

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:

«ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ЛІСОВИМ ПОЖЕЖАМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ»

Виконала: студентка групи ТЗД-23мз
спеціальності 183 – «Технології захисту
навколишнього середовища»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

«10» червня 25 Дзюбенко К.Р.
(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.Н.
(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

Дзюбенко Катерина Романівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ЛІСОВИМ ПОЖЕЖАМ З ВИКОРИСТАННЯМ 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

Методика розрахунку спектральних індексів для дистанційного зондування з використанням супутників (додаток Б).

4. Зміст текстової частини

1. Комплексний аналіз основних підходів до дослідження лісових пожеж.
2. Дистанційне зондування лісових пожеж за допомогою супутників.
3. Аналіз даних дистанційного зондування лісових пожеж.
4. Техніко-економічне обґрунтування методики запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

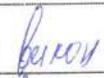
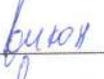
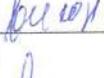
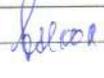
1. Класифікація причин виникнення лісових пожеж.
2. Просторовий розподіл загального вмісту СО в атмосфері під час лісових пожеж.
3. Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, канали SWIR 12, 8A, 4.
4. Встановлення контуру пожежі.
5. Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, NDVI.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4 Техніко-економічне обґрунтування методики запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування.	Декан ФМІБ, 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	Комплексний аналіз основних підходів до дослідження лісових пожеж.	25.03.2025	07.04.2025	
2	Дистанційне зондування лісових пожеж за допомогою супутників.	07.04.2025	27.04.2025	
3	Аналіз даних дистанційного зондування лісових пожеж.	27.04.2025	12.05.2025	
4	Техніко-економічне обґрунтування методики запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування.	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)

Керівник роботи 
(підпис)

Дзюбенко К.Р.
(прізвище та ініціали)

Кватернюк С. М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з 104 сторінок формату А4, на яких є 23 рисунки, 9 таблиць, список використаних джерел містить 30 найменування.

Метою роботи є вдосконалення методів екологічного моніторингу лісових пожеж із застосуванням дистанційного зондування та статистичної обробки результатів вимірювань.

Магістерська кваліфікаційна робота зосереджена на вдосконаленні методів екологічного моніторингу лісових пожеж. Лісові пожежі, що посилюються змінами клімату та антропогенним впливом, становлять глобальну екологічну загрозу, вимагаючи ефективних стратегій запобігання, виявлення та відновлення. Основні завдання включають аналіз підходів до дослідження пожеж, обробку супутникових даних, аналіз результатів та техніко-економічне обґрунтування запропонованих методик. Практична цінність роботи полягає в наданні інструментів для ефективного запобігання пожежам, швидкого реагування та мінімізації їх наслідків. .

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

ABSTRACT

The master's qualification work consists of 104 pages of A4 format, which include 23 figures, 9 tables, and the list of sources used contains 30 names.

The method of work is to improve methods for ecological monitoring of forest fires using remote sensing and statistical processing of measurement results.

The master's qualification work focuses on improving methods for ecological monitoring of forest fires. Forest fires, exacerbated by climate change and anthropogenic impact, pose a global environmental threat, requiring effective prevention, detection, and recovery strategies. The main tasks include analyzing approaches to fire research, processing satellite data, analyzing results, and feasibility studies of the proposed methods. The practical value of the work arises from providing tools for effective fire prevention, rapid response, and minimizing their consequences.

Keywords: forest fires, remote sensing, statistical research.

ВІДГУК

наукового керівника на магістерську кваліфікаційну роботу студентки заочної форми навчання групи ТЗД – 23м (з/ф) Дзюбенко Катерини Романівни “Вдосконалення системи запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування”

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена надзвичайно актуальній та гострій проблемі сьогодення – підвищенню ефективності моніторингу та запобігання лісовим пожежам. В умовах глобальних кліматичних змін та зростання антропогенного навантаження, що призводять до збільшення частоти та масштабності пожеж, розробка та вдосконалення інноваційних методів контролю стає ключовим завданням для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку.

У першому розділі проведено глибокий та всебічний аналіз сучасного стану проблеми. Автор детально розглянув не лише джерела займання та фактори поширення вогню, але й проаналізував широкий спектр існуючих методологій – від моніторингу та моделювання до оцінки ризиків та стратегій управління. Другий розділ присвячений ключовим методологічним аспектам роботи – застосуванню супутникового дистанційного зондування. У третьому розділі представлено аналіз даних дистанційного зондування на конкретних прикладах – дослідженні пожеж у Чорнобильській зоні та Херсонській області. Запропоновані інноваційні рішення є обґрунтованими та перспективними. Практична цінність отриманих результатів є беззаперечною, оскільки запропоновані інструменти та методики можуть суттєво підвищити спроможність відповідних служб запобігати пожежам, оперативно на них реагувати та мінімізувати їхні руйнівні наслідки.

Дзюбенко К.Р. 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

опонента на магістерську кваліфікаційну роботу студентки заочної форми навчання із спеціальності 183 “Технології захисту навколишнього середовища” Дзюбенко Катерини Романівни на тему: “Вдосконалення системи запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування”.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності моніторингу та запобігання лісовим пожежам. Лісові пожежі завдають величезної шкоди екології та економіці багатьох країн. У комплексі заходів щодо запобігання лісовим пожежам актуальним завданням є виявлення лісових пожеж на ранній стадії.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми. Розглянуто джерела займання, фактори поширення вогню, проаналізовано методології виявлення та моніторингу лісових пожеж. Другий розділ присвячений застосуванню супутникового дистанційного зондування. У третьому розділі проаналізовані дані дистанційного зондування на конкретних прикладах. У четвертому розділі приведено техніко-економічне обґрунтування методики запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування. Це свідчить про практичну спрямованість роботи та вміння застосовувати теоретичні знання для вирішення реальних екологічних завдань.

У роботі можна відзначити такий недолік: робота має загальний характер і не акцентує увагу на регіональних особливостях України, де проводилося дослідження. Так, не розглянуто специфіку екосистем чи локальних кліматичних умов, які можуть впливати на ефективність методики.

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 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	6
1.1 Зростаюча актуальність досліджень лісових пожеж	6
1.2 Джерела займання та фактори поширення пожеж	6
1.3 Методології виявлення та моніторингу лісових пожеж	10
1.4 Моделювання поведінки та прогнозування пожеж	14
1.5 Оцінка ризиків та вразливості	18
1.6 Екологічні наслідки та відновлення екосистем	21
1.7 Стратегії управління та зменшення наслідків	23
2 ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКІВ	28
2.1 Характеристика лісових пожеж за допомогою супутникових даних Landsat-8	28
2.2 Модель глибокого навчання для виявлення лісових пожеж за супутниковими зображеннями	46
2.3 Модель прогнозування небезпеки лісових пожеж на основі дистанційного зондування	60
3 АНАЛІЗ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	65
3.1 Дослідження лісових пожеж у Чорнобильській зоні	65
3.2 Дослідження лісових пожеж у Херсонській області	70
3.3 Інноваційні рішення системи запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування	75
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЗАПОБІГАННЯ ЛІСОВИМ ПОЖЕЖАМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ	77
4.1 Методика калькулювання собівартості інноваційного рішення	77

4.2 Калькуляція собівартості програмного продукту	78
4.3 Визначення ціни і критичного обсягу виробництва інноваційного рішення	82
4.4 Визначення експлуатаційних витрат при використанні інноваційного рішення	84
4.5 Оцінювання економічної ефективності інноваційного рішення	86
ВИСНОВКИ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТОК А	96
ДОДАТОК Б	97
ДОДАТОК В.....	100

ВСТУП

Актуальність. Лісові пожежі є однією з найгостріших глобальних екологічних проблем, що мають далекосяжні наслідки для екосистем, здоров'я людини та економіки по всьому світу. Це не просто руйнівні явища, а складні процеси, що формуються як природними чинниками, так і антропогенним впливом. Історично лісові пожежі були невід'ємною частиною багатьох екосистем, відіграючи роль у підтримці біорізноманіття та кругообігу поживних речовин. Однак, у сучасному світі їхня природа трансформувалася. Зростаюча взаємодія людини з дикими ландшафтами та зміни клімату перетворили пожежі з переважно природних екологічних порушень на масштабні глобальні катастрофи. Зростаюча частота, інтенсивність та тривалість лісових пожеж, значною мірою зумовлені зміною клімату та зміною землекористування, вимагають міцного та постійно розвиваючого наукового розуміння. Ефективні стратегії запобігання, виявлення, гасіння та післяпожежного відновлення критично залежать від передових досліджень. Сучасне управління пожежами стикається з численними викликами, включаючи якість даних, точність моделей та переважний вплив зміни клімату. Ці виклики безпосередньо підтверджують актуальність досліджень, спрямованих на покращення цих областей.

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 екологічного моніторингу лісових пожеж із застосуванням дистанційного зондування та статистичної обробки результатів вимірювань.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Комплексний аналіз основних підходів до дослідження лісових пожеж.
2. Дистанційне зондування лісових пожеж за допомогою супутників.

3. Аналіз даних дистанційного зондування лісових пожеж.

4. Техніко-економічне обґрунтування методики запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування.

Об'єкт досліджень – процес екологічного моніторингу лісових пожеж за допомогою вдосконалених методів.

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

Новизна одержаних результатів. Набули подальшого розвитку методи раннього виявлення пожеж, що використовують поєднання штучного інтелекту з дистанційним зондуванням (супутники, дрони) та наземними давачами.

Практична цінність роботи полягає в тому, що воно забезпечує суспільство конкретними інструментами, які суттєво підвищують його спроможність запобігати лісовим пожежам, ефективно реагувати на них та успішно відновлюватися, тим самим мінімізуючи їх руйнівні наслідки.

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

1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

1.1 Зростаюча актуальність досліджень лісових пожеж

Лісові пожежі становлять одну з найгостріших глобальних проблем сучасності, що характеризується тривожним зростанням частоти, інтенсивності та площі поширення. Ця ескалація значною мірою пояснюється підвищенням глобальних температур та суттєвими змінами у природних режимах пожеж. Глибокі наслідки цих подій мають далекосяжний вплив, зачіпаючи не лише природні екосистеми, а й людські спільноти та світову економіку [1].

Вирішення складної природи лісових пожеж вимагає глибоко міждисциплінарного дослідницького підходу. Основна мета цих спільних досліджень полягає у створенні своєчасних, високоякісних та дієвих знань. Ці знання є вирішальними для надання можливості особам, які приймають рішення, та різним зацікавленим сторонам, включаючи служби швидкого реагування, аналітиків ризиків та політиків, ефективно захищати вразливі екосистеми, охороняти громадське здоров'я та підвищувати стійкість громад [2].

