іншими джерелами даних.

Технології, такі як повітряне лазерне сканування (LiDAR) та цифрова аерофотограмметрія (DAP), стали незамінними інструментами для детального картування структури лісу та значного покращення оцінок атрибутів лісу, що

надаються лісовими інвентаризаціями. Ці технології дозволяють отримати інформацію про висоту дерев, діаметр крон та загальний об'єм деревини.

Завдяки використанню мультитемпоральних супутникових даних можна виводити різні фенології видів дерев, тобто відстежувати зміни у їхньому життєвому циклі протягом року. Поєднання цієї інформації з цифровими моделями рельєфу та поверхні, а також структурними параметрами лісового намету, дозволяє картографувати різні типи лісів з високою просторовою деталізацією. Гіперспектральне зображення, що збирає дані у сотнях спектральних діапазонів, дозволяє розрізняти понад 100 різних видів дерев на основі їх унікальних спектральних сигнатур, що є значним кроком уперед для оцінки біорізноманіття.

Дистанційне зондування є ефективним інструментом для визначення площі та щільності лісового покриву. У контексті ДЗЗ-інвентаризації ліс визначається як територія, вкрита деревною рослинністю із зімкнутістю понад 50%, що спостерігається на рівні пікселів 20×20 м, незалежно від її правового статусу.

Моніторинговий підхід, що синергетично використовує оптичні та радарні супутникові дані високої роздільної здатності, дозволяє ідентифікувати поточний стан лісів, ступінь та щільність лісового покриву, а також відстежувати їхні зміни з часом. Це забезпечує точне та актуальне картографування лісових ресурсів.

Комплексний та надійний моніторинг лісів вимагає поєднання методів дистанційного зондування, таких як використання супутникових знімків, із традиційним збором польових даних на рівні ділянок. Польові дані надають більш деталізовану та точну інформацію, включаючи діаметри стовбурів на висоті грудей (DBH), висоти дерев (ТН) та площу поперечного перерізу, з яких розраховуються біомаса та запаси вуглецю.

Дистанційне зондування дозволяє оцінювати структуру лісу на великих територіях, ефективно вирішуючи проблеми, такі як високі витрати, обмежене просторове покриття та тривалі інтервали між повторними вимірюваннями, характерні для традиційних польових інвентаризацій. Хоча дистанційне зондування пропонує безпрецедентну ефективність для великомасштабного моніторингу, воно має певні обмеження у точності для конкретних атрибутів, як-от надземна біомаса,

або для точного розрізнення типів порушень. Польові дані, незважаючи на їхню вартість та трудомісткість, надають "істинну" інформацію на локальному рівні, що є критично важливим для калібрування та валідації даних ДЗЗ. Таким чином, інтеграція цих двох підходів дозволяє використовувати сильні сторони кожного: дистанційне зондування для широкого охоплення та виявлення змін, а польові дані для калібрування, валідації та отримання детальних, точних вимірювань. Це створює "гібридну" систему, яка є більш надійною та інформативною. Отже, майбутні зусилля в лісовій інвентаризації та моніторингу повинні зосереджуватися на розробці та впровадженні інтегрованих систем, що ефективно поєднують дистанційне зондування з вибірковими, стратегічно розміщеними польовими вимірюваннями. Це дозволить оптимізувати ресурси та значно підвищити точність оцінок лісових ресурсів.

2.4 Виявлення змін лісового покриву

Супутникові знімки є потужним інструментом для виявлення та кількісної оцінки втрат лісу з високою точністю. Шляхом порівняння зображень, отриманих у різні часові періоди, можна ідентифікувати райони збезлісення навіть у віддалених або недоступних регіонах. Моніторинг деградації лісів та відновлення лісів є ключовими напрямками, де дистанційне зондування демонструє свою ефективність. Ця технологія дозволяє відстежувати прогрес зусиль з лісовідновлення, вимірюючи ріст та поширення нових лісових площ протягом місяців та років. Крім того, історичний аналіз з використанням архівних супутникових даних, що охоплюють десятиліття, дозволяє отримати глибоке розуміння довгострокових тенденцій у лісовому покриві та загальному здоров'ї екосистем.

Дистанційне зондування відіграє вирішальну роль у моніторингу лісових пожеж на всіх етапах. Датчики можуть аналізувати рівень нагріву поверхні планети та сигналізувати про близькі пожежі, допомагаючи вчасно приймати важливі рішення, наприклад, про збільшення обсягів поливу або виклик екстрених служб. Супутники допомагають створювати карти ризику пожеж шляхом аналізу сухості

рослинності, погодних умов та історичних даних. Термальні датчики на супутниках здатні виявляти активні пожежі навіть у віддалених районах, забезпечуючи швидке реагування. Після пожежі детальне картографування вигорілих територій використовується для аналізу впливу пожеж та планування відновлювальних робіт.

Дистанційне зондування може ефективно виявляти заражені ліси, які демонструють різні симптоми на відстані, такі як зниження хлорофілу/води у листі, зміна кольору листя, дефоліація або опадання. Дані спостереження Землі, отримані супутниковими або повітряними датчиками, фіксують відмінності у випромінюванні, що виділяється пошкодженими деревами порівняно зі здоровими, через різні довжини хвиль.

Незважаючи на ці можливості, існують значні виклики. По-перше, дерева не гинуть миттєво, що ускладнює раннє виявлення початкових стадій ураження. По-друге, дистанційне зондування має обмежену здатність розрізнити пошкодження, спричинені шкідниками та хворобами, від інших природних або антропогенних порушень, таких як лісові пожежі або рубки. Це пояснюється тим, що спектральні зміни, викликані різними видами стресу, можуть бути схожими, що вимагає розробки більш складних алгоритмів або використання додаткових даних для точної атрибуції. Для підвищення ефективності моніторингу шкідників та хвороб за допомогою дистанційного зондування необхідні подальші дослідження у розробці більш чутливих сенсорів та вдосконалених алгоритмів машинного навчання, здатних розрізнити тонкі спектральні сигнали, характерні для конкретних патогенів або шкідників, а також інтеграція з екологічними моделями для прогнозування спалахів.

Дистанційне зондування є важливим інструментом для оцінки загального стану здоров'я лісів та їхнього біорізноманіття. Індекси здоров'я рослинності, такі як нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), надають кількісні показники здоров'я та життєздатності лісу. Ці індекси відображають активність фотосинтезу та загальний стан рослинного покриву.

Супутникові дані також можуть виявляти райони лісу, що зазнають посухового стресу, допомагаючи менеджерам пріоритетувати зусилля зі збереження та вживати заходів для пом'якшення наслідків. Крім того, дистанційне зондування дозволяє

картографувати лісову різноманітність та визначати домінуючі види дерев ², що є критично важливим для планування природоохоронних заходів та сталого управління лісовими екосистемами.

Моніторинг незаконних рубок є однією з найважливіших сфер застосування дистанційного зондування. Часті супутникові проходи дозволяють виявляти діяльність з лісозаготівлі незабаром після її виникнення. Вдосконалені алгоритми виявлення змін можуть ідентифікувати тонкі зміни у структурі лісу, що можуть вказувати на вибіркові рубки або деградацію, які часто є попередниками незаконної діяльності.

Супутникові дані можуть бути інтегровані з системами оповіщення для швидкого повідомлення органів влади про потенційну незаконну діяльність. Можливість виявляти незаконні рубки майже в реальному часі є значним кроком уперед порівняно з традиційними методами, які часто виявляли порушення вже після їх завершення. Це змінює парадигму моніторингу з реактивного на проактивний. Швидке виявлення дозволяє владі оперативно втручатися, що може значно зменшити масштаб шкоди та підвищити ефективність правозастосування. Отже, розвиток систем раннього оповіщення та їх інтеграція з оперативними структурами лісового господарства та правоохоронними органами є ключовим для ефективної боротьби з незаконними рубками. Це також може сприяти розвитку політик, що стимулюють стале лісокористування через підвищену прозорість та підзвітність.

2.5 Переваги та обмеження дистанційного зондування

Дистанційне зондування пропонує низку значних переваг, які роблять його незамінним інструментом у лісовому господарстві:

- Широке географічне охоплення: На відміну від традиційних наземних методів обстеження, дистанційне зондування може ефективно охоплювати величезні географічні території, що особливо корисно для вивчення великомасштабних екологічних змін та закономірностей. Це дозволяє проводити моніторинг цілих регіонів або навіть континентів.

- Економічна ефективність та часова ефективність: Порівняно з наземними вимірюваннями, дистанційне зондування є більш економічно ефективним та часоефективним для збору даних, особливо для моніторингу великих лісових площ. Це значно знижує витрати на збір інформації.
- Систематичний збір даних: Дистанційне зондування сприяє систематичному збору даних, що може усунути упередженість вибірки та дозволяє створювати комплексні набори даних для аналізу протягом тривалого часу. Це забезпечує послідовність та порівнянність даних.
- Оперативність та актуальність інформації: Дистанційне зондування дозволяє оперативно отримувати інформацію та вирішувати проблеми лісогосподарського комплексу. Часті спостереження дозволяють моніторити ліси щоденно або щотижнево, фіксуючи швидкі зміни та забезпечуючи своєчасні втручання.
- Ненав'язливість: Пасивні датчики дистанційного зондування записують електромагнітну енергію, не порушуючи об'єкт або територію інтересу, дозволяючи дослідникам моніторити природні явища без необхідності змінювати їхній підхід або поведінку.
- Різноманітність технологій: Дистанційне зондування охоплює багато технологій, включаючи LiDAR, стереоскопічну аерофотозйомку та радарні вимірювання, що дозволяє дослідникам обирати найбільш підходящу технологію для своїх конкретних потреб.
- Зростаюча доступність даних: Збільшення доступності даних дистанційного зондування, зокрема завдяки політиці вільного доступу до даних програм Landsat та Sentinel, а також розвитку хмарних обчислювальних платформ (наприклад, Google Earth Engine), створює нові можливості для моніторингу.

Незважаючи на численні переваги, дистанційне зондування також має певні обмеження та виклики, які необхідно враховувати:

- Роздільна здатність даних: Історично існували обмеження щодо роздільної здатності даних (від низької 20-50 м до високої близько 1 м). Хоча нові розробки значно покращують цей аспект, дрібні деталі все ще можуть залишатися непоміченими, що обмежує застосування для дуже детального аналізу.

- Вплив навколишнього середовища: Хмари або пил можуть значно знижувати якість даних, особливо для оптичних сенсорів. Це може призвести до пропусків у даних або потреби в додаткових знімках.
- Потреба у кваліфікованих фахівцях та високі витрати: Аналіз та інтерпретація даних дистанційного зондування вимагають значного досвіду, що робить наймання кваліфікованих аналітиків значним бюджетним фактором. Хоча вартість самих супутникових даних стала більш доступною, загальні витрати на обладнання та навчання персоналу можуть бути високими.
- Проблеми калібрування: Інструменти дистанційного зондування з часом можуть розкалібруватися, що призводить до неточних даних. Регулярне калібрування та обслуговування є важливими для забезпечення якості даних.
- Людський фактор: Залучення людини до обробки даних дистанційного зондування (наприклад, визначення роздільної здатності, калібрування датчиків, вибір платформи) може вносити помилки та упередженість у дані.
- Диференціація типів порушень: Дистанційне зондування має обмежену здатність розрізняти пошкодження лісу, спричинені шкідниками, від інших природних або антропогенних порушень, таких як лісові пожежі або рубки. Це вимагає додаткових методів перевірки.
- Відсутність послідовного довгострокового моніторингу: Нові датчики з підвищеною потужністю часто не мають історичних архівів даних або мають обмежене часове та просторове покриття, що ускладнює довгостроковий аналіз.
- Різний рівень впровадження: Темпи та рівень впровадження технологій дистанційного зондування в оперативні програми інвентаризації та моніторингу лісів помітно різняться залежно від географічного регіону. Це свідчить про необхідність адаптації рішень до місцевого контексту.

Для унаочнення цих аспектів, наведено наступну таблицю, яка зіставляє переваги та обмеження дистанційного зондування у лісовому господарстві, а також їхні наслідки:

Майбутнє дистанційного зондування в лісовому господарстві тісно пов'язане з подальшим розвитком передових технологій. Штучний інтелект (ШІ) та машинне

навчання (МН) продовжуватимуть покращувати точність та швидкість аналізу лісів, дозволяючи моніторинг та прийняття рішень майже в реальному часі. Ці технології можуть бути використані для автоматизації та роботизації машин у майбутньому, оптимізуючи процеси лісового господарства.

Інтеграція супутникових даних з наземними датчиками, що є частиною концепції Інтернету речей (IoT), забезпечить ще більш детальну та локалізовану інформацію про ліс, створюючи комплексні "цифрові двійники" лісових екосистем. Крім того, віртуальна (VR) та доповнена реальність (AR) можуть революціонізувати способи візуалізації та взаємодії з лісовими даними, значно покращуючи процеси планування та управління, надаючи іммерсивний досвід для аналізу та моделювання.

Постійне покращення просторової та часової роздільної здатності даних дистанційного зондування є ключовим напрямком розвитку. Запуск наносупутників та супутникових угруповань (констеляцій) забезпечує високу часову повторюваність та просторову деталізацію, що може відповідати інформаційним вимогам, пов'язаним з реагуванням на надзвичайні ситуації або подіями порушень. Це дозволить відстежувати зміни на менших масштабах та з більшою оперативністю, забезпечуючи швидше виявлення та реагування на загрози.

Використання кількох баз даних разом пропонує величезний потенціал для численних аспектів планування та управління лісовими ресурсами. Наприклад, інтегровані системи вже використовуються для прогнозування потреб у ресурсах для боротьби з лісовими пожежами, спираючись на комбінацію баз даних: погода, лісовий покрив, рельєф, поведінка пожежі тощо. Це створює повну ситуаційну картину, що значно підтримує менеджерів у прийнятті обґрунтованих, чутливих до часу рішень щодо розгортання протипожежного обладнання та персоналу.