1.2 Джерела займання та фактори поширення пожеж

Лісові пожежі виникають з різних джерел, що охоплюють як природні явища, так і діяльність людини. Антропогенні займання є переважно домінуючими, становлячи приблизно від 85% до 90% усіх лісових пожеж щорічно у Сполучених Штатах. Ці займання часто є ненавмисними та виникають внаслідок низки дій, включаючи необережно викинуті сигарети, залишені без нагляду багаття, неконтрольоване спалювання сміття, а також несправності обладнання (наприклад, електричних розподільних систем) або транспортних засобів [3]. Хоча контрольоване випалювання є критично важливим інструментом управління земельними ресурсами, воно також може становити ризик займання, якщо не планується та не виконується

ретельно. Навмисні підпали також сприяють виникненню лісових пожеж, спричинених людиною.

Таблиця 1.1 – Основні етапи управління пожежею

	Фаза розвитку	Дії
	Докризова фаза	Моделювання ризиків Картування ризиків пожежі
	Фаза кризи	Виявлення пожеж Моніторинг поширення
	Посткризова фаза	Оцінка збитків

Природні причини в основному включають удари блискавки, які є найпоширенішим нелюдським джерелом займання. Вулканічна активність також може призвести до лісових пожеж, хоча й рідше. Дослідження вказують на значне збільшення кількості лісових пожеж протягом другої половини 20 століття. Значною проблемою у розумінні джерел займання є високий відсоток "невдомих" причин, який в останні роки перевищив 50% [4]. Розробляються передові моделі машинного навчання для атрибуції цих невідомих причин, демонструючи високу точність (93%) у розрізненні природного та людського походження, та розумну точність (55%) у

розрізненні між конкретними типами займань, спричинених людиною. Ці моделі приписали найбільші відсотки невідомих займань використанню обладнання/транспортних засобів, блискавкам та підпалам.

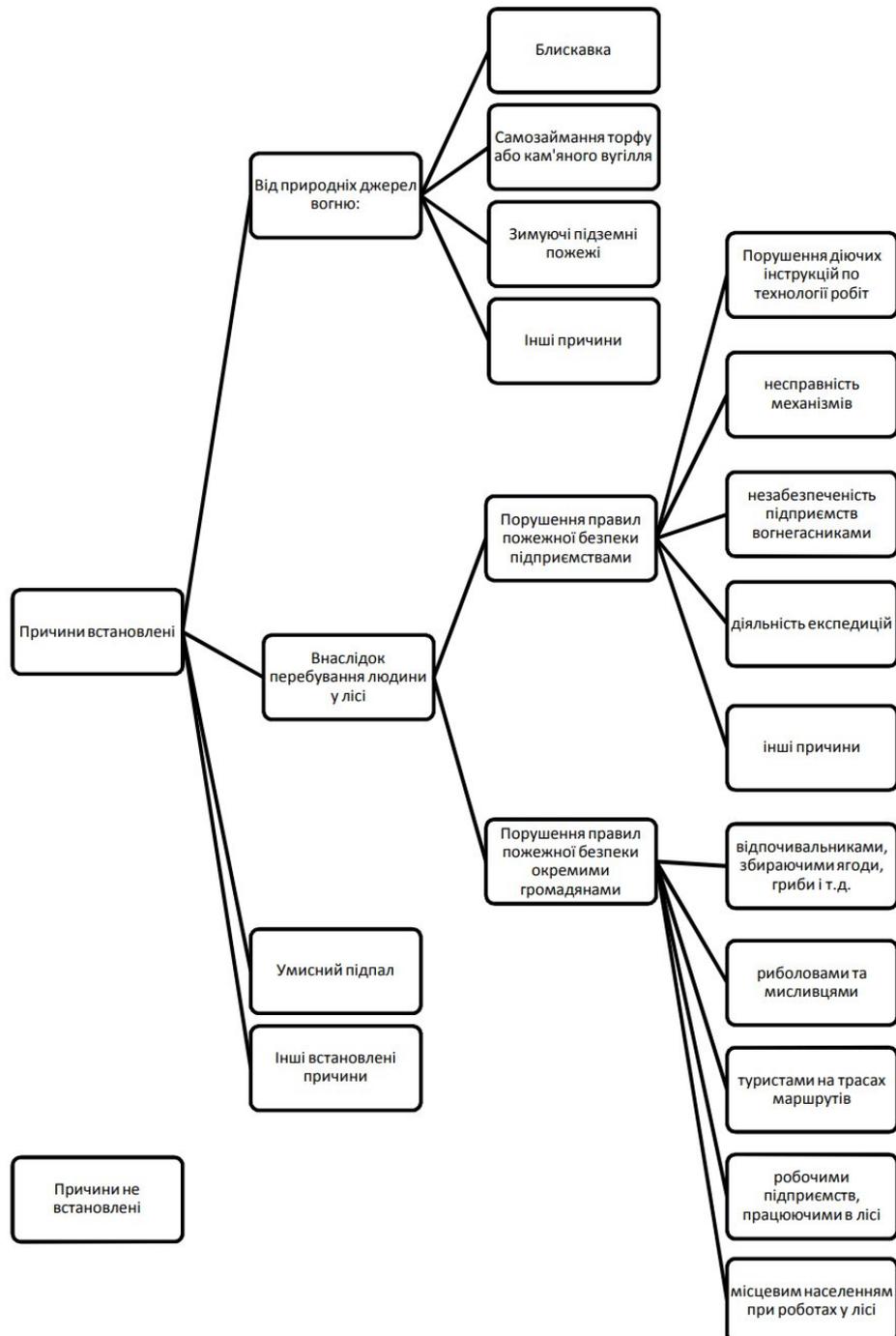


Рисунок 1.1 – Класифікація причин виникнення лісових пожеж

Поведінка лісових пожеж є складною взаємодією різних факторів навколишнього середовища, включаючи стан лісів, переважаючі погодні умови, топографію та існуючі практики управління лісами.

Потепління глобального клімату є основним рушієм підвищення пожежної активності, що призводить до більших та руйнівніших пожеж. Сприяючі метеорологічні фактори включають вищі температури, раніше танення зимового снігового покриву, тепліші нічні температури, що пропонують менше перепочинку, та зменшення літніх опадів. Вітер відіграє критичну роль, штовхаючи тепло та іскри перед фронтом пожежі, спричиняючи швидке поширення вогню та утворення нових осередків займання, а також посилюючи горіння шляхом постачання більшої кількості кисню. Зміна клімату посилює ці умови, подовжуючи періоди посухи та спричиняючи постійно вищі температури [5].

Особливості рельєфу значно впливають на поширення вогню. Крутіші схили прискорюють поширення вогню вгору, тоді як орієнтація схилу до сонця впливає на кількість отриманої сонячної енергії, що впливає на сухість палива. Фізичні бар'єри, такі як струмки та дороги, можуть сповільнювати або зупиняти поширення вогню, тоді як вузькі каньйони можуть направляти вітри та прискорювати поведінку пожежі. Існує критичний зворотний зв'язок, коли лісові пожежі можуть створювати власну погоду. Інтенсивне тепло та волога, що виділяються вогнем, повертаються в атмосферу, створюючи сильні висхідні потоки та локалізовані вітри, які можуть змінювати напрямок приземних вітрів та спричиняти екстремальну поведінку пожежі.

Дослідження переконливо свідчать, що ескалація кризи лісових пожеж не є результатом дії одного фактора, а є синергетичним результатом людської діяльності, зміни клімату та історичних практик управління земельними ресурсами. Переважаюча кількість пожеж, спричинених людиною, у поєднанні з тим, що зміна клімату створює більш спекотні та сухі умови, що збільшують інтенсивність пожеж, а століття придушення пожеж призвело до небезпечного накопичення горючих матеріалів, формує "ідеальний шторм". Людські займання забезпечують іскру в середовищах, які вже підготовлені до екстремальної поведінки пожежі через

посушливість, спричинену зміною клімату, та надлишок легкозаймистого палива, що накопичилося внаслідок минулого виключення вогню. Розширення зони переходу між дикою природою та міською забудовою (WUI) ще більше посилює цю проблему, оскільки людські споруди самі стають легкозаймистим паливом, що підсилює небезпеку. Це складне поєднання факторів пояснює спостережуване збільшення частоти та руйнівності великих лісових пожеж. Таке розуміння вимагає цілісного та інтегрованого підходу до управління лісовими пожежами, що передбачає одночасне зменшення кількості займань, спричинених людиною, адаптацію до наслідків зміни клімату та впровадження стратегічних практик управління паливним навантаженням, а не зосередження на будь-якому окремому компоненті.

Хоча людська діяльність є причиною більшості займань, пожежі, спричинені блискавками, становлять окрему та особливо небезпечну проблему через їхні унікальні характеристики. Це підкреслює критичну потребу в передових, невізуальних технологіях виявлення та спеціалізованих прогностичних моделях. Дослідження прямо вказують, що "прогностичні моделі, розроблені для людської діяльності, просто не працюють при застосуванні до пожеж, спричинених блискавками, що підкреслює нагальну потребу в спеціалізованих підходах, адаптованих до кожного типу пожежі". Ця диференціація в типах займань вимагає двонаправленої стратегії досліджень та управління. Недостатньо просто передбачити, де можуть виникнути пожежі; розуміння того, як вони, ймовірно, займуться (наприклад, людська діяльність проти блискавки), є вирішальним для розробки цільових протоколів запобігання та раннього реагування. Зростаюча тенденція пожеж, спричинених блискавками, через зміну клімату ще більше підкреслює нагальність цього спеціалізованого дослідження.

1.3 Методології виявлення та моніторингу лісових пожеж

Супутникова зйомка стала надзвичайно потужним інструментом для безперервного моніторингу величезних лісових та диких територій. Ці платформи надають критично важливі дані щодо низки параметрів, включаючи стан та щільність

рослинності, рівень вологості ґрунту, температурні аномалії, димові шлейфи та картографування вигорілих територій. Ключовою перевагою супутникового моніторингу є його неперевершена здатність виявляти пожежі у віддалених або недоступних регіонах, пропонуючи комплексний, широкомасштабний огляд пожежної активності на цілих географічних регіонах або навіть континентах [6].



Рисунок 1.2 – Система планування протипожежних заходів

Хоча урядові супутники використовуються для виявлення лісових пожеж десятиліттями, їхні старіші датчики та високі висоти часто обмежують їхню здатність виявляти невеликі пожежі до їх ескалації. Історично вони були більш ефективно використані для відстеження швидкості, напрямку та розміру пожежі. Однак новіші ініціативи, такі як сузір'я FireSat, мають на меті подолати ці обмеження, забезпечуючи вищу роздільну здатність та швидшу передачу даних, надаючи інформацію майже в реальному часі та зменшуючи проблему задимлення. Інфрачервоне (ІЧ) виявлення, зокрема з використанням даних VIIRS, є критично важливим для раннього виявлення.

Ці датчики можуть ідентифікувати теплові сигнатури навіть крізь щільний дим та хмари, забезпечуючи цілодобове виявлення невеликих, зароджуваних пожеж. Програма навчання NASA з прикладного дистанційного зондування (ARSET) надає спеціалізовані тренінги з використання супутникових спостережень для моніторингу передпожежних умов (наприклад, ризику пожежі), активних пожеж (наприклад, виявлення диму) та післяпожежних ландшафтів (наприклад, картографування вигорілих територій). Незважаючи на їхні переваги, існують проблеми, включаючи обмежену роздільну здатність зображень у старих системах, перешкоди від хмарного покриву та потенційні затримки даних. Крім того, час повторного відвідування поточних супутникових датчиків часто вважається недостатнім для динамічних, реальних потреб активних протипожежних операцій.

Дрони представляють собою технологію, що швидко розвивається для виявлення, моніторингу та картографування лісових пожеж. Вони чудово справляються з картографуванням периметра пожежі в реальному часі, використовуючи геоприв'язані теплові зображення, які дозволяють точно визначити активний край пожежі та інтенсивність тепла. Дрони можуть бути оснащені мультиспектральними, тепловими та LiDAR датчиками для збору детальних даних про навколишнє середовище. Вони також використовуються для пошуково-рятувальних операцій (SAR), особливо завдяки їхнім тепловим можливостям. Існує потенціал для використання дронів для точного займання контрольованих випалювань з хірургічною точністю для створення обмежувальних ліній. Нові легкі приймачі GNSS на дронах можуть збирати дані дистанційного зондування про вологість ґрунту та вміст води в листі. Однак, використання дронів стикається з певними труднощами, такими як обмеження дальності польоту, ризик падіння, якщо їх охопить дим або вогонь, а також потреба у спеціальній підготовці та сертифікації для пілотів [7].

Наземні системи відіграють важливу роль у виявленні та моніторингу лісових пожеж. Камери, розташовані поблизу диких територій, можуть моніторити дим або вогонь у реальному часі. Наприклад, у Каліфорнії використовується система штучного інтелекту (ШІ) з понад 1100 камерами по всьому штату для виявлення

пожеж. Датчики, встановлені на деревах або поблизу них, здатні виявляти зміни температури, вологості або дрібних твердих частинок, що можуть вказувати на займання.

Технології інтернету речей (IoT), такі як система Silvanet від Dryad, створюють взаємопов'язані мережі для гіперлокального виявлення пожеж. Ці сонячні, не потребують обслуговування газові датчики виявляють слідові кількості газів, пов'язаних з пожежами (оксид вуглецю, водень, леткі органічні сполуки), на молекулярному рівні, пропонуючи надраннє виявлення до появи видимого полум'я або диму. Системи, що працюють на основі ШІ (наприклад, SmokeD, Torch Sensors), забезпечують цілодобове спостереження, розрізняють сигнали лісових пожеж від фонового шуму навколишнього середовища, використовують машинне навчання для підвищення точності та надсилають миттєві сповіщення з точними GPS-координатами, прямими трансляціями та аналізом серйозності. Наприклад, система SmokeD може виявити дим на відстані до 10 миль і надіслати сповіщення протягом 10 хвилин [8].

Еволюція методів виявлення лісових пожеж демонструє фундаментальний перехід від реактивного спостереження, що часто залежало від людини та було сповільненим (наземні патрулі, спостережні вежі, повітряне спостереження з часом реагування в "години"), до високоавтоматизованих систем, що працюють у реальному часі та мають прогностичні можливості. Інтеграція штучного інтелекту з дистанційним зондуванням (супутники, дрони) та наземними датчиками дозволяє виявляти пожежі на ранніх стадіях. Ці системи здатні ідентифікувати показники ризику пожежі (температурні аномалії, сухість рослинності, викиди газів) та зароджувані пожежі за години або навіть дні до того, як вони стануть видимими неозброєним оком. Ця трансформація змінює парадигму реагування на лісові пожежі, переходячи від переважно гасіння до запобігання та раннього локалізації, що має значні наслідки для збереження життів, майна та зменшення загальних витрат. Це також підкреслює зростаючу важливість злиття даних та передової аналітики [9].

Хоча розповсюдження різноманітних технологій виявлення (супутники, дрони, наземні датчики, камери) пропонує безпрецедентне охоплення та деталізацію, воно

також створює величезну проблему управління даними. Без ефективної інтеграції та управління даними повний потенціал цих передових систем виявлення не може бути реалізований. Це створює вузьке місце, де технологічні досягнення у зборі даних випереджають здатність ефективно обробляти та використовувати ці дані для прийняття рішень. Це також вказує на потребу в надійних ГІС та платформах ШІ, які можуть об'єднувати розрізнені джерела даних. Майбутні дослідження та розробки повинні зосереджуватися не лише на створенні нових датчиків, а й на розробці сумісних платформ даних, передової аналітики та систем підтримки прийняття рішень для перетворення необроблених даних на дієву інформацію для скоординованого реагування.

1.4 Моделювання поведінки та прогнозування пожеж

Моделювання лісових пожеж використовує чисельні симуляції для розуміння та прогнозування поведінки вогню, що допомагає в гасінні, підвищує безпеку пожежників та населення, а також мінімізує збитки. Ранні моделі припускали однорідність рельєфу та рослинності, використовуючи прості форми, такі як еліпси. Сучасні моделі росту поєднують минулі описи з принципом Гюйгенса для симуляції росту пожежі як безперервно розширюваного багатокутника. Ключові вхідні дані включають моделі палива (тип, вологість, кількість, розташування), швидкість вітру та крутизну схилу [10].

Модель поширення вогню Ротермеля (1972) є фундаментальною, широко використовуваною емпіричною моделлю, на яку посилаються Міністерство сільськогосподарства США та Лісова служба США. Вона групує вхідні дані за чотири основні категорії: тип палива, вологість палива, топографія та погода. Вона передбачає однорідність палива для невеликих площ та коротких періодів часу. Інші моделі, такі як Канадська лісова служба (CFS) Acceleration, McAlpine and Wakimoto, CALM Spinifex та Канадська модель прогнозування поведінки лісових пожеж (CFBP), базуються або модифікують модель Ротермеля. Фізичні моделі

розроблені Альбіні Ф.А. (США) базуються на фундаментальних законах фізики, збереження та теоретичних обґрунтуваннях [11].

Моделі клітинних автоматів (КА): Моделі КА (наприклад, Дросселя та Швабля, Хенлі) є динамічними системами, що демонструють самоорганізовану критичність, часто використовуються для дослідження математичних основ, а не для точного моделювання поведінки пожежі. Вони симулюють поширення вогню на сітці, де клітини можуть бути порожніми, зайнятими деревом або горіти, з правилами для горіння, займання та росту дерев. Покращені моделі КА інтегруються з ГІС та включають основні детермінанти, такі як напрямок/швидкість вітру, щільність рослинності, точкові займання та імовірнісні переходи. Вони є гнучкими та можуть динамічно симулювати складну динаміку пожежі на різних ландшафтах [12].

Зв'язані моделі атмосфера-вогонь: Ці моделі забезпечують баланс між представленням фізичних процесів та обчислювальними ресурсами. WRF-SFIRE є яскравим прикладом, що поєднує модель дослідження та прогнозування погоди (WRF) з моделлю поширення вогню, реалізованою методом рівня. Вона явно прогнозує ріст пожежі, підйом та розсіювання шлейфу в умовах динамічно мінливої погоди та вологості палива. Вона симулює поширення фронту пожежі на основі її взаємодії з нижньою атмосферою (вітри) та поверхнею (рельєф, паливо), зі зворотним зв'язком тепла та вологи в атмосферу. NOAA інтегрує модель поведінки пожежі спільноти (CFBM), яка тісно слідує методам WRF-Fire, у свою уніфіковану систему прогнозування (UFS) для прогнозування поширення існуючих пожеж за допомогою супутникових даних. Це дозволяє отримувати своєчасні та точні прогнози погоди, поведінки пожежі та диму. Ці моделі визнають, що пожежа та погода є взаємопов'язаними явищами, що впливають на місцеву циркуляцію, генеруючи вихори та викликаючи конвекцію, виробляючи дим, який заважає утворенню хмар та опадів [13].

Масове збільшення доступності даних спостережень Землі дозволило розробити моделі прогнозування лісових пожеж на основі глибокого навчання, що забезпечують точні карти ймовірності лісових пожеж у різних просторових та часових масштабах.

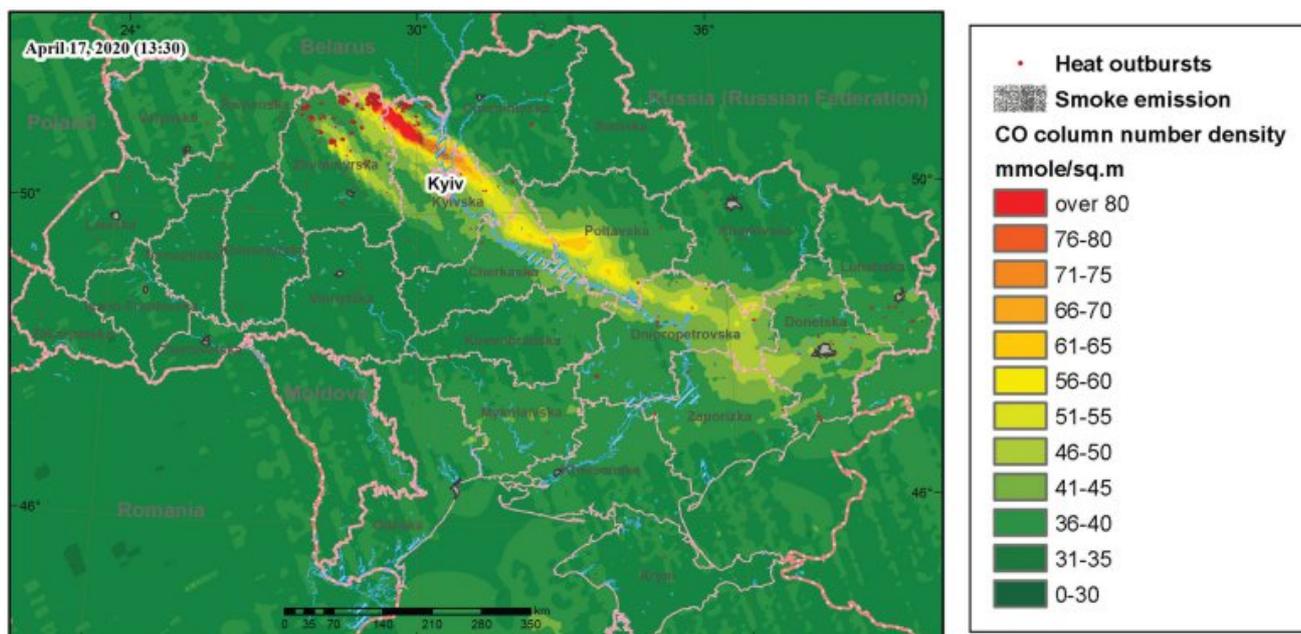


Рисунок 1.3 – Просторовий розподіл загального вмісту CO в атмосфері 17.04.2020 р. під час масштабних лісових пожеж