Існує потреба у переході від регіональних тематичних досліджень до ширших, глобальних застосувань.³ Успішне впровадження часто відбувається там, де є сильне розуміння інформаційних потреб, пов'язаних з конкретним застосуванням, а також найбільш відповідної технології дистанційного зондування для задоволення цих потреб. Наука про дистанційне зондування часто зосереджена на конкретному джерелі даних або методологічній розробці, а не на цінності або корисності отриманої

інформації, яка є більш важливою для прийняття користувачами. Цей розрив між дослідницькими досягненнями та їх операційним впровадженням є значним викликом. Майбутній успіх залежить від здатності дослідників та розробників чітко демонструвати, як дані дистанційного зондування можуть вирішувати реальні проблеми та надавати вимірювану цінність для лісових менеджерів та політиків. Це означає, що майбутні інвестиції в дистанційне зондування для лісового господарства повинні бути спрямовані на розробку "готових до використання" продуктів та сервісів, які безпосередньо відповідають операційним потребам, а не лише на базові технологічні інновації. Це вимагає тіснішої співпраці між науковцями, промисловістю та кінцевими користувачами.

Дистанційне зондування стало невід'ємним та трансформаційним інструментом у сучасному лісовому господарстві, кардинально змінюючи методи інвентаризації та моніторингу лісів. Ключові технології, такі як супутники (як оптичні, так і радарні), LiDAR та дрони, надають безпрецедентні можливості для збору детальних та актуальних даних про структуру лісу, біомасу, видовий склад, а також для відстеження динамічних змін, таких як деградація, вирубка, пожежі, поширення хвороб та шкідників.

Незважаючи на значні переваги, що включають широке географічне охоплення, економічну та часову ефективність, а також систематичний збір даних, існують певні виклики. До них належать обмеження щодо роздільної здатності даних, вплив навколишнього середовища (наприклад, хмарність), потреба у висококваліфікованих фахівцях для аналізу даних та проблеми з калібруванням інструментів. Інтеграція дистанційного зондування з традиційними польовими даними є ключовою для підвищення точності та надійності отриманої інформації, оскільки польові вимірювання слугують для валідації та уточнення даних, зібраних дистанційно.

Майбутнє дистанційного зондування в лісовому господарстві виглядає надзвичайно багатообіцяючим. Постійний розвиток штучного інтелекту та машинного навчання, інтеграція з Інтернетом речей та подальше покращення просторової та часової роздільної здатності даних обіцяють ще більш точні, оперативні та комплексні дані. Ці інновації є критично важливими для прийняття

обґрунтованих рішень у сталому управлінні лісами, ефективній боротьбі зі зміною клімату, збереженні біорізноманіття та протидії незаконним рубкам.

Можливість дистанційного зондування надавати глобальні, послідовні та часові дані робить його не просто інструментом для лісового господарства, а ключовим фактором для досягнення глобальних цілей сталого розвитку. Це дозволяє країнам співпрацювати, обмінюватися даними та розробляти спільні стратегії для моніторингу та управління лісовими ресурсами на міжнародному рівні. Крім того, ця технологія підтримує такі міжнародні ініціативи, як програма ООН REDD+ (Зменшення викидів від збезліснення та деградації лісів), надаючи необхідні дані для моніторингу, звітності та верифікації (MRV). Таким чином, політики та міжнародні організації повинні активно інвестувати у розвиток та впровадження дистанційного зондування, а також сприяти міжнародній співпраці та обміну даними. Це не лише покращить управління лісами на національному рівні, а й посилить глобальні зусилля зі збереження клімату та біорізноманіття для майбутніх поколінь.

3 АНАЛІЗ ЛІСОУПРАВЛІННЯ НА ТЕРИТОРІЯХ, ЗАБРУДНЕНИХ В ХОДІ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

3.1 Ушкодження лісових екосистем в ході військових дій

Військові конфлікти залишають глибокі та тривалі шрами на лісових екосистемах, що виходять далеко за межі безпосередніх бойових дій. Цей звіт детально розглядає багатогранні виклики, пов'язані з управлінням лісами на територіях, забруднених внаслідок військових дій, та пропонує інноваційні стратегії для їхнього відновлення. Аналіз показує, що масштаби та складність військового впливу на ліси вимагають комплексного підходу, що включає передові технології дистанційного зондування, інтегровані стратегії розмінування та ремедіації, адаптивні методи відновлення та міцну міжнародну співпрацю.

Зокрема, звіт підкреслює руйнівний вплив прямих фізичних пошкоджень, спричинених бойовими діями та неконтрольованими лісовими пожежами, а також довгострокові наслідки забруднення вибухонебезпечними предметами (ВНП) та хімічними речовинами. Він також висвітлює вирішальну роль дистанційного зондування та штучного інтелекту в оцінці та моніторингу пошкоджень у небезпечних зонах. Проте, повний потенціал цих технологій обмежений відсутністю даних для наземної перевірки та спеціалізованих наборів даних для навчання моделей.

Для ефективного відновлення лісів, забруднених військовими діями, необхідний перехід від традиційних методів лісоуправління до спеціалізованих, інтегрованих та адаптивних підходів, що надають пріоритет безпеці та довгостроковій екологічній стійкості. Це вимагає значних і стабільних інвестицій, переоцінки пріоритетів землекористування та розробки інноваційних, безпечних технологій. Крім того, забезпечення безпеки персоналу, який працює в цих небезпечних зонах, є першочерговим завданням, що вимагає безперервного навчання, використання засобів індивідуального захисту та довгострокового моніторингу стану здоров'я.

Звіт завершується рекомендаціями щодо посилення міжнародної співпраці, мобілізації ресурсів та розробки національних політик, які синхронізують зусилля з розмінування та відновлення, забезпечуючи прозорість та залучення місцевих громад.

Військові операції, які історично розглядалися переважно через призму людських та геополітичних наслідків, дедалі частіше визнаються значними чинниками деградації навколишнього середовища. Їхній вплив на лісові екосистеми є особливо руйнівним, спричиняючи широкомасштабні та іноді незворотні пошкодження. Ці пошкодження включають не лише пряме знищення лісів, а й ширші наслідки, такі як вирубка лісів, втрата середовищ існування, ерозія ґрунту та різні форми забруднення. Незважаючи на ці глибокі наслідки, дослідження екологічних наслідків війни залишаються фрагментованими та часто ігноруються в процесі післяконфліктного планування, поступаючись місцем нагальним гуманітарним проблемам.

Ліси надають незамінні економічні, захисні та екологічні послуги, починаючи від деревини та засобів до існування до захисту від стихійних лих та критично важливих екосистемних функцій, таких як очищення повітря та води. Тому їхнє стале управління має першочергове значення для післяконфліктного відновлення, спрямованого на відновлення екологічної цілісності, підтримку засобів до існування та побудову довгострокової стійкості.

Існує важлива проблема, яка полягає в тому, що екологічні наслідки війни часто недооцінюються та недостатньо досліджуються, що призводить до фрагментованого розуміння, попри зростання сучасних технологій, таких як дистанційне зондування. Ця недбалість може мати довгострокові наслідки для екологічної стабільності та перешкоджати зусиллям з миробудівництва. Недостатнє розуміння та увага до цих питань призводять до недостатнього фінансування та відсутності спеціалізованих програм, що, своєю чергою, уповільнює та робить менш ефективним процес відновлення, а також може призвести до його нестійкості. Це посилює довгострокові екологічні та соціальні витрати. Таким чином, стійка недооцінка та фрагментарне вивчення впливу війни на навколишнє середовище, попри наявність передових технологій моніторингу, створюють критичний розрив у знаннях та діях. Цей

недогляд безпосередньо перешкоджає ефективному післяконфліктному управлінню навколишнім середовищем та сталому миробудівництву, підкреслюючи нагальну потребу в більш інтегрованих, всебічних та пріоритетних дослідницьких та політичних рамках.

3.2 Оцінювання характеру та масштабів пошкоджень лісів

Військові дії спричиняють широкий спектр пошкоджень лісових екосистем, які можна класифікувати як прямі та непрямі впливи.

Прямі впливи є безпосереднім результатом бойових дій та військових операцій. Військові дії безпосередньо спричиняють фізичні пошкодження лісів через інтенсивні події, такі як бомбардування, обстріли та пересування важкої техніки. В Україні, за два роки війни, понад 60 000 гектарів лісу було знищено на окупованих територіях, причому в окремих районах, таких як Куп'янське лісове господарство, спостерігалось значне зменшення площі лісів у 1,7 рази та зниження індексу листової поверхні (LAI) у 1,92 рази порівняно з 2021 роком. Вага та рух танків та іншої важкої техніки завдають значної шкоди рослинності та структурі ґрунту.

Військові операції є основним каталізатором лісових пожеж у зонах конфлікту, часто спричинених артилерійськими вибухами та іншими бойовими діями. У Харківській області України приблизно 40-45% лісових територій постраждали від лісових пожеж, кількість яких під час військового конфлікту (з 24 лютого 2022 року по 22 червня 2024 року) зростає у 7,6 рази. Ці пожежі є особливо руйнівними, оскільки їх часто важко контролювати або гасити через триваючі бойові дії та брак ресурсів. Пожежі, спричинені вибухонебезпечними предметами, можуть виникати цілий рік у зонах військового впливу. Навмисна вирубка лісів слугує тактичним маневром для позбавлення ворожих сил укриття або ресурсів. Військові навчання та операції на базах також передбачають розчищення рослинності та порушення екосистем.

На основі поєднання мап військових дій від Інституту вивчення війни (ISW) та лісової бази даних ВО «Укрдержліспроект» було проведено оцінку лісових ресурсів України, що зазнали впливу. Цей аналіз дозволив встановити площі та запаси

деревини в лісах, які знаходяться на тимчасово окупованих територіях або в зоні бойових дій, де лісгосподарська діяльність наразі обмежена.

Загалом, військова агресія безпосередньо вплинула на діяльність 114 державних лісгосподарських підприємств, 20 агропідприємств, 14 комунальних організацій та 12 інших лісокористувачів і власників лісів (рис. 3.1).

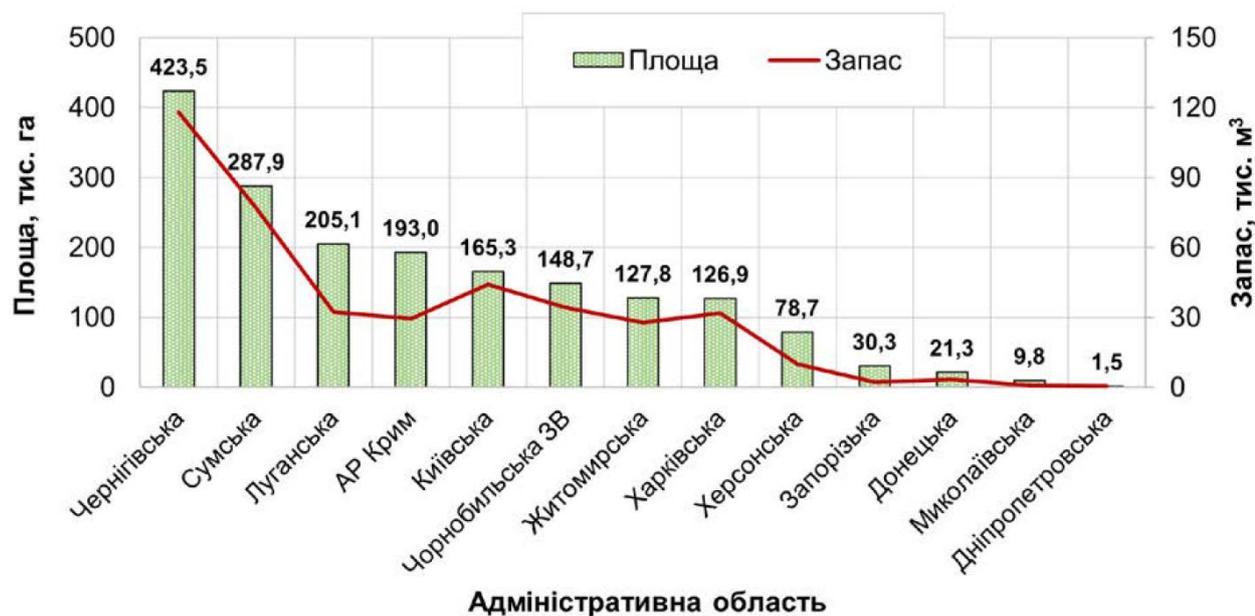


Рисунок 3.1 – Розподіл площі та запасу лісових насаджень на територіях, що зазнали впливу воєнних дій та тимчасової окупації, у розрізі адміністративних областей та лісгосподарських підприємств

Найбільші лісові площі в зоні небезпеки через військові дії зосереджені в Чернігівській (423,5 тис. га), Сумській (287,9 тис. га) та Луганській (205,1 тис. га) областях. У Житомирській, Київській, Харківській областях та Чорнобильській зоні відчуження площі таких територій варіюються від 126 до 165 тис. га.

Оцінка пошкоджень ландшафтів унаслідок пожеж проводилася за вищеприписаною методикою з використанням відкритої геоінформаційної системи QGIS 3.2.1. У таблиці 3.1 зведено дані про пожежі на території України в розрізі місяців та типів ландшафтів. З метою верифікації даних про території, що є небезпечними через вибухонебезпечні предмети (ВНП), було виконано порівняння інформації з інтерактивної карти ДСНС України з результатами наземних обстежень.

Ці обстеження проводилися спільними міжвідомчими комісіями, до яких увійшли представники лісгоспів Чернігівської області, ДСНС, МВС та ЗСУ (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Площі ділянок лісового фонду державних лісгосподарських підприємств Чернігівщини (га), які є потенційно забрудненими ВМП, за даними інтерактивної мапи ДСНС.

Лісгосподарське підприємство	Загальна площа підприємства	Вкрита лісовою рослинністю площа	Площа забруднена ВМП	% від загальної площі	% від площі, вкритої лісовою рослинністю
ДП "Городнянський лісгосп"	76378,7	69261,4	66496,3	87,1	96,0
ДП "Ніжинський лісгосп"	97879,4	87286,3	39904,9	40,8	45,7
ДП "Корюківський лісгосп"	79214,0	70792,0	60647,2	76,6	85,7
ДП "Новгород-Сіверський лісгосп"	62303,4	57314,5	45,0	0,1	0,1
ДП "Чернігівський лісгосп"	102197,0	92065,0	82477,4	80,7	89,6
Разом	417972,5	376719,2	249570,8	59,7	66,2

Польові обстеження на Луганщині, зокрема в Новоайдарському ЛМГ, зафіксували масове природне поновлення сосни, осики та берези у 2021 році на ділянках, що зазнали слабкого та середнього пошкодження від пожеж. Відновлення спостерігалось навіть на згарищах із повною загибеллю материнського лісу, якщо поблизу були джерела насіння. Наприклад, на відносно багатих ґрунтах (Охтирське лісництво) та на бідних пісках (Станично-Луганське ЛМГ) відзначено численні сходи сосни (рис. 3.2).