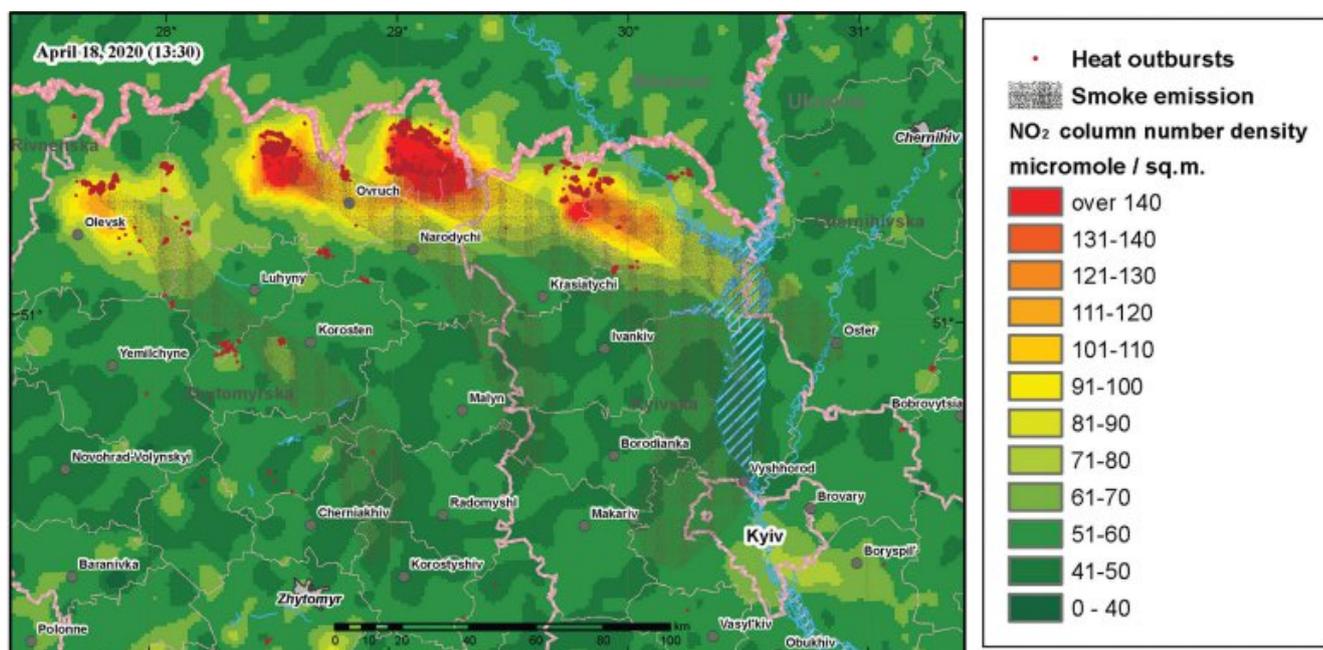


Рисунок 1.4 – Просторовий розподіл загального вмісту NO₂ в атмосфері 18.04.2020 р. під час масштабних лісових пожеж на півночі України

Моделі машинного навчання (МН) фіксують статистичні зв'язки між вигорілою площею та факторами навколишнього середовища, перевершуючи моделі, засновані на процесах, у прогнозуванні вигорілої площі. Модель "Ймовірність пожежі" (PoF)

використовує МН для прогнозування виникнення пожеж у всьому світі з високою роздільною здатністю, до десяти днів наперед, використовуючи різноманітні набори даних (ECMWF IFS, дані про земний покрив, моделі характеристик палива, історичні супутникові спостереження). PoF є обчислювально дешевшою, ніж традиційні фізичні моделі. Моделі МН покращують прогностичні здібності, включаючи додаткові параметри, крім погоди, такі як присутність людини, активність блискавок, кількість рослинності та її сухість. Високоякісні дані, особливо щодо вологості рослинності та доступності палива, є вирішальними для точності. Моделі МН використовуються для визначення "невідомих" джерел займання з високою точністю. Генеративні моделі ШІ (GAN, VAE) досліджуються для прогнозування поширення вогню, симуляції динаміки лісових пожеж та генерації синтетичних сценаріїв пожежі.

Застосування штучного інтелекту (ШІ): ШІ підвищує інтелект лісових пожеж, аналізуючи величезні набори даних у реальному часі, ідентифікуючи закономірності, генеруючи точні прогнози поширення вогню та оптимізуючи розподіл ресурсів. Алгоритми ШІ покращують точність виявлення лісових пожеж та зменшують кількість помилкових спрацьовувань. Системи на основі ШІ інтегруються з ГІС для геопросторового аналізу, ідентифікуючи пожежонебезпечні зони, виявляючи температурні аномалії та відстежуючи сухість рослинності. Попередньо навчені геопросторові моделі ШІ доступні для реагування на катастрофи, включаючи класифікацію лісових пожеж та диму, делінеацію лісових пожеж та сегментацію шрамів від вигорання. Моделі ШІ є вирішальними для точних прогнозів лісових пожеж та готовності до надзвичайних ситуацій, особливо з огляду на зростаючі наслідки зміни клімату [14].

Поле досліджень лісових пожеж рухається до гібридних фреймворків, які поєднують механістичне розуміння фізичних моделей з прогностичною потужністю моделей машинного навчання, що базуються на даних. Традиційні фізичні моделі, такі як Ротермель та WRF-SFIRE, надають розуміння того, як поширюється вогонь, базуючись на фізичних принципах та вхідних даних. Водночас, моделі машинного навчання, використовуючи величезні набори даних, чудово справляються з прогнозуванням де і коли з високою точністю, виявляючи складні статистичні зв'язки.

Інтеграція цих підходів, наприклад, через гібридний фреймворк ML4Fire-XGB, що інтегрує модель XGBoost з моделлю земної поверхні E3SM, дозволяє створити більш комплексну та точну систему прогнозування. Це дозволяє враховувати складні взаємодії між вогнем, займанням, кліматом та діяльністю людини, які спрощуються в суто процесно-орієнтованих моделях. Ця конвергенція є значним кроком уперед у прогностичних можливостях, дозволяючи отримувати більш своєчасні та дієві прогнози, які можуть краще інформувати управління пожежами та розподіл ресурсів, особливо в контексті зміни клімату [15].

Ефективність моделей штучного інтелекту та машинного навчання фундаментально залежить від якості, роздільної здатності та різноманітності вхідних даних. Дослідження підкреслюють вирішальне значення "глобальних супутникових даних високої роздільної здатності", "різноманітних наборів даних" та "високоякісних даних, таких як інформація про вологість рослинності та доступність палива" для підвищення точності прогнозування. Обмеження існуючих супутникових даних, таких як MODIS, що може пропускати невеликі пожежі або бути закритим хмарами, ще більше підкреслюють постійну потребу в удосконаленні збору даних. Це включає розробку нових супутникових угруповань, які забезпечують частіші та мультиспектральні дані. Без безперервного покращення вхідних даних, повний потенціал навіть найскладніших алгоритмів штучного інтелекту буде обмежений. Це означає, що інвестиції в дослідження повинні бути збалансовані між розробкою алгоритмів та інфраструктурою для отримання високоякісних, різноманітних даних, включаючи нові супутникові угруповання та наземні сенсорні мережі.

1.5 Оцінка ризиків та вразливості

Системи оцінки пожежної небезпеки використовуються для визначення ймовірності виникнення пожежі та потенційної її інтенсивності.

Канадський індекс пожежної погоди (FWI): Широко використовується, пов'язуючи погодні умови (метеорологічні дані) з пожежною активністю для створення індексу ризику. Він оцінює вологість палива на основі метеорологічних

умов для типового канадського лісового паливного ложа. Глобальна інформаційна система про лісові пожежі (GWIS) використовує FWI, що відображається у 6 класах (від низького до дуже екстремального), з прогнозами від моделей ECMWF, MeteoFrance та NASA Goes-5 [16].

Національна система оцінки пожежної небезпеки (NFDRS): Створює карти пожежної небезпеки з прогнозом на 1 день. Компоненти включають:

- ~ Компонент займання (IC): Оцінка ймовірності того, що іскра спричинить пожежу, що вимагає заходів з гасіння (шкала від 0 до 100).
- ~ Компонент поширення (SC): Оцінка швидкості поширення фронту пожежі (відкрита шкала без верхньої межі).
- ~ Компонент виділення енергії (ERC): Число, пов'язане з доступною енергією (БТЕ на одиницю площі), що виділяється у зоні полум'я на чолі пожежі. Він відображає сукупну вологість палива та умови посухи, є кумулятивним індексом, стабільним для планування на 24-72 години.

Серед інших індексів – Австралійський індекс пожежної небезпеки лісів МакАртура (MARK-5) та Індекс посухи Кітча-Байрама (KBDI). Обмеження традиційних систем, таких як FWI, полягають у тому, що вони схильні переоцінювати ризик у районах з обмеженим паливом, їх застосовність є складною в різних екосистемах, і вони переважно оцінюють вологість палива на основі метеорологічних умов, не враховуючи вологість живої рослинності або фактичну кількість палива. Вони також не враховують непередбачувані займання, спричинені людиною.

Геопросторові технології (дистанційне зондування та ГІС) є важливими для вивчення лісових пожеж у різних часових та просторових масштабах, забезпечуючи ефективні та кількісні методи управління лісовими пожежами. Застосування включає управління передпожежними умовами (картографування пожежної небезпеки, картографування пожежного ризику, картографування палива), моніторинг пожежних умов (виявлення гарячих точок, теплові параметри) та управління післяпожежними умовами (картографування вигорілих територій, інтенсивність вигорання, ерозія ґрунту, відновлення рослинності). Ризик лісових пожеж

визначається як поєднання ймовірності та інтенсивності (небезпеки) та експозиції та вразливості (вразливості).

Методології оцінки ризиків:

- ~ Кількісна оцінка ризику лісових пожеж (QWRA) характеризує прогнозовані переваги та загрози від пожежі для різних цінностей у ландшафті. Вона враховує ймовірність виникнення пожежі, інтенсивність та вплив на високоцінні ресурси або активи (HVRRA), а також їх важливість.
- ~ Основні моделі для оцінки ризиків включають ймовірність вигорання (ймовірність виникнення пожежі в певній зоні з урахуванням історичних випадків, погодних умов, стану палива) та інтенсивність пожежі (прогнозує довжину полум'я на основі типу палива, погодних умов та топографії).
- ~ Картографування використовується для візуалізації оцінок пожежного ризику, часто за допомогою операційних систем на основі точкових метеорологічних даних та дистанційного зондування/ГІС.
- ~ Метод зваженого накладання (WOA) у поєднанні з методом аналітичної ієрархії (АНР) використовується для створення карт вразливості до лісових пожеж на основі таких критеріїв, як характеристики лісу, людські фактори, рельєф та клімат.
- ~ Платформи, такі як "Ризик лісових пожеж для громад", надають національно узгоджені дані про рослинність, моделі палива для поведінки пожежі, топографію, останні погодні умови та довгострокові симуляції для категорій ризику (низький, середній, високий, дуже високий).

Картографування вразливості визначає території, схильні до пожеж, на основі динамічних та статичних, біотичних та абіотичних факторів. Воно може показувати класи вразливості (дуже висока, висока, середня, низька та дуже низька). Платформи ГІС (наприклад, Esri ArcGIS, панелі FEMA, Wildfire Viewer) є критично важливими для інтеграції та візуалізації даних про лісові пожежі, включаючи поточні та історичні периметри, гарячі точки та оцінки ризиків. Вони підтримують прийняття рішень у реальному часі, розгортання ресурсів та громадську комунікацію [17].

Еволюція методологій оцінки ризиків лісових пожеж демонструє перехід від статичних, узагальнених індексів небезпеки, що базуються переважно на погодних умовах та вологості палива, до динамічного, просторово-явного картографування ризиків та вразливості. Сучасні підходи, що використовують ГІС та дистанційне зондування, інтегрують значно ширший спектр факторів, включаючи людську діяльність, топографію та цінність активів. Це дозволяє здійснювати більш деталізоване, локалізоване та дієве управління ризиками, виходячи за рамки широкої оцінки займистості до детального розуміння того, де пожежі найбільш ймовірні, наскільки інтенсивно вони горітимуть та які конкретні активи є найбільш вразливими. Ця еволюція дозволяє здійснювати проактивні, просторово оптимізовані втручання.

1.6 Екологічні наслідки та відновлення екосистем

Лісові пожежі мають глибокий, довгостроковий вплив на екосистеми, змінюючи рослинний покрив, руйнуючи середовища існування та погіршуючи якість води та повітря.

Пожежі можуть знищувати флору та фауну, руйнувати середовища існування та фрагментувати екосистеми. Особливо вразливими є види, що перебувають під загрозою зникнення. Вогнестійкі види можуть стати домінуючими, зменшуючи загальне біорізноманіття. Однак вогонь також є природною частиною багатьох екосистем, сприяючи біорізноманіттю, переробляючи поживні речовини, зменшуючи накопичення органічних залишків та викликаючи зміни у складі рослинних угруповань. Результат залежить від інтенсивності, частоти та залученої екосистеми. Нехарактерно великі, високоінтенсивні пожежі перешкоджають відновленню екосистем, призводячи до постійної втрати місцевої рослинності, розширення немісцевих, інвазивних видів та втрати необхідних середовищ існування для місцевих видів. Деякі тварини отримують вигоду (наприклад, лосі у ранніх сукцесійних лісах, дятли у мертвих деревах, бізони у вигорілих районах), тоді як інші (наприклад, лісові карібу) страждають від втрати середовища існування [18].

Довгострокове пошкодження здоров'я ґрунту обмежує відновлення екосистеми. Високоінтенсивні пожежі можуть призвести до втрати органічної речовини та джерел насіння, викликаючи зміни у складі лісів. Збільшення ерозії та втрати ґрунту через знищену рослинність (коріння більше не стабілізує ґрунт) та відсутність захисту від опадів. Це може призвести до опустелювання у районах, що постійно вигоряють.

Значне збільшення стоку дощових вод через втрату рослинності та зменшення здатності ґрунту поглинати воду. Стік несе попіл, поживні речовини, відкладення, важкі метали та токсини у струмки, річки та водосховища, погіршуючи якість води та збільшуючи витрати на очищення. Може вивільняти ртуть з ґрунту/рослин у водні шляхи, забруднюючи рибу та створюючи ризики для здоров'я. Вплив може тривати роками або десятиліттями. Здорові лісові екосистеми є критично важливими для зберігання та фільтрації водних ресурсів [19].

Лісові пожежі залишають шрами, які можуть загоюватися десятиліттями, принципово змінюючи середовища. Відновлення лісів варіюється залежно від екосистеми та типу пожежі; утворення саджанців зазвичай відбувається протягом 10 років, але перехід до зрілого лісу може зайняти понад 50 років. Повторні, сильні пожежі можуть призвести до невдач у відновленні, і території можуть більше не нагадувати ліс. Зрілі дерева стійкі до зміни клімату, але пожежа може знищити їх, сприяючи переходу екосистем.

Стратегії стійкості:

- ~ Захист здорових лісових екосистем є важливим для кліматичних дій, якості повітря та водних ресурсів.
- ~ Контрольовані випалювання є ключовим інструментом для підвищення стійкості шляхом зменшення паливного навантаження, переробки поживних речовин та сприяння новому росту, імітуючи природні цикли пожеж. Вони можуть бути регенеративними та підтримувати здоров'я ґрунту, на відміну від катастрофічних пожеж.
- ~ Інтегроване управління пожежами поєднує запобігання, реагування та відновлення, інтегруючи екологічні, соціально-економічні та культурні фактори.
- ~ Програми післяпожежного відновлення, такі як Програма екстреного реагування

на вигорілі території (BAER) та Реабілітація вигорілих територій (BAR), спрямовані на усунення безпосередніх загроз (ерозія, повені) та довгострокове відновлення (лісовідновлення, відновлення середовищ існування).

Аналіз даних виявляє критичний парадокс: хоча високоінтенсивні, нехарактерні лісові пожежі є руйнівними, вогонь також є невід'ємним природним процесом для багатьох екосистем. Відмінність полягає в типі та режимі вогню. Метою є не повне усунення вогню, а управління режимами пожеж для сприяння сприятливим екологічним результатам, таким як кругообіг поживних речовин, сприяння біорізноманіттю та зменшення паливного навантаження, водночас запобігаючи руйнівним пожежам. Це розуміння лежить в основі концепції "життя з вогнем" та проактивного управління паливним навантаженням. Це також підкреслює необхідність цілісного підходу до управління, який визнає складну екологічну роль вогню [20].

1.7 Стратегії управління та зменшення наслідків

Оскільки більшість лісових пожеж спричинені людьми, зусилля з їх запобігання є вирішальними. Це включає перевірку погодних умов та умов посухи, уникнення будь-якої діяльності, що включає вогонь або іскри, під час спекотної, сухої та вітряної погоди. Важливими є безпечні практики розведення багаття (відкрите місце, подалі від легкозаймистих матеріалів, повне гасіння до охолодження). Безпека транспортних засобів (уникнення паркування на сухій траві, регулярне технічне обслуговування, іскрогасники, наявність протипожежних засобів) також є ключовою. Правильна утилізація тютюнових виробів, відповідальне спалювання садових відходів/сміттята безпечне використання феєрверків також є важливими аспектами запобігання.

Зменшення небезпечного накопичення палива (гілок, трав, соснової хвої) є важливим. Стратегії включають механічне проріджування, обрізку, мульчування, косіння та контрольоване випалювання. Створення "захисного простору" навколо будинків шляхом управління рослинністю (видалення легкозаймистих матеріалів, косіння трави, обрізка дерев, створення вільного простору між кущами) та

використання вогнестійких рослин є ефективним. "Захист будівель" передбачає модифікацію конструкцій, щоб зробити їх більш стійкими до займання від прямого полум'я, променистого та конвективного тепла, а також від палаючих іскор, що можуть потрапити на будинок або поблизу нього [21].

Контрольовані випалювання – це заплановані, контрольовані пожежі, які проводяться навченими фахівцями за певних погодних умов для досягнення цілей управління.

Переваги:

- ~ Зменшують ризики лісових пожеж шляхом очищення небезпечного накопичення палива, зменшуючи інтенсивність майбутніх лісових пожеж.
- ~ Покращують середовища існування диких тварин.
- ~ Сприяють новому росту рослин та підтримці екосистем.
- ~ Ефективніше переробляють поживні речовини в ґрунт, ніж природний розклад.
- ~ Готують території для посіву/посадки.
- ~ Контролюють шкідників та хвороби.
- ~ Покращують можливості для відпочинку.
- ~ Підвищують здоров'я та стійкість лісів.
- ~ Захищають громади, джерела води та сприяють безпеці пожежників.

Ефективність: Довгострокові дослідження показують, що поєднання контрольованих випалювань та механічного проріджування є ефективним для зменшення ризику лісових пожеж, що призводить до менш інтенсивних пожеж, вищої виживаності дерев та стабільних запасів вуглецю. Це також підвищує стійкість лісів до таких порушень, як зараження короїдами.

Вимагає ретельного планування та виконання, навчених фахівців та дотримання певних погодних умов для зменшення впливу диму. Дослідження контрольованих випалювань мають географічні упередження, домінують дослідження з країн з високим рівнем доходу, і потребують більшого міждисциплінарного вивчення їх використання та наслідків у різноманітних екосистемах та недопредставлених регіонах, особливо в контексті зміни клімату. Вплив забруднення повітря та здоров'я стає все більш помітною темою досліджень [22].

Гасіння лісових пожеж передбачає залучення навчених бригад, пожежних машин, інструментів, протипожежних пін та вогнегасних речовин.

Методи: Пряма атака (змочування, задушення, хімічне гасіння, фізичне відділення палива) застосовується безпосередньо до палаючого палива.

Технологічні інновації:

- ~ Повітряні протипожежні літаки.
- ~ Дрони тестуються на предмет різних проблем безпеки перед широким впровадженням у гасіння.
- ~ Геопросторовий аналіз на основі ШІ допомагає оптимізувати час реагування, прогнозувати ризики та ефективно розподіляти ресурси, надаючи інформацію в реальному часі (планування будівель, розташування гідрантів, наявність персоналу).
- ~ Картографування ГІС підвищує ситуаційну обізнаність пожежників та керівників інцидентів.
- ~ Необхідні єдині інструменти та централізовані системи для отримання загальної картини даних у реальному часі від різних суб'єктів.

Інтегроване управління пожежами (ІУП): Це цілісний підхід, що поєднує запобігання пожежам, реагування на них та відновлення після них, інтегруючи екологічні, соціально-економічні та культурні фактори. Він балансує ризики руйнівних пожеж з перевагами необхідних пожеж.

- ~ Має на меті адаптуватися до змінених режимів пожеж та пом'якшувати наслідки.
- ~ Залежить від контексту, охоплюючи широкий спектр практик.
- ~ Рамка для оцінки шкідливих/корисних/нейтральних наслідків, зважування переваг/ризиків та відповідного реагування.

Громади, адаптовані до пожеж: громади, оснащені та підготовлені до безпечного співіснування з лісовими пожежами.

- ~ Включає комплексний підхід: реагування на надзвичайні ситуації, можливості пожежогасіння, профілактичні заходи (захисний простір, вогнестійкі будівельні матеріали), ефективне планування землекористування та регулярні заходи з обробки палива.