Таблиця 3.2 – Площі ділянок лісового фонду держлісгоспів Чернігівщини, визначені як потенційно забруднені ВВП (га) за даними наземних обстежень Чернігівського ОУЛМГ

Лісгосподарське підприємство	Загальна площа підприємства	Вкрита лісовою рослинністю площа	Площа забруднена ВВП	% від загальної площі	% від площі, вкритої лісовою рослинністю
ДП "Городнянський лісгосп"	76378,7	69261,4	7843,4	10,3	11,3
ДП "Ніжинський лісгосп"	97879,4	87286,3	1760,1	1,8	2,0
ДП "Корюківський лісгосп"	79214,0	70792,0	765,0	1,0	1,1
ДП "Новгород-Сіверський лісгосп"	62303,4	57314,5	0,0	0,0	0,0
ДП "Чернігівський лісгосп"	102197,0	92065,0	7287,0	7,1	7,9
Разом	417972,5	376719,2	17655,5	4,2	4,7

Порівняння даних, отриманих з карти ДСНС та за підсумками наземних обстежень обласного управління лісового та мисливського господарства (ОУЛМГ), демонструє значну розбіжність: фактично виявлена площа забруднення ВВП виявилася в 14 разів меншою. Це пояснюється тим, що інтерактивна мапа ДСНС позначає максимальну потенційну зону ризику, враховуючи дані про бойові дії, переміщення військ та місця бомбардувань.

Відтак, пропонується двохетапний підхід до планування лісгосподарської діяльності:

Перший етап: Використовувати карту ДСНС для попереднього визначення

максимально можливих зон забруднення та запровадження початкових обмежень.

Другий етап: Проводити детальні наземні обстеження на цих територіях для точного визначення меж небезпечних ділянок. На основі уточненої інформації розробляти фінальні рекомендації щодо ведення лісового господарства..

Непрямі впливи є наслідком ширших соціально-економічних та екологічних змін, спричинених конфліктом. Військова діяльність, включаючи створення доріг, стежок та безперервне пересування транспортних засобів, призводить до поділу великих лісових масивів на менші, ізольовані ділянки. Ця фрагментація порушує природні екосистемні процеси, впливаючи на міграційні коридори диких тварин та підвищуючи вразливість до таких порушень, як пожежі та поширення інвазивних видів. Післяконфліктні умови, що характеризуються слабким управлінням, економічною нестабільністю та переміщенням населення, часто призводять до сплеску незаконних рубок та експлуатації ресурсів.

Повторювані військові порушення, які не мають природних екологічних аналогів, призводять до довгострокових змін у рослинних угрупованнях, включаючи зменшення чисельності місцевих багаторічних видів, збільшення присутності інтродукованих видів та широкомасштабне оголення або ущільнення ґрунту. Ці зміни знижують стійкість екосистем до майбутніх екологічних стресів. Парадоксально, але в деяких конкретних випадках активний конфлікт може ненавмисно захищати ліси, стримуючи комерційні рубки та іншу людську діяльність через притаманні небезпеки.

Взаємодія між прямими військовими діями та подальшими соціально-економічними наслідками, такими як переміщення населення та бідність, створює складний і самопідсилюючий цикл, який посилює деградацію лісів. Прямі конфліктно-індуковані пошкодження (наприклад, пожежі від обстрілів) часто призводять до умов (наприклад, брак ресурсів, переміщення), які змушують постраждале населення нестійко експлуатувати ліси (наприклад, незаконні рубки для палива), тим самим посилюючи руйнування навколишнього середовища та перешкоджаючи природному відновленню. Це означає, що вирішення проблеми пошкодження лісів у зонах конфлікту не може бути суто екологічним завданням.

Воно вимагає цілісного підходу, який інтегрує гуманітарну допомогу, економічну стабілізацію та реформи управління поряд з відновленням навколишнього середовища. Без вирішення основних соціально-економічних чинників, фізичні зусилля з відновлення можуть бути підірвані або виявитися нестійкими в довгостроковій перспективі. Таким чином, повсюдна деградація навколишнього середовища в лісах, постраждалих від конфліктів, є синергетичним результатом прямого військового руйнування та соціально-економічної вразливості, яку воно створює. Ця динаміка, коли бідність та переміщення, спричинені конфліктом, призводять до інтенсивної експлуатації ресурсів, вимагає комплексних післяконфліктних стратегій, які одночасно вирішують гуманітарні потреби, економічне відновлення та екологічне відновлення, щоб розірвати цикл деградації та сприяти сталому лісоуправлінню.

3.3 Військове забруднення та його екологічні наслідки

Військові конфлікти залишають після себе не лише фізичні руйнування, а й довготривале та часто невидиме забруднення, що має глибокі екологічні наслідки.

ВНП та міни становлять повсюдну та довготривалу небезпеку, ефективно створюючи "заборонені зони", які унеможливають доступ людини до величезних лісових територій для економічної діяльності, такої як сільське господарство, лісозаготівля або навіть збір нелісових продуктів. Окрім безпеки людини, їхня присутність безпосередньо загрожує дикій природі, яка може ненавмисно їх активувати. Крім того, детонація цих пристроїв, випадкова чи під час розмінування, руйнує структуру ґрунту, спричиняє локальне ущільнення та підвищує сприйнятливості ґрунту до ерозії. В Україні, за оцінками, понад 0,5 мільйона гектарів лісу потребують розмінування, що серйозно обмежує управління та використання. Тривала присутність ВНП часто призводить до багаторічних обмежень землекористування, роблячи великі ділянки землі непридатними або небезпечними. Це увічне економічні втрати, посилює продовольчу небезпеку та затримує післяконфліктне відновлення та розвиток.

Хімічні забруднювачі:

- Важкі метали з боєприпасів та військових відходів: Вибухові пристрої та військова діяльність, така як стрільбища, виділяють важкі метали (наприклад, свинець, сурма, барій, ртуть, збіднений уран) у навколишнє середовище. Ці метали накопичуються в ґрунтах і можуть вимиватися в ґрунтові води, створюючи значні ризики для здоров'я флори, фауни та людини. Деякі рослини, такі як гриби, можуть накопичувати ртуть із забруднених ґрунтів.
- Забруднювачі з пошкодженої інфраструктури та промислових об'єктів: Руїнування будівель, доріг та промислових об'єктів під час конфлікту генерує мільйони тонн уламків, часто забруднених небезпечними речовинами, такими як азбест та інші хімічні речовини. Пошкодження хімічних промислових об'єктів може призвести до викиду забруднюючих речовин у повітря, воду та ґрунт, створюючи негайні та довгострокові екологічні та громадські ризики для здоров'я.

Деградація ґрунту:

- Ущільнення: Багаторазове проходження важких військових транспортних засобів та обладнання спричиняє сильне ущільнення ґрунту, що зменшує пористість ґрунту, перешкоджає росту коренів та призводить до зменшення рослинного покриву та збільшення оголеного ґрунту. Міни також спричиняють локальне ущільнення ґрунту після детонації.
- Ерозія: Деградація ґрунту, зокрема ерозія, є прямим наслідком військової діяльності, що посилюється втратою захисного рослинного покриву та фізичним порушенням поверхні ґрунту. Оголений ґрунт, поширений результат військових порушень, є основним чинником ерозії.
- Хімічні зміни: Введення залишків вибухових речовин, важких металів та інших токсичних хімічних речовин з боєприпасів та промислових пошкоджень докорінно змінює хімічний склад ґрунту. Ці хімічні зміни можуть зробити ґрунти безплідними, перешкоджати росту рослин та порушувати критично важливі мікробні спільноти, необхідні для здоров'я екосистеми.
- Втрата родючості: Комбіновані наслідки фізичних пошкоджень (ущільнення,

руйнування), хімічного забруднення та ерозії призводять до значної втрати родючості ґрунту та його здатності підтримувати життя та людську діяльність.

Втрата біорізноманіття:

- Руйнування середовищ існування та витіснення видів: Війна безпосередньо руйнує та фрагментує природні середовища існування, що призводить до швидкого скорочення популяцій диких тварин, а в серйозних випадках – до вимирання видів.
- Порушення екосистем: Військові дії посилюють екологічний стрес через широкомасштабне вирубування лісів, забруднення та ненавмисне впровадження інвазивних видів. Втрата ключових видів може дестабілізувати цілі екологічні спільноти, спричиняючи ланцюгові наслідки в усій харчовій мережі. Полювання та браконьєрство, спричинені війною, ще більше посилюють ризик вимирання вразливих видів.



Рисунок 3.2 – Природне поновлення сосни після пожеж різної інтенсивності (слабкої – ліворуч, сильної – праворуч) на прикладі Луганської області, 2020 р.

Полеві дослідження, проведені у 2021 році на території Новоайдарського лісомисливського господарства, засвідчили активне природне відновлення лісів після пожеж. У насадженнях зі слабким та середнім ступенем пошкодження спостерігалось масове поновлення сосни, осики та берези. Відновлення лісу було зафіксовано навіть на ділянках повної загибелі деревостанів, за умови їхнього близького розташування

до джерел насіння. На більш родючих і вологих ґрунтах, як-от у північній частині Піщаного лісництва та на Шамраєвій дачі, відзначено масову появу сходів сосни у дубових колках, навіть там, де материнський полог значно постраждав. Аналогічно, інтенсивне природне відновлення сосни відбулося на бідних піщаних ґрунтах Станично-Луганського ЛМГ.

Водночас, за даними спостережень, головною загрозою для молодих сіянців є посухи у вегетаційний період. Через спекотну погоду в червні-вересні на пересушених ґрунтах загинула більшість сходів 2021 року. Наприклад, у Борівському лісництві за серпень вислохло до 60–70% молодого підросту, а вцілілі рослини збереглися переважно в мікропониженнях рельєфу.

У ширшому контексті, після масштабних пожеж 2014–2020 років, спричинених бойовими діями в Луганській області, спостерігається тенденція до збільшення площ мішаних лісів на місці колишніх чистих сосняків. Для лісів Луганщини, як і для Полісся та Лісостепу України, характерне чергування окремих масивів соснових та листяних насаджень. Часто сухі соснові бори межують з листяними колками в пониженнях без перехідних зон. При цьому на продуктивніших ґрунтах соснові ліси дедалі частіше розвиваються зі значною домішкою широколистяних порід.



Рисунок 3.3 – Приклад загибелі природного поновлення сосни через посуху в серпні 2021 р. (Борівське лісництво, Луганська обл.).

Полеві дослідження, проведені у 2021 році на території Новоайдарського лісомисливського господарства, засвідчили активне природне відновлення лісів після пожеж. У насадженнях зі слабким та середнім ступенем пошкодження спостерігалось масове поновлення сосни, осики та берези. Відновлення лісу було зафіксовано навіть на ділянках повної загибелі деревостанів, за умови їхнього близького розташування до джерел насіння. На більш родючих і вологих ґрунтах, як-от у північній частині Піщаного лісництва та на Шамраєвій дачі, відзначено масову появу сходів сосни у дубових колках, навіть там, де материнський полог значно постраждав. Аналогічно, інтенсивне природне відновлення сосни відбулося на бідних піщаних ґрунтах Станично-Луганського ЛМГ.

Водночас, за даними спостережень, головною загрозою для молодих сіянців є посухи у вегетаційний період. Через спекотну погоду в червні-вересні на пересушених ґрунтах загинула більшість сходів 2021 року. Наприклад, у Борівському лісництві за серпень вислохло до 60–70% молодого підросту, а вцілілі рослини збереглися переважно в мікропониженнях рельєфу.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Приклади природного поновлення: а) дуба як основи для майбутнього сосново-дубового лісу; б) листяних порід (осика, вільха, береза) у межах листяного масиву, що пережив пожежу 2020 р..

У ширшому контексті, після масштабних пожеж 2014–2020 років, спричинених бойовими діями в Луганській області, спостерігається тенденція до збільшення площ мішаних лісів на місці колишніх чистих сосняків. Для лісів Луганщини, як і для Полісся та Лісостепу України, характерне чергування окремих масивів соснових та листяних насаджень. Часто сухі соснові бори межують з листяними колками в пониженнях без перехідних зон. При цьому на продуктивніших ґрунтах соснові ліси дедалі частіше розвиваються зі значною домішкою широколистяних порід.

Дослідження показали, що більшість листяних дерев успішно пережили пожежі, зберігши середню або високу життєздатність, оскільки в листяних лісах інтенсивність горіння була нижчою. Вже в червні 2021 року на багатьох деревах, пошкоджених вогнем, почали активно утворюватися епікормічні пагони (нові гілки зі стовбура). Крім того, під загиблими деревами спостерігалось масове відновлення як з насіння, так і вегетативним шляхом. На окремих вологих ділянках (наприклад, Шамраєва дача) поновлення листяних порід відбулося навіть під пологом вигорілих соснових насаджень. Натомість самосів берези, що з'явився в сухих сосняках від сусідніх листяних масивів, переважно загинув через посуху (як у Борівському лісництві). Таким чином, можна зробити висновок, що листяні ділянки лісу після пожеж на територіях, забруднених вибухонебезпечними предметами (ВНП), функціонують як осередки життя, здатні забезпечити подальше природне відновлення всієї пошкодженої території стійкими породами.

Для прогнозування відновлення лісів на територіях з ВНП варто враховувати досвід Станично-Луганського ДЛМГ. З 2014 року це господарство перебувало в зоні активних бойових дій, що унеможливило ведення лісогосподарських робіт. Унаслідок пожеж, спричинених бойовими діями, вогнем було пройдено 10 240 га лісів. Санітарні рубки на цих згарищах розпочали лише у 2016 році, після виведення військ, і тільки на безпечних, розмінованих ділянках. Польові обстеження 2021 року показали, що за цей час на більшості постраждалих територій відбулося масове природне поновлення, переважно сосни, в різних типах лісорослинних умов.



Рисунок 3.5 – Надійне природне поновлення сосни на згарищах у Станично-Луганському ДЛМГ.