- ~ Вирішальна співпраця між мешканцями, місцевими органами влади, пожежними службами та зацікавленими сторонами.
- ~ Стратегії включають: виявлення ризику для громади, створення планів дій (Плани захисту громади від лісових пожеж - CWPP), налагодження партнерських відносин, вжиття заходів та підтримка/переоцінка зусиль.
- ~ CWPP оцінюють небезпеку лісових пожеж та надають рекомендації щодо готовності, пом'якшення та запобігання на рівні пожежного району.
- ~ Залучення громади та участь є важливими.
- ~ Політика планування землекористування, що включає буферні зони відкритого простору та водні ресурси, є ефективною проти лісових пожеж.

Зона переходу між дикою природою та міською забудовою (WUI): Це територія, де людська забудова зустрічається з дикою рослинністю. Ця зона становить найбільший ризик для будинків та громад. Площі WUI зростають, посилюючи проблему. Управління тут є критично важливим.

Дослідження вказують на чітку еволюцію у філософії управління лісовими пожежами. Замість того, щоб зосереджуватися виключно на придушенні всіх пожеж, дедалі більший акцент робиться на розумінні екологічної ролі вогню та розробці стратегій для громад та екосистем, щоб адаптуватися та співіснувати з вогнем. Цей зсув парадигми визнає, що вогонь є природним процесом, а повне придушення призводить до накопичення палива. Тому мета полягає в управлінні режимами пожеж для сприяння сприятливим екологічним результатам та запобігання руйнівним. Це передбачає проактивне управління паливним навантаженням, зміцнення громад та інтегроване планування. Це означає використання "корисного вогню" (контрольовані випалювання) для зменшення ризику "шкідливого вогню" та підвищення стійкості громад через захисний простір та зміцнення будівель. Це зміна від постійної боротьби проти вогню до життя з ним.

Зона переходу між дикою природою та міською забудовою (WUI) неодноразово визначається як зона найвищого ризику та місце, де людська забудова зустрічається з легкозаймистими дикими територіями. Її безперервне зростання означає, що ефективні стратегії управління повинні надавати пріоритет цьому інтерфейсу,

інтегруючи планування землекористування, зміцнення будинків та залучення громади. WUI – це не просто географічна межа; це критичний виклик управління, оскільки він концентрує людські активи та легкозаймисте паливо, створюючи надзвичайно нестабільне середовище. Зростання WUI безпосередньо пов'язує розширення населення зі збільшенням ризику лісових пожеж та економічних збитків. Отже, ефективне управління лісовими пожежами повинно зосереджуватися на WUI, інтегруючи такі стратегії, як захисний простір, зміцнення будинків та планування землекористування. Це означає, що політичні втручання щодо міського планування та будівельних норм у районах WUI є такими ж важливими, як і екологічне управління паливом. Дослідження та ресурси повинні бути значною мірою спрямовані на розуміння та пом'якшення ризиків саме в цьому складному інтерфейсі, сприяючи формуванню "громад, адаптованих до пожеж" через спільні зусилля. WUI представляє найбільш відчутний прояв "складного завдання" лісових пожеж, де людський вибір безпосередньо взаємодіє з природними процесами, щоб посилити ризик.

2 ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКІВ

2.1 Характеристика лісових пожеж за допомогою супутникових даних Landsat-8

Лісові пожежі є однією з найруйнівніших природних небезпек, що мають глибокі наслідки для глобальних екосистем, людського життя, майна та якості повітря. Зростаюча частота та інтенсивність цих подій, часто посилювані зміною клімату та тривалими посухами, підкреслюють нагальну потребу в надійних можливостях моніторингу. Точні та повні дані про місця пожеж та вигорілі території є абсолютно необхідними. Така інформація дозволяє кількісно оцінювати тенденції пожеж, характеризувати їхні рушійні сили, прогнозувати майбутню поведінку вогню та ретельно оцінювати вплив на природні та соціальні системи. Ці дані є життєво важливими для розробки планів аварійної реабілітації та відновлення, оцінки забруднення повітря від горіння та збереження біорізноманіття. Збільшення масштабів та інтенсивності лісових пожеж, особливо в контексті глобальних кліматичних змін, робить моніторинг пожеж дедалі важливішим для ефективного управління природними ресурсами та реагування на надзвичайні ситуації.

Супутникове дистанційне зондування стало надзвичайно ефективним та швидким методом моніторингу лісових пожеж на величезних і часто недоступних територіях, ефективно долаючи властиві обмеження та високі витрати, пов'язані з традиційними наземними обстеженнями. Ця технологія надає динамічну, просторово-визначену інформацію про пожежну активність, її масштаби та зміни після пожежі, пропонуючи критично важливі відомості, які важко або неможливо отримати іншими засобами. Можливість швидкого доступу до даних та динамічного моніторингу вигорілих територій на глобальному рівні підкреслює, що дистанційне зондування є не просто альтернативою, а фундаментальним та незамінним компонентом сучасного управління лісовими пожежами. Це свідчить про докорінну зміну підходів до моніторингу пожеж, переходячи до використання

широкомасштабних, ефективних та інформаційно насичених супутникових спостережень, особливо в умовах зростання кількості мегапожеж [23].

Програма Landsat, спільна ініціатива Геологічної служби США (USGS) та NASA, є найдовшою у світі системою супутників для оптичного дистанційного зондування з помірною роздільною здатністю, що забезпечує безперервне спостереження за сушею, прибережними районами та мілководдям. З 1970-х років супутники Landsat постійно збирають інформацію, що стосується лісових пожеж, створюючи послідовний, довгостроковий архів даних. Ця історична безперервність є безцінною для розуміння еволюції впливу пожеж та траєкторій відновлення після пожеж протягом десятиліть. Landsat 8, запущений 11 лютого 2013 року, є значним кроком вперед у цій програмі, включаючи вдосконалені можливості сенсорів, що базуються на його попередниках. Він відіграє вирішальну роль у підтримці безперервності цього життєво важливого потоку даних для управління земельними ресурсами та моніторингу навколишнього середовища. Ця унікальна перевага Landsat полягає не лише в моніторингу поточних подій, але й у наданні фундаментального ресурсу для вивчення історичної екології пожеж, довгострокової екологічної сукцесії та кліматично обумовлених змін у режимах пожеж. Ця історична перспектива забезпечує критично важливий контекст, який новіші супутники з вищою часовою роздільною здатністю, але без такого тривалого запису, не можуть запропонувати, що робить Landsat незамінним для розуміння довгострокових екологічних процесів [24].

Landsat 8 є ключовим інструментом для моніторингу лісових пожеж завдяки своїм унікальним інструментам та характеристикам даних.

Landsat 8 оснащений двома основними інструментами: операційним наземним імітатором (OLI) та термальним інфрачервоним сенсором (TIRS). Сенсор OLI призначений для вимірювання відбитої енергії у видимій, ближній інфрачервоній (NIR) та короткохвильовій інфрачервоній (SWIR) частинах електромагнітного спектра (VNIR, NIR та SWIR). Він складається з дев'яти окремих спектральних діапазонів, включаючи панхроматичний діапазон, які є критично важливими для детальної характеристики земного покриву.

Інструмент TIRS спеціально розроблений для вимірювання температури земної поверхні за допомогою двох термальних діапазонів (Діапазон 10 та Діапазон 11). Він використовує нову технологію, що застосовує квантову фізику для виявлення тепла, що робить його безцінним інструментом для управління водними ресурсами. Наявність як OLI, так і TIRS на Landsat 8 є не просто набором сенсорів, а скоріше синергетичним дизайном для моніторингу пожеж. Оптичні діапазони OLI (VNIR, NIR, SWIR) чудово підходять для характеристики стану рослинності, паливних навантажень та вигорілих ділянок після пожежі, надаючи інформацію про стан землі. Натомість, термальні діапазони TIRS безпосередньо виявляють теплові аномалії, що є важливим для ідентифікації активних пожеж. Це означає, що Landsat 8 пропонує більш цілісний та багатовимірний погляд на управління пожежами, ніж супутники, оснащені лише оптичними або лише термальними можливостями, що дозволяє як негайне виявлення пожеж, так і подальшу оцінку їхнього впливу [25].

Для моніторингу пожеж особливо цінними є такі діапазони Landsat 8 OLI: Діапазон 5 (Ближній інфрачервоний), Діапазон 6 (SWIR 1) та Діапазон 7 (SWIR 2). Короткохвильові інфрачервоні (SWIR) діапазони (Діапазон 6 та Діапазон 7) є високоефективними для виявлення та картографування вигорілих територій завдяки їхній здатності проникати крізь сильний дим та їхній чутливості до вмісту вологи в ґрунті та рослинності. Ближній інфрачервоний (NIR) діапазон (Діапазон 5) є критично важливим для підкреслення вмісту біомаси.

Термальні інфрачервоні (TIR) діапазони (Діапазон 10 та Діапазон 11) від TIRS є незамінними для термального картографування, оцінки вологості ґрунту та безпосереднього виявлення теплових аномалій, пов'язаних з активними пожежами. Дослідження показують, що вигорілі території можуть мати температуру на 5-6°C вищу, ніж не вигорілі ділянки, протягом місяця після пожежі, що підкреслює корисність цих діапазонів для виявлення термальних сигнатур після пожежі. Описи того, як SWIR-діапазони "можуть проникати крізь сильний дим", а TIR-діапазони "зазвичай використовуються для виявлення вигорілих ділянок під час пожежі", встановлюють прямий причинно-наслідковий зв'язок між фізичними властивостями пожежі (тепло, обвуглювання, дим) та конкретними спектральними відгуками, що

фіксуються цими діапазонами. Це означає, що ці конкретні спектральні області чутливі до фундаментальних фізичних та хімічних змін, викликаних пожежею (наприклад, карбонізація, втрата вологи, термічне випромінювання), що робить їх за своєю суттю кращими за видимі діапазони для точної ідентифікації пожежної активності та її наслідків. Це розуміння безпосередньо впливає на вибір діапазонів для різних пожежних індексів та алгоритмів.

Таблиця 2.1 – Спектральні діапазони Landsat 8 OLI та TIRS, що мають відношення до моніторингу пожеж

Діапазон	Довжина хвилі (мкм)	Просторова роздільна здатність (м)
5 (NIR)	0.85 - 0.88	30
6 (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30
7 (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30
8 (Panchromatic)	0.50 - 0.68	15
10 (TIRS 1)	10.60 - 11.19	100 (передискретизовано до 30)
11 (TIRS 2)	11.50 - 12.51	100 (передискретизовано до 30)

Зображення Landsat 8 пропонують багатоспектральну просторову роздільну здатність 30 метрів для більшості діапазонів OLI (Діапазони 1-7, 9) та більш точну панхроматичну просторову роздільну здатність 15 метрів для Діапазону 8. Термальні діапазони TIRS (10 та 11) мають власну роздільну здатність 100 метрів, яка зазвичай передискретизується до 30 метрів для узгодження з іншими діапазонами OLI для всебічної ідентифікації вигорілих територій. Ця висока просторова роздільна

здатність є значною перевагою, що дозволяє виявляти невеликі пожежі, включаючи ті, що відбуваються в лісах, на плантаціях та торфовищах.