Досвід Станично-Луганського лісомисливського господарства, яке з 2014 року перебувало в зоні бойових дій, є ключовим для прогнозування відновлення лісів у подібних умовах. Незважаючи на те, що міркування безпеки унеможливили проведення санітарних рубок та інших лісгосподарських заходів, природні процеси не зупинилися. Обстеження, проведені у 2021 році, підтвердили масове та надійне природне поновлення сосни на згарищах 2014–2016 років. Цей приклад демонструє високий потенціал екосистем до самовідновлення навіть за повної відсутності людського втручання, в той час як пошкоджений деревостан поступово відмирає.

Довготривала стійкість та повсюдний характер військового забруднення, зокрема нерозірваних боєприпасів (ВНП) та стійких хімічних агентів, таких як діоксини, створюють "заборонені зони", які не тільки перешкоджають доступу людини та економічному відновленню, а й створюють екологічні пастки або сильно деградовані середовища існування, тим самим принципово перешкоджаючи природній регенерації та зусиллям зі збереження протягом десятиліть або навіть століть. Це означає, що відновлення навколишнього середовища в цих районах не є короткостроковим проектом, а багатопокілінним зобов'язанням, що вимагає постійних міжнародних зусиль та розробки спеціалізованих, безпечних технологій. Таким чином, тривалий і повсюдний характер військового забруднення, особливо

ВНП і стійких хімічних забруднювачів, перетворює постраждалі лісові території на хронічні екологічні та соціально-економічні зони відповідальності. Ці "заборонені зони" не тільки перешкоджають доступу людини та економічному відродженню протягом десятиліть, а й створюють сильно скомпрометовані середовища існування, які перешкоджають природній регенерації, вимагаючи багатопоколінних зобов'язань, стабільних міжнародних інвестицій та безперервного вдосконалення дистанційних та автономних технологій ремедіації для ефективного та безпечного відновлення.

3.4 Передові технології оцінки та моніторингу

Оцінка та моніторинг стану лісів у зонах конфлікту є надзвичайно складним завданням через небезпеку та обмежений доступ. Однак розвиток передових технологій дистанційного зондування та аналізу даних значно покращив можливості для всебічної оцінки.

Дистанційне зондування є незамінним інструментом для оцінки територіальних впливів військових конфліктів на лісові екосистеми, особливо в районах, де наземна оцінка небезпечна або неможлива через бойові дії або міни.

- Супутникові знімки (Sentinel-2, Landsat, MODIS, VHR) для великомасштабної оцінки пошкоджень: Супутники, такі як Sentinel-2, Landsat та MODIS, надають критично важливі дані про стан рослинності, пожежну активність та вирубку лісів на великих територіях. Sentinel-2, з його просторовою роздільною здатністю 10 м та періодом повторного відвідування 2-5 днів, є особливо цінним для картографування вигорілих ділянок, визначення зон повної втрати рослинності та моніторингу довгострокового відновлення. Оптичні супутникові дані дуже високої роздільної здатності (VHR) (піксель менше 1 м) у поєднанні з передовими згортковими нейронними мережами (CNN) можуть навіть виявляти невеликі прогалини в кронах та детальні пошкоджені ділянки.
- БПЛА/дрони для високоточного, локалізованого моніторингу: Безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони, оснащені мультиспектральними датчиками, оптичними та тепловізійними камерами високої роздільної здатності, а також

георадарами (GPR), пропонують універсальні можливості для детального, локалізованого моніторингу. Вони можуть забезпечувати міліметрову точність та безпечний доступ до небезпечних або важкодоступних районів, зменшуючи ризик для людського персоналу. БПЛА є особливо важливими для виявлення мін та ВНП, особливо при інтеграції з легкими магнітометрами та методами скринінгу на основі штучного інтелекту.

- LiDAR для 3D-структури лісу та проникнення крізь ґрунт: Системи Light Detection and Ranging (LiDAR) використовують лазерні імпульси для створення високодеталізованих 3D-хмар точок, забезпечуючи точні вимірювання рельєфу, висоти дерев, відстані між ними та щільності. Ключовою перевагою LiDAR у зонах конфлікту є його здатність проникати крізь густі лісові крони для збору даних про лісову підстилку, ідентифікації природних об'єктів, таких як схеми водного потоку, та виявлення прихованих небезпек, таких як міни та ВНП.
- Радар та тепловізійне зображення для специфічних потреб виявлення: Радарні датчики, зокрема радар із синтезованою апертурою (SAR), можуть вимірювати дерева, листя та висоту поверхні, пропонуючи значну перевагу над оптичними даними, проникаючи крізь хмарний покрив, який часто закриває багато лісових територій. Тепловізійні камери, встановлені на дистанційно керованих авіаційних системах (RPAS), можуть виявляти міни та ВНП, особливо пластикові міни, шляхом ідентифікації тонких термічних контрастів з навколишнім ґрунтом.

Аналіз даних та алгоритми:

- Індекси рослинності (NDVI, LAI) для зміни стану здоров'я та покриву: Нормалізований диференційний індекс рослинності (NDVI) та індекс листової поверхні (LAI) є основними показниками, що використовуються для оцінки щільності, стану здоров'я та покриву рослинності. Зміни значень LAI, наприклад, можуть кількісно відображати деградацію лісів. Стандартизований Z-NDVI може ефективніше виявляти фактичні зміни та аномалії рослинності шляхом нормалізації за багаторічними середніми значеннями.
- Алгоритми виявлення змін (LandTrendr, CCDC, CNN, Random Forest): Оцінка військового впливу часто ґрунтується на виявленні змін у землекористуванні та

земному покриві (LULC), що є домінуючим методологічним підходом. Такі алгоритми, як LandTrendr та Continuous Change Detection and Classification (CCDC), використовуються для відстеження змін у траєкторіях відбиття з часом.⁴⁰

Передові методи машинного навчання, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN) та класифікатори Random Forest (RF), все частіше використовуються для точного виявлення лісових порушень та оцінки ризиків, особливо з VHR-зображеннями. Моделі глибокого навчання можуть автоматизувати ідентифікацію, класифікацію та кількісну оцінку пошкоджень.

- ГІС для просторового аналізу та картографування: Географічні інформаційні системи (ГІС), у поєднанні з даними дистанційного зондування, є важливими для комплексного просторового аналізу та картографування. Вони використовуються для вимірювання фрагментації лісів, оцінки зв'язності ландшафту, ідентифікації критично важливих середовищ існування та пріоритезації природоохоронних заходів на основі просторових закономірностей.²² ГІС також дозволяє проводити складний просторовий аналіз та ефективно управління великими наборами даних у лісовому господарстві.
- Машинне навчання та глибоке навчання для автоматизованого виявлення та класифікації пошкоджень: Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та глибокого навчання революціонізувала виявлення пошкоджень, пропонуючи значно швидші та точніші оцінки. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) аналізують супутникові знімки високої роздільної здатності для виявлення структурних аномалій та класифікації рівнів пошкоджень. Моделі машинного навчання, іноді адаптовані з наборів даних про стихійні лиха, застосовуються для оцінки руйнувань, пов'язаних з війною.

Виклики та обмеження дистанційного зондування в зонах конфлікту:

- Хмарний покрив та дефіцит/якість зображень: Оптичні дані дистанційного зондування часто обмежені хмарним покривом, особливо у вологих або гірських регіонах, що перешкоджає послідовному моніторингу. Крім того, супутникові знімки високої роздільної здатності активних зон конфлікту можуть бути засекреченими, недоступними або мати низьку якість через атмосферні умови.

- Труднощі наземної перевірки: Значним викликом є неможливість або надзвичайна небезпека проведення наземних досліджень через міни та триваючі бойові дії. Це обмеження змушує покладатися на дистанційне зондування, але також обмежує можливість перевірки результатів за допомогою безпосередніх наземних даних, що потенційно впливає на точність та достовірність оцінок.
- Оклюзія рослинністю для виявлення ВВП: Хоча дистанційне зондування для виявлення ВВП є передовим, воно стикається з обмеженнями, оскільки висока щільність рослинності та листяний покрив можуть візуально приховувати наземні міни та нерозірвані боєприпаси, впливаючи на точність виявлення.
- Вартість та управління даними: Збір та обробка даних дистанційного зондування високої роздільної здатності може бути дорогим. Крім того, дистанційне зондування генерує величезні обсяги даних, що вимагає значного часу та ресурсів для ефективного управління, контролю якості та експертної інтерпретації.
- Невизначеність та обмеження в прогнозах: Прогнози дистанційного зондування, хоч і потужні, можуть містити внутрішню невизначеність, включаючи систематичні помилки, які можуть призвести до переоцінки або недооцінки певних лісових умов.
- Відсутність різноманітних навчальних даних: Ключовою проблемою для виявлення пошкоджень на основі штучного інтелекту є обмежена доступність широкомасштабних, загальнодоступних наборів даних про військові пошкодження, на відміну від наборів даних про стихійні лиха. Військові пошкодження часто демонструють відмінні структурні характеристики, що вимагає спеціалізованих навчальних даних для забезпечення точності та узагальнюваності моделі.

Попри те, що дистанційне зондування пропонує безпрецедентні можливості для моніторингу лісів, постраждалих від конфліктів, його повний потенціал значно обмежений притаманними обмеженнями в зонах конфлікту, зокрема повсюдною відсутністю даних наземної перевірки через небезпеку та дефіцитом спеціалізованих, специфічних для війни наборів даних для навчання моделей штучного інтелекту. Це створює критичний розрив у валідації, що потенційно впливає на точність та

надійність оцінок пошкоджень, і підкреслює нагальну потребу в інноваційних, безпечних протоколах наземної перевірки та спільних зусиллях для розробки надійних, специфічних для війни навчальних даних штучного інтелекту. Це означає, що, хоча технологія є життєво важливою саме тому, що доступ до землі заборонений, її точність і повна корисність компрометуються саме цією відмовою в доступі до землі. Моделі штучного інтелекту, які відіграють дедалі важливішу роль в автоматизованому аналізі, не можуть повністю розкрити свій потенціал без різноманітних і репрезентативних навчальних даних, які важко отримати в умовах конфлікту. Наслідком є те, що, хоча ми можемо виявляти зміни, точне кількісне визначення та класифікація конкретних типів і тяжкості військових пошкоджень лісів з високою впевненістю стає складним завданням. Ця невизначеність може вплинути на достовірність звітів про збитки, вплинути на розподіл ресурсів для відновлення та перешкодити зусиллям щодо правової відповідальності. Це вказує на нагальну потребу в розробці інноваційних, безпечних методів збору наземних даних (наприклад, високоспеціалізованих роботизованих систем, передових безпілотних літальних апаратів з тривалим терміном служби та новими датчиками) та сприянні міжнародним ініціативам обміну даними для територій, постраждалих від війни. Таким чином, незамінна залежність від дистанційного зондування в лісах, постраждалих від конфліктів, критично обмежена притаманними небезпеками, які перешкоджають всебічній наземній перевірці, та пов'язаним з цим дефіцитом спеціалізованих наборів даних про військові пошкодження для навчання штучного інтелекту. Цей фундаментальний розрив у валідації обмежує точність та надійність оцінок, підкреслюючи нагальну потребу в інноваційних, безпечних методологіях наземної перевірки та спільних міжнародних ініціативах з даних для підвищення точності характеристики пошкоджень та інформування про ефективні післяконфліктні заходи.

3.5 Стратегії лісоуправління та реабілітації на забруднених територіях

Управління та відновлення лісів на територіях, забруднених військовими діями,

вимагає багатогранного та інтегрованого підходу, що поєднує розмінування, ремедіацію забруднень та відновлення лісів.

Операції з розмінування значно еволюціонували, застосовуючи комбінацію ручних, механічних, за допомогою тварин та технологічних методів.

Ручне розмінування використовує металодетектори та щупи для точного, хоча й повільного, очищення. Спеціально навчені тварини, такі як собаки та щури, можуть безпечно виявляти вибухові речовини на великих територіях. Механічне розмінування використовує міцні, дистанційно керовані машини, оснащені фрезами та ланцюговими тралами для нейтралізації мін, що підходить для великих територій та складних умов. Технологічні методи включають георадари (GPR), дрони з камерами високої роздільної здатності та магнітометрами, а також робототехніку для дистанційного виявлення та очищення, що підвищує безпеку та ефективність.

Протоколи безпеки та оцінка ризиків: Через надзвичайну небезпеку операції з розмінування вимагають суворого дотримання міжнародних та національних стандартів безпеки. Комплексні оцінки ризиків є вирішальними, оцінюючи потенційну присутність ВНП, історичне використання ділянки та ймовірність виявлення або детонації боєприпасів. Навчання з безпеки ВНП для всього персоналу, залученого до лісової діяльності в постраждалих районах, є обов'язковим.

Ремедіація забруднень:

– Фіторемедіація: Ця "зелена" та екологічно чиста технологія використовує рослини для видалення, деградації або стабілізації забруднюючих речовин, таких як токсичні метали, з ґрунту або ґрунтових вод. Швидкозростаючі види, такі як тополі та верби, часто віддають перевагу через їхні розгалужені кореневі системи. Деякі рослини є "гіперакумуляторами", здатними концентрувати значні кількості металів у своїх тканинах. Деякі модифіковані рослини можуть навіть метаболізувати та розщеплювати вибухові речовини, такі як тротил та RDX, на нешкідливі компоненти. Фіторемедіація, як правило, повільна та менш ефективна для сильно забруднених ґрунтів, потенційно вимагаючи сотень років для повного видалення. Її ефективність обмежена глибиною коренів рослин, умовами ґрунту та рівнями забруднюючих речовин.

– Біоремедіація: Цей підхід використовує біологічні агенти, переважно мікроби (бактерії, гриби), а іноді й рослини, для видалення або зменшення впливу забруднюючих речовин на навколишнє середовище. Механізми включають ферментативне окислення/відновлення, біовилуговування (розчинення металів), біосорбцію (адсорбція на поверхнях клітин), комплексоутворення та біоаккумуляцію. Вона вважається економічно ефективною та екологічно чистою альтернативою фізичним/хімічним методам. Компостування, біологічний метод, продемонструвало понад 99% видалення вибухових речовин, таких як тротил та RDX, у великомасштабних проектах ремедіації ґрунту. Вимагає сприятливих умов навколишнього середовища (наприклад, вологість, температура, кисень) для мікробної активності. Може бути повільною, а її ефективність може бути знижена низькою біодоступністю забруднюючих речовин.