Важливо зазначити, що Landsat 8 надає дані для виявлення активних пожеж із просторовою роздільною здатністю, що є "в 1000 разів та в 160 разів точнішою, ніж виявлення активних пожеж MODIS з роздільною здатністю 1 км та VIIRS з роздільною здатністю 375 м відповідно". Це дозволяє виявляти палаючі пожежі розміром приблизно 4 квадратні метри під час денних спостережень. Постійний наголос на роздільній здатності Landsat 8 у 30 метрів та її пряме порівняння з грубішими сенсорами, такими як MODIS та VIIRS, чітко встановлює його перевагу в забезпеченні дрібних просторових деталей. Це означає, що Landsat 8 унікально підходить для застосувань, що вимагають високої деталізації, таких як "тактичні дані для підтримки управління пожежами", надання "просторово-визначених деталей розташування та масштабу пожежної активності" та дозволяє користувачам "точніше визначати місцезнаходження пожежної активності". Ця відмінна перевага безпосередньо перетворюється на вищу корисність для точного картографування, локалізованої оцінки збитків та перевірки продуктів з грубішою роздільною здатністю.

Landsat 8 також має покращену радіометричну точність, збираючи дані в 12-бітному динамічному діапазоні. Це означає 4096 потенційних рівнів сірого, що є значним покращенням порівняно з 256 рівнями сірого попередніх 8-бітних інструментів Landsat. Це покращена радіометрична продуктивність безпосередньо покращує загальне співвідношення сигнал/шум, що призводить до точнішої характеристики стану та стану земного покриву. Технічна специфікація 12-бітної радіометричної точності має прямі практичні наслідки. Це означає, що таке покращення призводить до вищого "співвідношення сигнал/шум" та "покращеної характеристики стану та стану земного покриву". Це встановлює прямий причинно-наслідковий зв'язок від технічної особливості дизайну до відчутних покращень якості даних та точності подальших аналізів, таких як розрахунки спектральних індексів та розрізнення між вигорілими та не вигорілими ділянками, тим самим зменшуючи потенційні помилки.

Landsat 8 обертається навколо Землі на висоті 705 кілометрів, завершуючи один повний оберт приблизно кожні 99 хвилин. Він працює за 16-денним циклом повторного відвідування, що означає, що він повертається до того самого місця на Землі кожні 16 днів. При роботі в поєднанні з Landsat 9, який навмисно розташований у своїй орбіті на 8 днів поза фазою, комбінована часова роздільна здатність для двох супутників покращується до часу повторного відвідування раз на 8 днів у середніх широтах.

Landsat 8 щодня отримує близько 740 сцен, і ці сцени зазвичай доступні для завантаження протягом 6 годин після отримання. Продукт Landsat Fire and Thermal Anomalies (LFTA), зокрема, має низьку затримку, що робить дані Landsat доступними значно швидше, ніж інші продукти, такі як HLS. Однак, незважаючи на значні переваги Landsat у просторовій роздільній здатності, його 16-денний (або 8-денний у поєднанні з Landsat 9) цикл повторного відвідування є чітко визначеним обмеженням. Джерела [22] прямо вказують, що така частота ускладнює "захоплення динамічного процесу поширення вогню" або забезпечення "комплексного глобального покриття щодня". Це означає пряме протиріччя між часовими можливостями Landsat та вимогами до моніторингу поширення пожежі в реальному часі. Це свідчить про те, що, хоча Landsat чудово підходить для детальної оцінки після пожежі, його автономна корисність для відстеження швидкозмінних активних фронтів пожежі обмежена, що вимагає інтеграції даних з інших сенсорів з вищою часовою роздільною здатністю.

Моніторинг лісових пожеж за допомогою супутникових даних Landsat-8 охоплює два основні, але відмінні аспекти: виявлення активних пожеж та картографування вигорілих територій.

Виявлення активних пожеж зосереджується на ідентифікації поточної пожежної активності та теплових аномалій, як правило, у майже реальному часі. Цей процес переважно використовує термальні інфрачервоні дані, отримані такими сенсорами, як TIRS Landsat 8, які можуть виявляти теплові сигнатури. Натомість, **Картографування вигорілих територій** має на меті окреслити просторовий масштаб та місцезнаходження територій, які були уражені пожежею після події. Це

переважно досягається шляхом аналізу змін у властивостях відбивної здатності земної поверхні у видимій, ближній інфрачервоній (NIR) та короткохвильовій інфрачервоній (SWIR) частинах спектра.

Чітке розрізнення між виявленням активних пожеж (використання TIRS для негайних теплових сигнатур) та картографуванням вигорілих територій (використання оптичних діапазонів OLI для змін земного покриву після пожежі) підкреслює універсальність Landsat 8. Це не просто функціональна відмінність, а вказівка на те, що Landsat 8 сприяє різним фазам циклу управління пожежами – від негайного реагування на надзвичайні ситуації (активна пожежа) до довгострокової оцінки впливу, реабілітації та екологічного відновлення (вигоріла територія). Ця подвійна корисність підкреслює комплексний характер можливостей Landsat 8 у вирішенні різних аспектів характеристики лісових пожеж.

Нормалізований індекс згоряння (NBR) є широко прийнятим спектральним індексом, який служить подвійній меті: ідентифікації вигорілих територій та наданні кількісної оцінки інтенсивності згоряння. NBR принципово розраховується як відношення між значеннями ближнього інфрачервоного (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів. Для даних Landsat 8 та 9 Operational Land Imager (OLI) використовується специфічна формула $NBR = \frac{\text{Діапазон 5} - \text{Діапазон 7}}{\text{Діапазон 5} + \text{Діапазон 7}}$, що використовує діапазони NIR та SWIR2 відповідно.

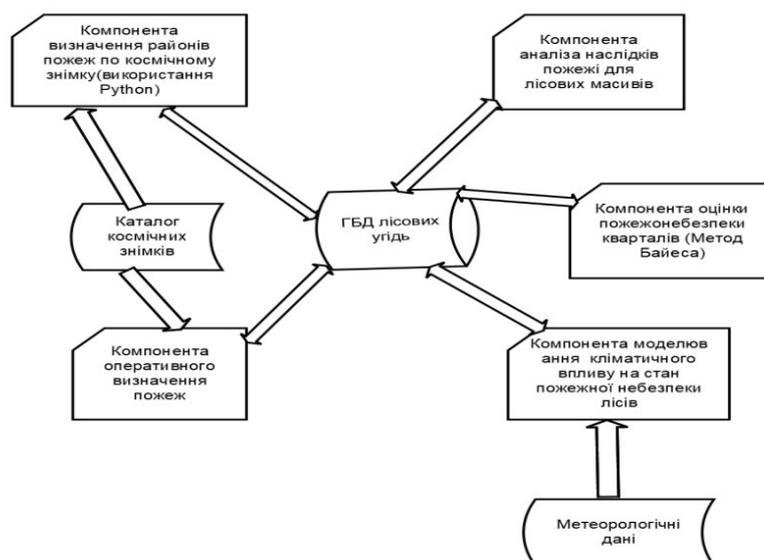


Рисунок 2.1 – Система прогнозування виникнення лісових пожеж на основі статистичної моделі Байєса

Ефективність NBR походить від вираженої спектральної різниці між здоровими лісовими угіддями та вигорілими територіями, особливо в регіонах NIR (Діапазон 5) та SWIR2 (Діапазон 7). Здорова рослинність демонструє високу відбивну здатність у NIR та низьку у SWIR2, тоді як вигорілі території показують протилежне, з обуглюванням та втратою вологи, що призводить до низької відбивної здатності у NIR та відносно вищої у SWIR2. Продукти NBR зазвичай надаються у вигляді односмугових растрових файлів, часто масштабованих до 55 000 рівнів сірого, і можуть бути перемасштабовані до відбивної здатності на вершині атмосфери (TOA) або випромінювання з використанням наданих метаданих. Зазвичай рекомендується застосовувати корекції відбивної здатності TOA до зображень перед розрахунком NBR для покращення точності. Використання NBR є ефективним, оскільки найбільш значуща спектральна різниця між лісовими угіддями та вигорілими територіями проявляється саме в NIR та SWIR2 діапазонах. Це встановлює прямий причинно-наслідковий зв'язок між фізичним впливом пожежі на рослинність (обуглювання, втрата вологи) та результуючою зміною спектральної відбивної здатності, яку NBR призначений фіксувати. Це означає, що широке застосування NBR та його корисність⁷ є прямим наслідком його здатності надійно виділяти ці фундаментальні спектральні зміни, що робить його потужним та надійним індикатором впливу пожежі.

Хоча NBR є наріжним каменем, у галузі дистанційного зондування для моніторингу пожеж використовується безліч інших спектральних індексів для виявлення вигорілих територій та оцінки інтенсивності згоряння. До них належать традиційні індекси рослинності, такі як нормалізований різницевий індекс рослинності (NDVI), глобальний індекс моніторингу навколишнього середовища (GEMI) та індекс рослинності, скоригований на ґрунт (SAVI), а також спеціалізовані індекси пожеж, такі як індекс вигорілої площі (BAI), індекс вугільного ґрунту (CSI), середньоінфрачервоний біспектральний індекс (MIRBI) та запропонований нормалізований індекс згоряння SWIR (NBRSWIR).

Таблиця 2.2 – Загальні спектральні індекси для оцінки вигорілих територій та інтенсивності згоряння за допомогою діапазонів Landsat 8

Назва індексу	Формула (використання діапазонів Landsat 8)
Normalized Burn Ratio (NBR)	$(\text{Band 5} - \text{Band 7}) / (\text{Band 5} + \text{Band 7})$
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$(\text{Band 5} - \text{Band 4}) / (\text{Band 5} + \text{Band 4})$
Short-wave Infrared (SWIR) Composite	Комбінації SWIR-діапазонів (наприклад, Band 6, Band 7)
Thermal Infrared (TIR)	Band 10, Band 11
Burned Area Index (BAI)	Використовує NIR та Red діапазони
Char Soil Index (CSI)	Відношення NIR та LSWIR діапазонів
Mid-Infrared Bi-Spectral Index (MIRBI)	Використовує середньоінфрачервоні діапазони
Normalized Burned Ratio SWIR (NBRSWIR)	Використовує два SWIR-діапазони Landsat-8 OLI
Analytic Burned Area Index (ABAI)	Похідний від багатоцільового алгоритму оптимізації

NDVI, розрахований з використанням червоного та NIR діапазонів, демонструє хорошу кореляцію з інтенсивністю пожежі та часто застосовується. Однак дослідження показують, що NBR часто менш схильний до насичення, ніж NDVI, при характеристиці відновлення рослинності після пожежі, що робить його більш придатним для розрізнення тонких змін у сильно вигорілих регіонах. Новіші індекси,

такі як аналітичний індекс вигорілої площі (АВАІ), продемонстрували помітні переваги з точки зору точності та стабільності для оцінки інтенсивності пожежі, особливо в складних умовах, що характеризуються тінями від рельєфу та сильно вигорілими регіонами. Існування "численних спектральних індексів", кожен з яких має "характеристики в локальних дослідженнях" та "різні показники ефективності для оцінки інтенсивності пожежі", вказує на те, що жоден окремих індекс не є універсально оптимальним. Це означає, що вибір найбільш відповідного індексу є тонким рішенням, яке сильно залежить від конкретної екосистеми, типу та інтенсивності пожежі, а також точної мети дослідження (наприклад, раннє позеленіння проти сильного обвуглювання). Це вказує на методологічний принцип, згідно з яким "регіональна калібрування та оптимізація параметрів" є вирішальними для максимізації точності та актуальності, виходячи за рамки універсального підходу.