– Інші фізичні/хімічні методи: Ці традиційні методи включають промивання ґрунту, електрокінетичну ремедіацію та додавання хімічних речовин (наприклад, глинистих мінералів, біовугілля, солей алюмінію) для стабілізації або видалення важких металів. Хоча іноді вони ефективні для швидкої деградації або високих концентрацій, вони часто мають недоліки, такі як висока вартість, енергоємність або утворення вторинних токсичних відходів.

Відновлення лісів та лісовідновлення:

- Методи підготовки ділянок для деградованих ґрунтів: Підготовка ділянок для посадки є життєво важливою для виживання дерев, вирішуючи такі проблеми, як ущільнені ґрунти, конкуренція з іншою рослинністю, доступність поживних речовин та рівень вологості. Це може включати створення насипів, зняття дерну, розпушування або перемішування ґрунту.
- Пріоритезація місцевих видів та природного відновлення: Зусилля з лісовідновлення повинні надавати пріоритет місцевим, стійким до клімату видам для відновлення біорізноманіття та покращення здоров'я екосистем. Де це можливо, допоміжне природне відновлення або дозвіл на природне відновлення на занедбаних землях можуть бути економічно ефективними. Управління лісами, наближене до природи, наголошує на сприянні змішаним насадженням та

природному відновленню.

- Адаптивні підходи до управління для довгострокового відновлення: Відновлення лісів є довгостроковою інвестицією. Адаптивне управління — це структурований, циклічний процес, де зворотний зв'язок від моніторингу використовується для перевірки припущень, відстеження відповідних умов та вимірювання ефективності управління. Цей підхід заохочує безперервне навчання та дозволяє коригувати стратегії у відповідь на динамічні екологічні, соціальні та економічні умови.

Цілісне та стійке відновлення вимагає поєднання розмінування, ремедіації забруднень та відновлення лісів. Наприклад, пілотний проект в Україні інтегрує розмінування з відновленням лісосмуг, включаючи відбір проб ґрунту та посадку стійких місцевих видів. Післявоєнне відновлення повинно включати кілька синергетичних шляхів, таких як збільшення використання лісів для сталого низьковуглецевого відновлення (наприклад, деревина для реконструкції, біоенергетика) поряд з лісовим господарством, наближеним до природи, з технологічними інноваціями. Ці шляхи повинні бути інтегровані для побудови стійкості та уникнення довгострокових вразливостей.

Притаманні небезпеки та складнощі військового забруднення (наприклад, поховані ВМП, стійкі хімічні забруднювачі) вимагають фундаментального переходу від традиційних, локалізованих практик лісоуправління до високоспеціалізованого, інтегрованого та адаптивного підходу, який надає пріоритет безпеці та довгостроковій екологічній стійкості, а не негайним економічним вигодам. Це означає значні початкові та постійні інвестиції в передові технології, спеціалізований досвід та переоцінку пріоритетів післяконфліктного землекористування для забезпечення сталого та безпечного відновлення. Присутність ВМП та хімічних забруднювачів принципово змінює доцільність та безпеку традиційного лісоуправління. Це означає, що персонал не може безпечно отримати доступ до територій, а традиційні методи посадки або збору врожаю можуть виявитися неефективними в токсичних або фізично порушених ґрунтах. Багаторічна стійкість забруднення означає, що швидкі, ізольовані втручання є недостатніми. Ця ситуація

вимагає нової "адаптованої до конфлікту" моделі лісового господарства. Безпека стає першочерговим завданням, вимагаючи широкого використання дистанційних технологій (БПЛА, LiDAR для виявлення ВВП) до будь-яких наземних робіт. Зусилля з ремедіації повинні бути систематично інтегровані до або одночасно з лісовідновленням. Економічна експлуатація цих лісів повинна бути ретельно збалансована з імперативом екологічного відновлення та безпеки людини, потенційно включаючи довгострокові обмеження або спеціалізовані, низькоінтенсивні види діяльності. Це вимагає надійної, адаптивної системи управління, яка може реагувати на мінливі умови та нове наукове розуміння поведінки забруднюючих речовин та екологічних реакцій. Таким чином, унікальні та стійкі небезпеки, спричинені військовим забрудненням, принципово перетворюють лісоуправління на постраждалих територіях з традиційної ресурсної діяльності на складне, безпечне та екологічно орієнтоване завдання. Це вимагає спеціалізованої, інтегрованої та адаптивної парадигми управління, яка надає пріоритет розмінуванню та цільовій біоремедіації, використовує передові дистанційні технології та перекалібровує економічні цілі з довгостроковою екологічною стійкістю та безпекою людини, вимагаючи значних, стабільних інвестицій та зміни в операційній філософії.

3.6 Виклики та ризики для лісового персоналу

Робота в лісах, що постраждали від військових дій, пов'язана з унікальними та значними ризиками для персоналу, який займається лісоуправлінням, розмінуванням та відновленням.

Прямі небезпеки від ВВП та мін: Лісовий персонал, включаючи саперів та тих, хто займається лісоуправлінням, стикається з серйозним ризиком поранення або загибелі від нерозірваних боєприпасів (ВВП) та мін. Ці небезпеки особливо сконцентровані в районах поблизу колишніх ліній фронту, військових баз або відомих мінних полів. Присутність цих пристроїв робить повсякденну лісову діяльність, таку як заготівля деревини, лісовідновлення або навіть збір нелісових продуктів, надзвичайно небезпечною.

Вплив хімічних забруднювачів та забруднювачів повітря: Працівники в забруднених лісах ризикують піддатися впливу ряду токсичних речовин. Це включає важкі метали та залишки вибухових речовин, що виділяються з корозійних ВВП, стійкі хімічні бойові речовини, такі як діоксини, які залишаються токсичними в ґрунті протягом десятиліть, а також забруднювачі повітря від військових пожеж (дим, хімічні речовини, дизельні вихлопи, попіл). Такі впливи пов'язані з підвищеним ризиком різних видів раку, респіраторних проблем та інших довгострокових проблем зі здоров'ям.

Фізичні небезпеки та обмеження доступу в небезпечних районах: Робота в лісах, постраждалих від конфліктів, часто передбачає роботу в суворих умовах навколишнього середовища, на непередбачуваній місцевості та в районах з обмеженим або відсутнім безпечним доступом через триваючі бойові дії або залишкову небезпеку. Це серйозно обмежує наземні дослідження та ручну працю, змушуючи покладатися на дистанційні методи та підвищуючи фізичні навантаження та ризики для тих, хто працює на землі.

Наслідки для здоров'я та протоколи безпеки: Професійний рак є основною причиною смерті під час виконання службових обов'язків серед пожежних служб, і подібні ризики стосуються лісових працівників, які піддаються впливу канцерогенів у зонах конфлікту. Для зменшення цих ризиків необхідні суворі протоколи безпеки, включаючи обов'язкове використання засобів індивідуального захисту, безперервне навчання з безпеки (наприклад, перша допомога, розпізнавання ВВП) та дистанційний моніторинг. Рекомендації також включають зменшення часу впливу, ротацію бригад з зон сильного задимлення та впровадження особистих практик деконтамінації, таких як миття шкіри та одягу.

Повсюдний і часто невидимий характер військового забруднення (наприклад, поховані ВВП, стійкі хімічні речовини в ґрунті) перетворює звичайну лісову роботу на діяльність з високим ризиком, що вимагає спеціалізованих, безперервних протоколів безпеки та довгострокового моніторингу стану здоров'я, які виходять за межі стандартних заходів промислової безпеки. Це означає значний і постійний фінансовий та логістичний тягар для постраждалих країн та міжнародних організацій

допомоги, а також моральний імператив захищати тих, хто виконує цю небезпечну та критично важливу роботу. На відміну від природних небезпек, які можуть бути видимими (наприклад, повалене дерево) або тимчасовими (наприклад, короткочасна пожежа), військове забруднення часто є прихованим (закопані міни, невидимі хімічні залишки) і зберігається протягом десятиліть або навіть століть. Це означає, що ризик існує не лише під час гострої події, а є постійною, довгостроковою загрозою. Стандартні протоколи безпеки в лісовому господарстві, розроблені для звичайних небезпек, є за своєю суттю недостатніми для цих нових і стійких ризиків. Це вимагає фундаментальної переоцінки охорони праці та безпеки в лісовому господарстві, постраждалому від конфліктів. Це вимагає значних і постійних інвестицій у передові засоби індивідуального захисту, технології дистанційного зондування для виявлення небезпек, безперервне та спеціалізоване навчання (наприклад, для ідентифікації ВВП, реагування на хімічні впливи) та надійні, довгострокові програми медичного спостереження за працівниками. Це створює значний і постійний фінансовий та логістичний тягар для національних урядів та міжнародних організацій, підкреслюючи моральний імператив захищати тих, хто виконує цю небезпечну, але необхідну роботу. Таким чином, тривалий і часто невидимий характер військового забруднення принципово перетворює лісову роботу в постраждалих зонах на високоризиковану професію, що вимагає зміни парадигми в бік всебічних, безперервних протоколів безпеки, передового особистого захисту та довгострокового моніторингу стану здоров'я персоналу. Це відображає значну та постійну фінансову та етичну відповідальність для всіх зацікавлених сторін, вимагаючи виділених ресурсів та спеціалізованих програм навчання, які виходять далеко за межі звичайних стандартів промислової безпеки.

3.7 Екологічна політика ефективного лісоуправління на територіях, забруднених військовими діями

Ефективне лісоуправління на територіях, забруднених військовими діями, вимагає міцних національних рамок, міжнародних рекомендацій та скоординованих

зусиль. Національні уряди в постраждалих від конфліктів регіонах дедалі більше визнають необхідність надійних стратегій лісоуправління. Україна, наприклад, проводить лісову реформу для підвищення ефективності, боротьби з незаконними рубками та сталого розвитку свого ринку деревини. Національна лісова політика повинна чітко інтегрувати принципи сталого землекористування та збереження для керівництва післяконфліктним відновленням.

Такі країни, як США, створили програми екологічного відновлення (наприклад, Програма очищення армії) для боротьби з небезпечними речовинами та військовими боєприпасами з метою повернення забруднених земель у придатний стан. Національні рекомендації щодо післяпожежного відновлення наголошують на науково обґрунтованих підходах, великомасштабних оцінках ландшафту та принципах адаптивного управління для забезпечення ефективного відновлення.

Географічні інформаційні системи (ГІС) відіграють ключову роль у національному плануванні землекористування для лісового господарства, забезпечуючи комплексний облік, картографування та моніторинг змін у лісових ресурсах та забруднених територіях.

Міжнародні рекомендації та ініціативи:

- Програма Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища (ЮНЕП) уповноважена надавати допомогу країнам у пом'якшенні та контролі забруднення в районах, постраждалих від конфліктів. ЮНЕП проводить попередні огляди, детальні післякризові екологічні оцінки та активно сприяє екологічній співпраці як інструменту миробудівництва. Ключовим напрямком є інтеграція захисту навколишнього середовища в міжнародне гуманітарне право та відстоювання відповідальності за екологічні злочини.
- Рекомендації ФАО щодо післяконфліктної реабілітації лісів: Продовольча та сільськогосподарська організація (ФАО) підтримує стале лісоуправління, доступ до засобів до існування та нарощування потенціалу в нестабільних та постраждалих від конфліктів умовах. Їхні рекомендації щодо відновлення лісів включають важливі кроки, такі як картографування землекористування, вибір відповідних методів відновлення та планування фінансових потреб. ФАО також

сприяє стратегіям "Безпечного доступу до дров та енергії (SAFE)" для переміщених осіб, щоб зменшити тиск на ліси.

- Міжнародні стандарти протимінної діяльності (IMAS) для безпечного розмінування: Міжнародні стандарти протимінної діяльності (IMAS) надають глобально визнану основу для безпечної, ефективною та дієвої протимінної діяльності, що охоплює звільнення земель, навчання з ризиків та допомогу постраждалим. Останні оновлення IMAS включають нові рекомендації щодо управління навколишнім середовищем та врахування зміни клімату в операціях з розмінування.
- Зусилля НАТО та ОБСЄ щодо захисту навколишнього середовища: НАТО вирішує питання екологічної безпеки, включаючи ризики, пов'язані зі зміною клімату, та підтримує спільні заходи з розмінування та управління запасами боєприпасів через спеціальні трастові фонди. Організація з безпеки та співробітництва в Європі (ОБСЄ) через свою Ініціативу "Навколишнє середовище та безпека" (ENVSEC) сприяє екологічній співпраці для вирішення ризиків безпеки, включаючи ті, що пов'язані з небезпечними речовинами та практиками в післяконфліктних регіонах.

Значні та стабільні міжнародні інвестиції є критично необхідними для широкомасштабних операцій з розмінування та комплексних зусиль з відновлення лісів. Міжнародна підтримка підкреслюється як вирішальна для прискорення цих процесів.

Ефективне післяконфліктне відновлення вимагає партисипативних процесів планування за участю постраждалих громад, національних урядів на всіх рівнях, неурядових організацій та інших відповідних зацікавлених сторін. Розширення прав і можливостей місцевих громад та децентралізація відповідальності за лісоуправління є ключовими для забезпечення успішних та сталих результатів.

Удосконалення лісової політики, підвищення прозорості в управлінні ресурсами та забезпечення дотримання сталих практик є вирішальними для запобігання надмірній експлуатації та сприяння відповідальному управлінню. Впровадження цифрових систем відстеження та сертифікації деревини може значно

боротися з незаконними рубками та підвищити підзвітність.

Попри існування фундаментального міжнародного політичного ландшафту та національних програм з охорони та відновлення навколишнього середовища в умовах конфлікту, величезні масштаби та тривалий характер військового забруднення, особливо в активних або нещодавно активних зонах конфлікту, таких як Україна, виявляють значні прогалини у фінансуванні, законодавчій інтеграції та операційній спроможності. Це підкреслює нагальну потребу в більш гнучких, адаптивних та добре забезпечених ресурсами механізмах міжнародної співпраці, які можуть проактивно синхронізувати зусилля з розмінування та відновлення та перетворити рекомендації на дієві, широкомасштабні програми відновлення. Хоча існують рамкові документи, їхнє впровадження в необхідних масштабах та темпах у динамічних конфліктних середовищах часто є недостатнім. Це вказує на необхідність більш проактивного та інтегрованого розроблення політики, потенційно нових та гнучких механізмів фінансування (наприклад, зв'язування відновлення навколишнього середовища з кліматичним фінансуванням) та більшого акценту на швидких, адаптованих відповідях, які можуть розвиватися разом з динамікою конфлікту та перетворювати рекомендації високого рівня на ефективні дії на місцях. Таким чином, хоча існує надійна міжнародна та національна політична база для захисту навколишнього середовища в умовах конфлікту, безпрецедентні масштаби та постійний характер забруднення в поточних або нещодавніх конфліктах, прикладом чого є Україна, виявляють критичні недоліки у фінансуванні, законодавчій інтеграції та операційній гнучкості. Це вимагає більш надійної, адаптивної та добре забезпеченої ресурсами міжнародної співпраці, яка може проактивно синхронізувати зусилля з розмінування та відновлення та перетворити встановлені рекомендації на дієві, широкомасштабні програми відновлення, долаючи розрив між політичними намірами та впливом на місцях.

Триваюча російсько-українська війна спричинила значні пошкодження лісів, причому понад 60 000 гектарів лісу було знищено на окупованих територіях. Зокрема, у Харківській області приблизно 40-45% лісових територій постраждали від лісових пожеж, спричинених військовими діями, причому кількість пожеж зросла у 7,6 рази з

лютого 2022 року по червень 2024 року. Дистанційне зондування відіграло вирішальну роль в оцінці цих пошкоджень, наприклад, у Куп'янському лісовому господарстві, де супутникові дані показали зменшення площі лісів у 1,7 рази та зниження індексу листової поверхні (LAI) у 1,92 рази порівняно з 2021 роком. Це підкреслює важливість дистанційного зондування для моніторингу пошкоджень, спричинених війною, в умовах, де наземні дослідження неможливі через міни.

Одним з найгостріших викликів є забруднення ВНП. Понад 0,5 мільйона гектарів лісових територій потребують розмінування, причому 7,5 тисяч гектарів визначено як пріоритетні для розмінування. Це значно обмежує доступ до лісів, перешкоджаючи лісозаготівельним операціям, лісовідновленню та зусиллям з відновлення екосистем.

Незважаючи на виклики, вже розпочато зусилля з відновлення. Пілотний проект, реалізований WWF-Україна та The HALO Trust у Миколаївській області, інтегрує гуманітарне розмінування з відновленням лісосмуг. Після розмінування ділянок експерти відібрали проби ґрунту та розробили план відновлення, включаючи посадку понад 1000 жолудів дуба звичайного та 100 саджанців фруктових дерев. Ця ініціатива демонструє важливість поєднання місцевих видів з фруктовими деревами та чагарниками для створення стійких та біологічно стабільних насаджень. Німецька допомога також підтримує реформу лісового господарства та прискорює процес розмінування в Україні.

Однак існують значні прогалини в політиці. Законодавці повинні вирішити регуляторні прогалини, пов'язані з інтеграцією зусиль з розмінування з діяльністю з відновлення, а також інші законодавчі питання, що стосуються лісосмуг, для оптимізації процесу відновлення.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЛІСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА

4.1 Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти

Техніко-економічне обґрунтування використання обладнання для очищення стічних вод проводиться на прикладі вихідних даних ТОВ "Київський лісопереробний комбінат". Лабораторія екологічної інспекції проводить дослідження на підприємстві і податковий кодекс України передбачає здійснення плати екологічного податку.

Екологічний податок – загальнодержавний обов'язковий платіж, що справляється з фактичних обсягів викидів у атмосферне повітря, скидів у водні об'єкти забруднюючих речовин, розміщення відходів, фактичного обсягу радіоактивних відходів, що тимчасово зберігаються їх виробниками, фактичного обсягу утворених радіоактивних відходів та з фактичного обсягу радіоактивних відходів, накопичених до 1 квітня 2009 року [16].

Платниками податку є суб'єкти господарювання, юридичні особи, що не провадять господарську (підприємницьку) діяльність, бюджетні установи, громадські та інші підприємства, установи та організації, постійні представництва нерезидентів, включаючи тих, які виконують агентські (представницькі) функції стосовно таких нерезидентів або їх засновників, під час провадження діяльності яких на території України і в межах її континентального шельфу та виключної (морської) економічної зони здійснюються:

- викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення;
- скиди забруднюючих речовин безпосередньо у водні об'єкти;
- розміщення відходів у спеціально відведених для цього місцях чи на об'єктах, крім розміщення окремих видів відходів як вторинної сировини;
- утворення радіоактивних відходів (включаючи вже накопичені);

– тимчасове зберігання радіоактивних відходів їх виробниками понад установлений особливими умовами ліцензії строк.

Для окремих забруднюючих речовин встановлена ставка податку. Для забруднюючих речовин, що не увійшли до цього переліку, але на які встановлено гранично допустиму концентрацію або орієнтовно безпечний рівень впливу, ставка податку визначається залежно від цього впливу.

За скиди забруднюючих речовин у ставки та озера ставки податку для визначених окремих забруднюючих речовин та для тих, на які встановлено гранично допустиму концентрацію або орієнтовно безпечний рівень впливу, збільшуються у 1,5 рази.

Суми податку, який справляється за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти (Пс), обчислюються платниками самостійно виходячи з фактичних обсягів скидів, ставок податку та коригуючих коефіцієнтів за формулою:

$$P_c = \sum_{i=1}^n (M_{l_i} \cdot N_{p_i} \cdot K_{oc}), \quad (4.1)$$

де M_{l_i} – обсяг скиду i -тої забруднюючої речовини в тоннах (т);

N_{p_i} – ставки податку в поточному році за тонну i -того виду забруднюючої речовини у гривнях з копійками;

K_{oc} – коефіцієнт, що дорівнює 1,5 і застосовується у разі скидання забруднюючих речовин у ставки і озера (в іншому випадку коефіцієнт дорівнює 1).

Проведемо розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти при відсутності природоохоронних заходів для очищення стічних вод (див. табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти

Назва забрудн. речовини	Скиди без викор. очищ. т/рік	Ставка податку за т/рік, грн	Плата за скиди (без викор. очищ.) грн
Органічні речовини (за показниками БСК 5)	450	5156,8	2320560,0
Завислі речовини	825	369,52	304854,0
Нафтопродукти	0,8	75792,4	60633,9
Сульфати	12,4	369,52	4582,0
Фосфати	10,5	10297,4	108123,1
Хлориди	150	369,52	55428,0
Всього			2854181,1

Оскільки річний валовий об'єм скидів у водні об'єкти надзвичайно великий, то пропонується використати обладнання для очищення стічних вод.

Проведемо розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти у випадку застосування природоохоронних заходів для очищення стічних вод (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Розрахунок суми податку за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти у випадку застосування природоохоронних заходів

Назва забрудн. речовини	Скиди після викор. очищ. т/рік	Ставка податку за т/рік, грн	Плата за скиди (з викор. очищ.) грн
Органічні речовини (за показниками БСК 5)	76,5	5156,8	394495,2
Завислі речовини	49,5	369,52	18291,2
Нафтопродукти	0,08	75792,4	6063,4
Сульфати	1,24	369,52	458,2
Фосфати	1,05	10297,4	10812,3
Хлориди	15	369,52	5542,8
Всього			435663,1

Зменшення плати за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти від впровадження обладнання очищення стічних вод розраховується за формулою:

$$\Delta P_C = P_{C1} - P_{C2} , \quad (4.2)$$

де P_{C1} – плата за скиди без використання очищення (2854181,1 грн./рік);

P_{C2} – плата за скиди з використанням обладнання очищення стічних вод (435663,1 грн./рік);

$$\Delta P_C = 2854181,1 - 435663,1 = 2418518 \text{ (грн.)}.$$

4.2 Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти

Розрахунок кошторису капітальних витрат на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти шляхом встановлення обладнання очищення стічних вод можна здійснити у такому порядку.

Основна заробітна плата найманих робітників, що здійснюють встановлення обладнання для очищення стічних вод та проведення налагоджувальних робіт розраховується за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн.)}, \quad (4.3)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного робітника, грн.;

T_p – число робочих днів в місяці;

t – число робочих днів роботи робітників.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Основна заробітна плата робітників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн..	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	35200	1600	10	16000
2. Інженер	25400	1155	7	8082
3. Монтажник	18000	818	7	5727
4. Налагоджувальник	17900	814	5	4068
Разом :				33877

Додаткова заробітна плата розробників Z_o , які приймали участь в розробці нового програмного продукту.

Ця додаткова заробітна плата розраховується як 12% від основної заробітної плати робітників:

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\%; \quad (4.4)$$

$$Z_d = 33877 \cdot 12 / 100 \% = 4065 \text{ (грн).}$$

Нарахування на заробітну плату $H_{зп}$ робітників, що здійснюють встановлення обладнання для очищення стічних вод та проведення налагоджувальних робіт:

$$H_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.5)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

β – загальна величина нарахувань, %.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$H_{зп} = (33877 + 4065) \cdot 22 \% / 100\% = 8347 \text{ (грн).}$$

Витрати на придбання нового обладнання, його монтаж та налагодження можна розрахувати за формулою:

$$O_o = \sum_1^n C_i \cdot N_i \cdot K_i, \quad (4.6)$$

де n – кількість видів обладнання;

C_i – ціна придбання обладнання даного виду, марки, грн.;

N_i – кількість однотипного виду обладнання, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження обладнання тощо.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на придбання обладнання

Найменування обладнання	Ціна, тис.грн.	Кількість	Витрати на монтаж та налагодження, тис.грн.	Витрати з урах. монтажу і налагод. тис.грн.
Установка фізико-хімічного очищення стічних вод	1200	1	20	1220
Разом				1220

Витрати на придбання приміщень для облаштування нового обладнання розраховуємо за формулою:

$$O_{np} = u_{np} \cdot S_{np} , \quad (4.7)$$

де u_{np} – вартість придбання 1 кв.м. виробничої площі, $u_{np} = 20000$ грн./кв.м.;

S_{np} – виробнича площа, необхідна для облаштування нового обладнання, 30 кв.м.

$$O_{np} = 20000 \cdot 30 = 600000 \text{ (грн.)}.$$

Інші витрати ІВ охоплюють: загально виробничі витрати, адміністративні витрати тощо. Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати робітників.

Величина інших витрат складе:

$$ІВ = Z_0 \cdot 200 / 100 = 33877 \cdot 200 / 100 = 67754 \text{ (грн.)} \quad (4.8)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає капітальні витрати на проведення природоохоронних заходів зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти:

$$K = Z_o + Z_d + H_{3П} + O_6 + O_{пр} + IB, \quad (4.9)$$

$$K = 33877 + 4065 + 8347 + 1220000 + 600000 + 67754 = 1934043 \text{ (грн).}$$

4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод

Заробітна плата обслуговуючого персоналу $Z_{обс}$, що розраховується за формулою:

$$Z_{обс} = 12 \cdot N \cdot M \cdot \beta \quad (\text{грн./рік}), \quad (4.10)$$

де 12 – число місяців;

N – число робітників, що обслуговують обладнання очищення стічних вод;

M – місячний посадовий оклад працівника, грн.; в 2025 році величини посадових окладів коливаються в межах 16000–17500 грн.;

β – частка часу, який витрачає працівник на обслуговування очищення стічних вод, в загальному часі своєї роботи.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу становить:

$$Z_{обс} = 12 \cdot 4 \cdot 16000 \cdot 0,3 = 230400 \text{ (грн/рік).}$$

Додаткова заробітна плата Z_d , яка визначається як 10...12% від основної заробітної плати обслуговуючого персоналу $Z_{обс}$ і становить:

$$Z_o = Z_{обс} \cdot 12 / 100\%; \quad (4.11)$$

$$Z_o = 0,12 \cdot 230400 = 27648 \text{ (грн./рік)}.$$

Нарахування на заробітну плату обслуговуючого персоналу НЗП, які визначаються як 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати обслуговуючого персоналу, тобто:

$$H_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.12)$$

$$H_{зп} = (230400 + 27648) \cdot 0,22 = 56771 \text{ (грн/рік)}.$$

Витрати на силову електроенергію при живленні обладнання від електромережі розраховуються за формулою:

$$V_e = V \cdot П \cdot \Phi \cdot K_n, \quad (4.13)$$

де V – вартість 1 кВт-години електроенергії. $V = 4,32$ грн./кВт –год.;

$П$ – встановлена потужність обладнання, кВт (5 кВт);

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання за рік, (8760 год.);

K_n – коефіцієнт використання потужності, $K_n = 0,8$.

$$V_e = 4,32 \cdot 5 \cdot 8760 \cdot 0,8 = 151372,8 \text{ (грн)}.$$

Амортизаційні відрахування для обладнання очищення стічних вод визначаємо за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot N_a}{100}, \text{ грн/рік.} \quad (4.14)$$

де $Ц$ – балансова вартість обладнання, грн.;

N_a – річна норма амортизації обладнання (15%).

$$A = \frac{1200 \cdot 15}{100} = 180 \text{ (тис.грн/рік)}.$$

Інші витрати ІВ, які приймаємо як 5...10% від загальної суми усіх попередніх витрат і становлять:

$$IB = 0,05 \dots 0,1 (Z_{обс} + Z_{\partial} + H_{зп} + B_e + A) , \quad (4.15)$$

$$IB = 0,1 \cdot (230400 + 27648 + 56771 + 151372,8 + 180000) = 64619 \text{ (грн/рік)}.$$

Сума витрат за всіма попередніми статтями дає величину експлуатаційних витрат під час використання обладнання очищення стічних вод:

$$E = Z_{обс} + Z_{\partial} + H_{зп} + B_e + A + IB , \quad (4.16)$$

$$E = 230400 + 27648 + 56771 + 151372,8 + 180000 + 64619 = 710810,8 \text{ (грн/рік)}.$$

4.4 Визначення економічного ефекту та терміну окупності під час використання обладнання очищення стічних вод

При використанні природоохоронних технологій скиди шкідливих речовин у водні об'єкти суттєво зменшаться, що дозволить отримати зменшення плати податку за скиди .

Економічний ефект від впровадження обладнання очищення стічних вод розраховується за формулою:

$$\Delta E = \Delta \Pi_c - E , \quad (4.17)$$

де $\Delta \Pi_c$ – зменшення плати за скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти (2418518 грн./рік);

E – експлуатаційні витрати обладнання очищення стічних вод (710810,8 грн/рік).

$$\Delta E = 2418518 - 710810,8 = 1707707,2 \text{ (грн.)}$$

4.5 Розрахунок терміну окупності витрат під час використання обладнання очищення стічних вод

Термін окупності T_o витрат під час використання обладнання очищення стічних вод розраховуються за формулою:

$$T_o = \frac{B}{\Delta E}, \quad (4.18)$$

де B – загальні витрати на проведення природоохоронних заходів для зменшення скидів шкідливих речовин у водні об'єкти.

$$B = E + E_H \cdot K, \quad (4.18)$$

E – експлуатаційні витрати;

E_H – нормативний коефіцієнт капітальних витрат (0,1);

K – капітальні витрати

$$B = 710810,8 + 0,1 \cdot 1934043 = 904215,1 \text{ (грн.)}$$

$$T_o = \frac{904215,1}{1707707,2} = 0,53 \text{ (років)}$$

Оскільки термін окупності проекту складає 0,53 років, тому можна стверджувати, що він є економічно ефективним.

4.6 Висновки до четвертого розділу

Проаналізувавши отримані значення можна зробити висновок, що впровадження сучасної установки фізико-хімічного очищення стічних вод на підприємстві дасть економічний ефект в розмірі 1707,7 тис.грн. за рахунок суттєвого зменшення скидів у водні об'єкти і відповідного зменшення суми податку за скиди.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено проблему пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій та можливості їх оцінки методами дистанційного зондування. Збройні конфлікти, як показано у роботі, становлять значну, часто недооцінену загрозу для життєво важливих лісових екосистем, спричиняючи як прямі руйнування, так і довгострокову деградацію з далекосяжними екологічними, соціальними та економічними наслідками.

Встановлено, що пошкодження лісів у зоні бойових дій є багатогранними та включають прямі фізичні руйнування (вибухи, хімічне забруднення, пожежі), а також опосередковані та довгострокові наслідки (незаконна вирубка, деградація ґрунту, втрата біорізноманіття, вплив нерозірваних боєприпасів (НРБ)). Ці чинники створюють системний вплив на лісові екосистеми та їх функції, вимагаючи багатовимірної стратегії оцінки та відновлення.

Підтверджено, що технології дистанційного зондування (супутникові зображення, SAR, гіперспектральні дані, БПЛА та LiDAR) є ключовими для моніторингу та оцінки пошкоджень лісів у зонах конфліктів. Вони дозволяють збирати дані з недоступних та небезпечних територій, що є критично важливим в умовах обмеженого наземного доступу. Інтеграція різноманітних спектральних індексів (NDVI, NBR, dNBR, dNDVI, BAI) значно підвищує точність виявлення та класифікації пошкоджень, зокрема лісових пожеж та змін у здоров'ї рослинності.

Доведено, що застосування штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання (МН), глибокого навчання (ГН) та географічних інформаційних систем (ГІС) революціонізує оцінку пошкоджень лісів, перетворюючи її на автоматизований, швидкий та точний процес. ШІ-моделі (CNN, U-Net) здатні автоматично ідентифікувати та кількісно оцінювати пошкодження в реальному часі. Однак, ефективність цих моделей значно залежить від якості та специфічності навчальних даних, а нестача наборів даних, що відображають військові пошкодження, є суттєвим обмеженням.

Визначено, що наземні методи залишаються важливими для отримання детальної інформації (наприклад, хімічний аналіз ґрунту та води, оцінка біорізноманіття) та верифікації даних дистанційного зондування. Проте, їх застосування у зонах конфліктів критично обмежене ризиками безпеки, пов'язаними з наявністю НРБ та активними бойовими діями. Це підкреслює необхідність першочергової пріоритезації дистанційних методів та інтеграції зусиль з розмінування у плани відновлення.

Запропоновано комплекс із десяти інноваційних рішень, що поєднують передові технології дистанційного зондування, штучний інтелект (включаючи прогностичний та пояснюваний ШІ, мультисенсорне злиття даних) та інтегровані наземні інновації (веб-ГІС платформи, безпілотні наземні транспортні засоби). Такий багатоплатформний та інтегрований підхід є оптимальним для подолання існуючих викликів та забезпечення всебічної, точної та безпечної оцінки наслідків військових дій для лісів.

Таким чином, результати дослідження підкреслюють нагальну потребу у розробці та впровадженні інноваційних, безпечних та ефективних методів оцінки збитків лісовим насадженням у зонах бойових дій. Лише комплексний підхід, що поєднує можливості передових технологій дистанційного зондування з аналітичними інструментами ШІ та обережним застосуванням наземних методів, дозволить отримати повну картину руйнувань, що є запорукою успішного післявоєнного відновлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahem F.J., Erdle T., Madlen D.A., Кнеппек I.D. A quantitative relationship between forest growth rates and TM reflectance measurement. *Int. J. Remote Sensing*. 1991. 12(3). P. 387-400.
2. Ahem F.J., Leckie D.G., Drieman J.A. Seasonal changes in relative C band backscatter of northern forest cover types. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sens.* 1992. 31. P. 668-680.
3. Amarasekara H.M., Ranasinghe D.M.S.H.K., Finlayson W. Management and sustainable utilisation of Forest resource. In *Proceedings of the 2nd annual forestry symposium, Department of Forestry and environmental Science, University of Sri Jayawardenapura, SriLanka*. 1996. P. 112-118.
4. Anderson T. W. *An Introduction to Multivariate Statistical Analysis* (2 ed.), Wiley, New York, 1984. 102 p.
5. Ardo J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance record by Landsat Thematic Mapper. *Int. J. Remote Sensing*. 1992. 13(9). P. 1779-1786.
6. Asrar G., Murphy R.E., Hall F.G., Sellers P.J. Use of multi- spectral SPOT data in first ISLSCP field experiment. *Proceedings of the 5th International Colloquium - Physical Measurement and Signature in Remote Sensing 14-18 January 1991 (France)*, 1991. P. 777-782.
7. Baker J.R., Mitchell P.L. The UK elements of the Maestro - 1 SAR campain. *Int. J. Remote Sensing*. 1992. 13(9). P 1593-1608.
8. Baker J.R., Mitchell P.L., Cordey R.A. et al. Relationships between physical characteristics and polarimetric radar backscatter for Corsican pine stands in Thetford forest. *Int. J. Remote Sensing*. 1994. 15. P. 2827-2850.
9. Balzter H., Skinner L., Luckman A., Brooke R. Estimation of tree growth in a conifer plantation over 19 years from multi-satellite L-band SAR. *Remote Sens. Environ.* 2003. 84. P. 184-191.

10. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*. 1995. 13. P. 95-120.
11. Banner A., Lynham T. Multitemporal analysis of LANDSAT data for forest cutover mapping-A trial of two procedures. *Proceedings of 7th Symp. on Remote Sens. of Environ.* Winnipeg, Canada. 1981. P. 233-240.
12. Banner A. V., Ahem F.J. Forest clear-cut mapping using airborne C-band SAR and simulated Radarsat imagery. *Can. J. Remote Sensing*. 1995. 21. P. 124-137.
13. Baoxin H., Inannen K., Miller J.R. Retrieval of Leaf Area Index and canopy closure from CASI data over the Boreas flux tower sites. *Remote Sens. Environ.* 2000. 74. P. 255-274.
14. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 1991. 35. P. 161-173.
15. Batista G.T., Shimbukuro Y.E., Lawrence W.T. The long term monitoring of vegetation cover Amazonian region of North Brazil using NOAA AVHRR. *Int. J. Remote Sensing*. 1997. 18(15). P. 3195-3210.
16. Податковий кодекс України : Закон України від 02.12.2010 № 2755-VI. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17> (дата звернення: 15.06.2025).

ДОДАТОК А
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Дослідження пошкодження лісових насаджень у зоні бойових дій методами дистанційного зондування

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 2,71 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Кватернюк С. М.

Здобувач

Кирилюк А. О.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Площі та кількість об'єктів ПЗФ, які розташовані в межах небезпечних зон та на окупованих територіях

Тип об'єкту ПЗФ	Площа об'єктів ПЗФ, га	Кількість об'єктів ПЗФ	Об'єкти ПЗФ в межах небезпечних зон		Об'єкти ПЗФ на окупованих територіях	
			площа, га	кількість	площа, га	кількість
Природний заповідник	92578	9	14197	5	51775	6
Біосферний заповідник	369527	3	334217	3	-	-
Нац. природний парк	406855	17	270098	15	14005	3
Регіональний ландшафтний парк	224359	16	125972	15	84	1
Заказник	524241	797	328537	739	112599	61
Заповідне урочище	22832	103	18625	101	553	2
Пам'ятка природи	9319	392	7045	350	2263	42
Ботанічний сад	1135	4	55	2	1080	2
Дендрологічний парк	406	6	404	6	-	-
Зоологічний парк	49	3	45	3	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	1890	76	1232	62	387	14
Разом	1653191	1426	1100427	1301	182746	131
ДОНЕЦЬКА ОБЛАСТЬ						
Природний заповідник	3033	1	1426	1	1030	1
Нац. природний парк	20721	1	4746	1	2865	1
Регіональний ландшафтний парк	2248	1	2248	1	-	-
Заказник	6313	10	4836	6	1385	4
Пам'ятка природи	332	12	245	8	78	4
Ботанічний сад	203	1	-	-	203	1
Разом	32850	26	13500	17	5562	11
ЖИТОМИРСЬКА ОБЛАСТЬ						
Природний заповідник	30873	1	4848	1	-	-
Заказник	40507	4	3120	4	-	-
Разом	71379	5	7967	5	-	-
ЗАПОРІЗЬКА ОБЛАСТЬ						
Природний заповідник	100	1	97	1	-	-
Національний природний парк	94883	2	66953	2	-	-
Регіональний ландшафтний парк	1025	1	589	1	-	-
Заказник	65195	189	44511	189	-	-
Заповідне урочище	95	2	95	2	-	-
Пам'ятка природи	792	62	790	62	-	-
Дендрологічний парк	8	1	8	1	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	156	11	156	11	-	-
Разом	162253	269	113198	269	-	-
КИЇВСЬКА ОБЛАСТЬ ТА М. КИЇВ						
Біосферний заповідник	226965	1	220149	1	-	-
Національний природний парк	25824	2	2708	2	-	-
Заказник	63406	32	54884	32	-	-
Заповідне урочище	491	7	485	7	-	-
Пам'ятка природи	230	31	230	31	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	240	1	3	1	-	-
Разом	317156	74	278459	74	-	-

Продовження табл. Б.1

Тип об'єкту ПЗФ	Площа об'єктів ПЗФ, га	Кількість об'єктів ПЗФ	Об'єкти ПЗФ в межах небезпечних зон		Об'єкти ПЗФ на окупованих територіях	
			площа, га	кількість	площа, га	кількість
ЛУГАНСЬКА ОБЛАСТЬ						
Природний заповідник	5403	1	4816	1	587	1
Регіональний ландшафтний парк	14011	1	13966	1	-	-
Заказник	58581	96	47014	60	11567	39
Заповідне урочище	3024	18	2489	17	535	1
Пам'ятка природи	5556	74	4386	53	1170	21
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	243	9	92	3	151	6
Разом	86817	199	72764	135	14009	68
МИКОЛАЇВСЬКА ОБЛАСТЬ						
Природний заповідник	3011	1	3011	1	-	-
Національний природний парк	35223	1	72	1	-	-
Регіональний ландшафтний парк	2713	1	2713	1	-	-
Заказник	9643	33	8449	33	-	-
Заповідне урочище	1848	4	1848	4	-	-
Пам'ятка природи	117	25	117	25	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	131	14	125	14	-	-
Зоологічний парк	18	1	18	1	-	-
Разом	52703	80	16352	80		
СУМСЬКА ОБЛАСТЬ						
Національний природний парк	39574	2	24726	2	-	-
Регіональний ландшафтний парк	98858	1	1035	1	-	-
Заказник	15892	39	14267	39	-	-
Заповідне урочище	213	15	211	15	-	-
Пам'ятка природи	27	25	27	25	-	-
Дендрологічний парк	4	2	4	2	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	381	5	381	5	-	-
Разом	154950	89	40652	89		
ХАРКІВСЬКА ОБЛАСТЬ						
Національний природний парк	3131	1	3131	1	-	-
Регіональний ландшафтний парк	20376	7	20376	7	-	-
Заказник	23561	85	21648	85	-	-
Заповідне урочище	1392	6	1392	6	-	-
Пам'ятка природи	616	25	616	25	-	-
Ботанічний сад	55	2	55	2	-	-
Дендрологічний парк	23	1	23	1	-	-
Зоологічний парк	22	1	22	1	-	-
Разом	49176	128	47263	128		
ХЕРСОНСЬКА ОБЛАСТЬ						
Біосферний заповідник	142562	2	114068	2	-	-
Національний природний парк	166693	5	158097	5	-	-
Заказник	62425	22	54464	22	-	-
Заповідне урочище	942	10	939	10	-	-
Пам'ятка природи	26	30	26	30	-	-
Дендрологічний парк	167	1	165	1	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	175	13	171	13	-	-
Разом	372991	83	327929	83		

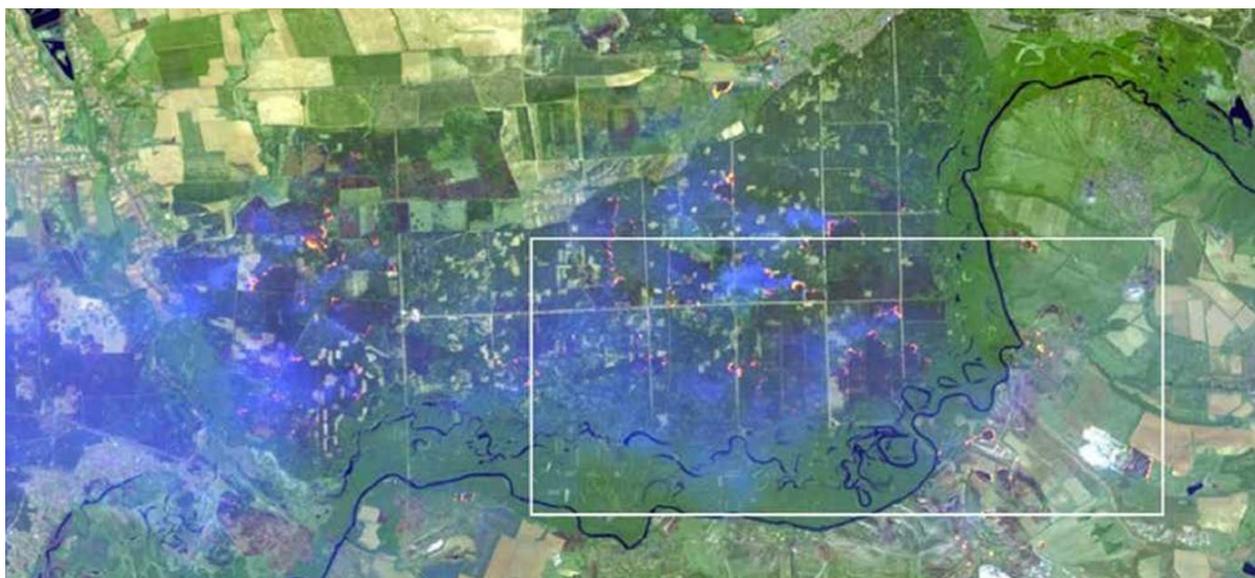
Продовження табл. Б.1

Тип об'єкту ПЗФ	Площа об'єктів ПЗФ, га	Кількість об'єктів ПЗФ	Об'єкти ПЗФ в межах небезпечних зон		Об'єкти ПЗФ на окупованих територіях	
			площа, га	кількість	площа, га	кількість
ЧЕРНІГІВСЬКА ОБЛАСТЬ						
Національний природний парк	9666	1	9666	1	-	-
Регіональний ландшафтний парк	85045	3	85045	3	-	-
Заказник	79070	269	75344	269	-	-
Заповідне урочище	14809	40	11166	40	-	-
Пам'ятка природи	608	91	608	91	-	-
Дендрологічний парк	205	1	205	1	-	-
Зоологічний парк	9	1	5	1	-	-
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	328	15	305	15	-	-
Разом	189740	421	182344	421		
АВТНОМНА РЕСПУБЛІКА КРИМ						
Природний заповідник	50158	4	-	-	50158	4
Національний природний парк	11140	2	-	-	11140	2
Регіональний ландшафтний парк	84	1	-	-	84	1
Заказник	99648	18	-	-	99648	18
Заповідне урочище	18	1	-	-	18	1
Пам'ятка природи	1015	17	-	-	1015	17
Ботанічний сад	877	1	-	-	877	1
Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва	236	8	-	-	236	8
Разом	163176	52			163176	52

ДОДАТОК В

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

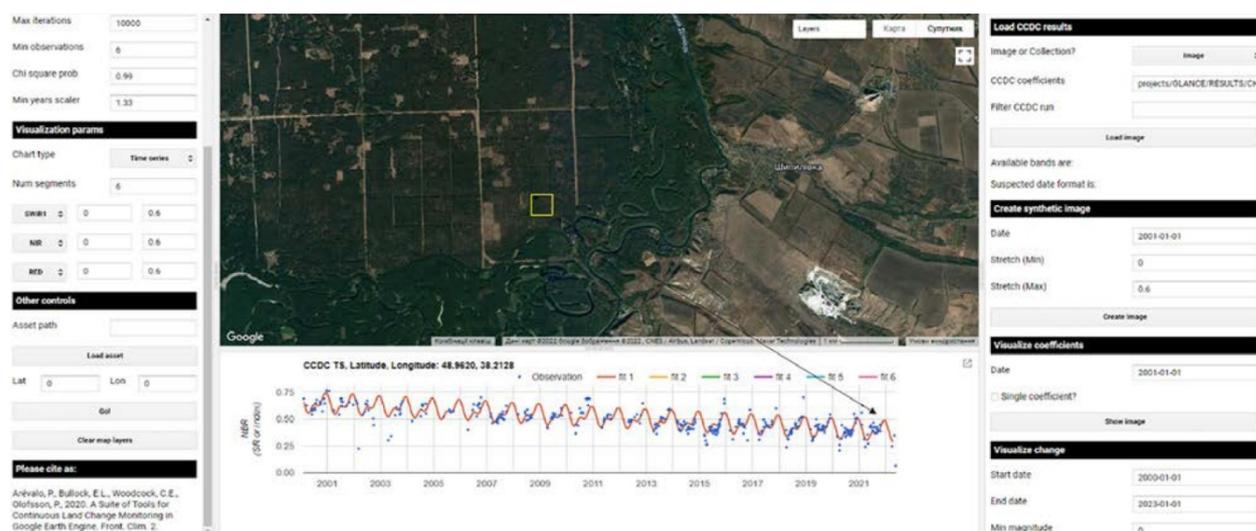
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ У ЗОНІ
БОЙОВИХ ДІЙ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**



а) знімок Sentinel-2 за 8 травня 2022 р.

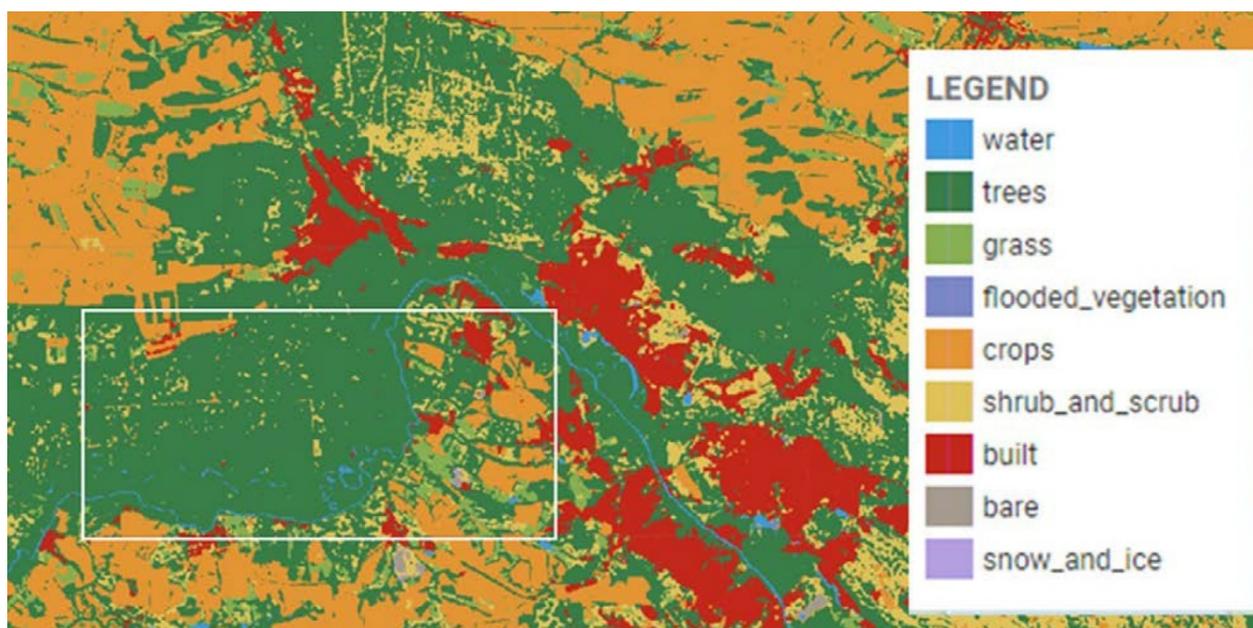


б) алгоритм LandTrendr станом на червень 2022 року сегмент, що пов'язаний з порушенням лісів (пожежа)

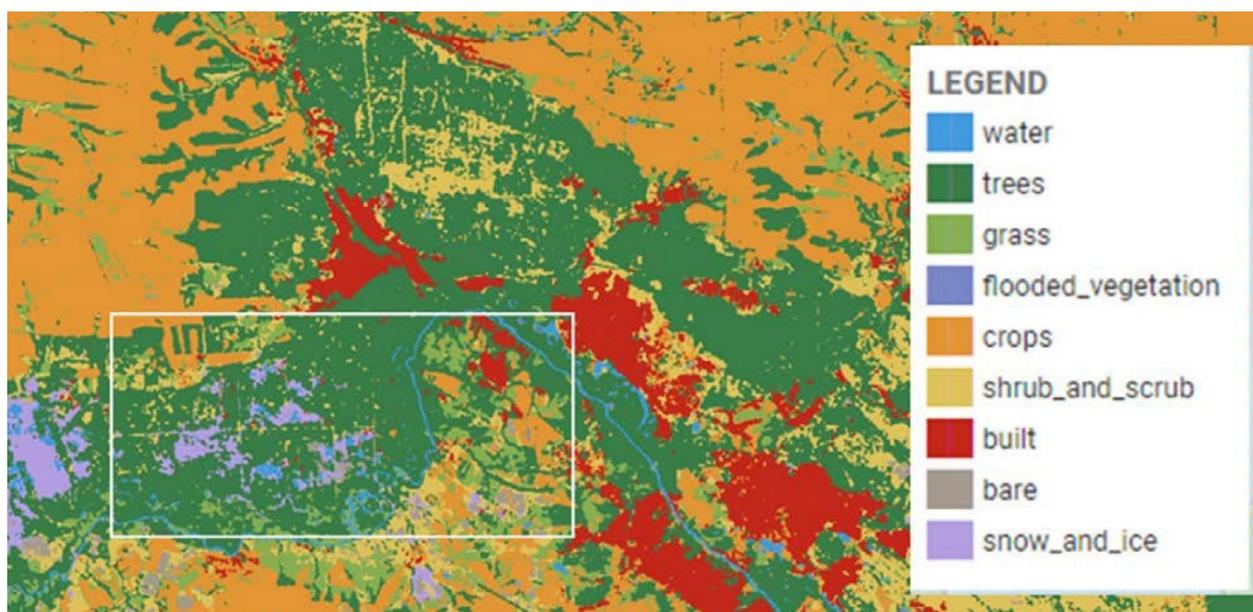


в) алгоритм CCDC не ідентифікує порушення (відсутній другий сегмент)

Рисунок В.1 – Приклад моніторингу порушень лісових насаджень у зоні бойових дій (Луганська область)



а) земельний покрив станом на червень-серпень 2021 р.



б) земельний покрив станом на 10 травня - 10 червня 2022 р.

Рисунок В.2 – Моніторинг порушень лісових насаджень у зоні бойових дій (Луганська область) на основі системи Dynamic World

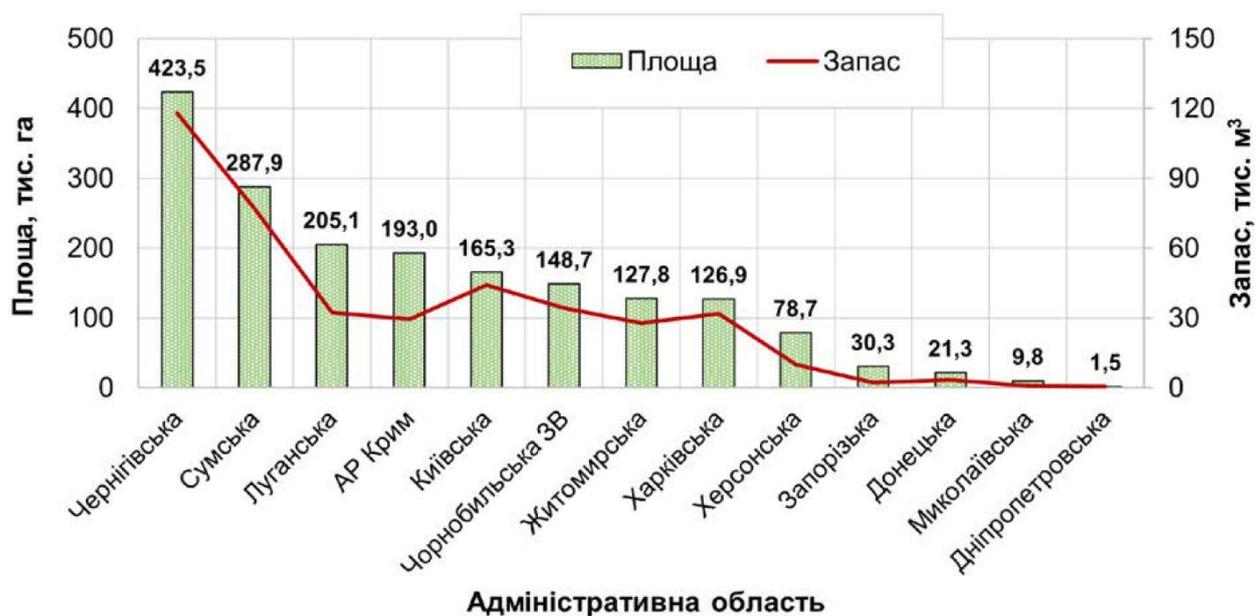


Рисунок В.3 – Розподіл площі та запасу лісів, які опинилися в зоні військових дій та на тимчасово окупованій території

Таблиця В.1 – Площі ділянок лісового фонду держлісгоспів Чернігівської області, які потенційно можуть бути забрудненими за даними ДСНС

Лісогосподарське підприємство	Загальна площа підприємства	Вкрита лісовою рослинністю площа	Площа забруднена ВВП	% від загальної площі	% від площі, вкритої лісовою рослинністю
ДП "Городнянський лісгосп"	76378,7	69261,4	66496,3	87,1	96,0
ДП "Ніжинський лісгосп"	97879,4	87286,3	39904,9	40,8	45,7
ДП "Корюківський лісгосп"	79214,0	70792,0	60647,2	76,6	85,7
ДП "Новгород-Сіверський лісгосп"	62303,4	57314,5	45,0	0,1	0,1
ДП "Чернігівський лісгосп"	102197,0	92065,0	82477,4	80,7	89,6
Разом	417972,5	376719,2	249570,8	59,7	66,2

Таблиця В.2 – Площі ділянок лісового фонду держлісгоспів Чернігівської області, які потенційно можуть бути забрудненими за даними Чернігівського ОУЛМГ

Лісогосподарське підприємство	Загальна площа підприємства	Вкрита лісовою рослинністю площа	Площа забруднена ВВП	% від загальної площі	% від площі, вкритої лісовою рослинністю
ДП "Городнянський лісгосп"	76378,7	69261,4	7843,4	10,3	11,3
ДП "Ніжинський лісгосп"	97879,4	87286,3	1760,1	1,8	2,0
ДП "Корюківський лісгосп"	79214,0	70792,0	765,0	1,0	1,1
ДП "Новгород-Сіверський лісгосп"	62303,4	57314,5	0,0	0,0	0,0
ДП "Чернігівський лісгосп"	102197,0	92065,0	7287,0	7,1	7,9
Разом	417972,5	376719,2	17655,5	4,2	4,7