Геологічна служба США (USGS) надає стандартизовані наукові продукти Landsat Level-3 Burned Area (зокрема, Колекція 2), які ретельно розроблені для ідентифікації вигорілих територій у різноманітних екосистемах, включаючи ліси, чагарники та луки. Ці продукти генеруються з безперервного потоку даних Landsat, що охоплює зображення, отримані Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) та Landsat 8 OLI/TIRS, з даними, що охоплюють період з 1984 року по теперішній час.

Продукти вигорілих територій зазвичай складаються з растрових файлів на основі отримання, які надають детальну інформацію про класифікацію вигорілих ділянок та ймовірність згоряння. Ці продукти з роздільною здатністю 30 метрів пропонують історичний запис та масштаби місць пожеж, слугуючи критично важливими вхідними даними для оцінки пожежної небезпеки, характеристики порушень та відстеження довгострокових змін земного покриву. Наявність наукових продуктів Landsat Level-3 Burned Area є важливим кроком до стандартизації та доступності даних, пов'язаних з пожежами. Це не просто необроблені супутникові зображення, а продукт з доданою вартістю, що вказує на значні інвестиції USGS у забезпечення готовності цієї інформації до використання в широкому спектрі застосувань. Це означає, що ці стандартизовані продукти забезпечують послідовний,

широкомасштабний аналіз історії пожеж, що є фундаментальним для інформування політики, стратегічного планування землекористування та розуміння кумулятивних екологічних наслідків пожеж, що виходять за межі окремих подій.

Кількісна оцінка інтенсивності пожеж та моніторинг відновлення рослинності після них є критично важливими для розуміння екологічних наслідків та планування відновлювальних заходів.

Кількісна оцінка інтенсивності згоряння за допомогою різницевого NBR (dNBR). Інтенсивність згоряння точно визначається як ступінь, до якого конкретне місце було змінено або пошкоджено пожежею. Кількісна оцінка інтенсивності пожежі є критично важливим аспектом вивчення механізмів реагування наземних екосистем на пожежу та є фундаментальною для розуміння екологічних процесів, викликаних лісовими пожежами. Різницевий нормалізований індекс згоряння (dNBR), часто позначається як ΔNBR , є основним і найбільш широко прийнятим методом кількісної оцінки інтенсивності згоряння за допомогою супутникових зображень.

Розрахунок dNBR передбачає бітемпоральний підхід: зображення NBR після пожежі віднімається від зображення NBR до пожежі. Цей порівняльний метод є високоефективним, оскільки він значно посилює контраст між вигорілими та не вигорілими територіями, одночасно мінімізуючи перешкоди від нерелевантних об'єктів земного покриву, що залишаються незмінними. Хоча NBR ефективний для виявлення наявності вигорілої території, dNBR являє собою значне аналітичне вдосконалення, оскільки він кількісно визначає інтенсивність згоряння. Це встановлює прямий причинно-наслідковий зв'язок, де величина та напрямок зміни NBR (від до-пожежі до після-пожежі) безпосередньо відображають ступінь екологічного пошкодження та зміни. Це означає, що dNBR виходить за рамки простого виявлення, щоб надати критично важливу кількісну оцінку впливу пожежі на екосистему, що є безцінним для інформування "планів аварійної реабілітації та відновлення" та отримання глибшого розуміння реакції екосистеми.

Значення dNBR зазвичай класифікуються та інтерпретуються з використанням стандартизованих категорій інтенсивності згоряння, зокрема тих, що встановлені

програмою USGS FireMon. Ці категорії надають послідовну основу для оцінки, починаючи від територій з високим відновленням після пожежі до тих, що демонструють високу інтенсивність згоряння.

Таблиця 2.3 – Категорії інтенсивності згоряння Δ NBR (програма USGS FireMon)

Діапазон Δ NBR	Інтенсивність згоряння
< -0.25	Високе відновлення після пожежі
-0.25 до -0.1	Низьке відновлення після пожежі
-0.1 до +0.1	Невигоріла ділянка
0.1 до 0.27	Низька інтенсивність згоряння
0.27 до 0.44	Помірно-низька інтенсивність згоряння
0.44 до 0.66	Помірно-висока інтенсивність згоряння
> 0.66	Висока інтенсивність згоряння

Дані Landsat відіграють ключову роль у моніторингу відновлення рослинності після пожеж та складних процесів екологічної сукцесії протягом тривалих періодів, часто десятиліть. Це включає ретельне відстеження спектральних відгуків з перших років після пожежі для прогнозування та розуміння довгострокових лісових умов та траєкторій розвитку.

Часові ряди зображень Normalized Burn Ratio (NBR) зазвичай використовуються для моніторингу відновлення рослинності або її позеленіння, оскільки NBR особливо чутливий до змін у структурі рослинності та відбивної здатності ґрунту. Хоча Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) також може

бути використаний, NBR часто є кращим для оцінки відновлення після пожежі через його знижену схильність до насичення в сильно порушених районах.

Швидкість та характер відновлення рослинності є дуже мінливими, на них значно впливають такі фактори, як інтенсивність пожежі, конкретний тип екосистеми, переважаючі кліматичні умови та характеристики ґрунту. Загалом, території, що зазнали низькоінтенсивних пожеж, як правило, відновлюються швидше, ніж ті, що зазнали сильних уражень. Крім того, випадки повторних пожеж можуть призвести до помітно повільнішого та менш повного відновлення, потенційно спричиняючи довгостроковий зсув у складі рослинності, наприклад, від лісу до чагарників. Безпрецедентна здатність Landsat надавати "десятиліття даних з роздільною здатністю 30 м" є не просто технічною особливістю, а унікальною перевагою, що дозволяє вивчати довгострокові екологічні процеси, такі як сукцесія після пожежі. Це дозволяє дослідникам вийти за рамки простого виявлення, щоб зрозуміти траєкторії відновлення та складну взаємодію факторів, що впливають на цю динаміку (інтенсивність пожежі, клімат, повторні пожежі). Це означає, що дані Landsat підтримують складне прогностичне моделювання майбутніх станів лісів та надають критично важливу інформацію для розробки ефективних довгострокових стратегій відновлення та адаптивного управління.

Передові методи аналізу часових рядів, зокрема алгоритми, такі як LandTrendr (Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery) та CCDC (Continuous Change Detection and Classification), широко використовуються для виявлення та картографування тенденцій відновлення рослинності після лісових пожеж.

LandTrendr працює шляхом моделювання історичної спектральної траєкторії пікселя в серію лінійних сегментів. Ці сегменти представляють періоди відносної стабільності, раптові порушення (такі як пожежна подія) та подальше поступове відновлення. Алгоритм зазвичай використовує щорічні композиції Landsat NBR як основний вхідний параметр.

CCDC (Continuous Change Detection and Classification) розроблений для безперервного моніторингу. Він адаптує гармонійні регресійні моделі до даних часових рядів та ідентифікує "злами" або зміни, коли спостережувані дані послідовно

відхиляються за межі встановленого порогу від прогнозів моделі. CCDC здатний виявляти різні типи змін земного покриття, включаючи тонкі лісові порушення, з високою просторовою та часовою точністю.

Інші помітні алгоритми в цій галузі включають COLD (Continuous monitoring of Land Disturbance) та BFAST (Breaks For Additive Season and Trend), які також застосовуються для моніторингу лісових порушень. COLD, наприклад, продемонстрував високу точність спеціально для виявлення пожежних порушень. Інтеграція кількох спектральних діапазонів та індексів у поєднанні з алгоритмами керованої класифікації може додатково підвищити точність результатів виявлення лісових порушень. Еволюція від простого одноразового або бітемпорального виявлення змін до складного "аналізу часових рядів" та розробка алгоритмів, таких як LandTrendr та CCDC, являє собою значний методологічний прогрес. Ці алгоритми виходять за рамки простого виявлення "змін", щоб охарактеризувати тенденції, траєкторії та характер порушень та відновлення з часом. Це означає, що, хоча Landsat надає базові дані, ці складні аналітичні інструменти є важливими для отримання складної екологічної інформації, такої як швидкість відновлення, тривалість порушення та конкретний тип зміни земного покриття, тим самим максимізуючи наукову корисність довгострокового архіву Landsat.

Оцінка можливостей Landsat-8 вимагає розуміння як його сильних сторін, так і властивих йому обмежень у контексті моніторингу лісових пожеж.

Переваги: висока просторова деталізація, виявлення малих пожеж, довгострокова узгодженість даних

Висока просторова роздільна здатність: Багатоспектральна роздільна здатність Landsat 8 у 30 метрів та панхроматична роздільна здатність у 15 метрів забезпечують значно більшу просторову деталізацію порівняно з сенсорами з грубішою роздільною здатністю, такими як MODIS (1 км) та VIIRS (375 м). Ця чудова роздільна здатність має вирішальне значення для точного картографування меж пожеж, окреслення малих та фрагментованих вигорілих територій та надання просторово-визначених деталей пожежної активності. Постійні та явні порівняння просторової роздільної здатності Landsat 8 з MODIS

та VIIRS чітко встановлюють його порівняльну перевагу в наданні дрібних просторових деталей. Це означає, що Landsat не призначений для заміни щоденного глобального моніторингу, а скоріше служить додатковим, високоцінним інструментом. Він надає "інформацію вищої точності", необхідну для "тактичних даних для підтримки управління пожежами", та пропонує "просторово-визначені деталі", які не можуть надати грубіші сенсори. Це визначає конкретну цінність Landsat та його унікальну роль у ширшій екосистемі дистанційного зондування для моніторингу пожеж.

Виявлення малих пожеж: Розширені можливості Landsat 8 дозволяють виявляти палаючі пожежі розміром приблизно 4 квадратні метри під час денних спостережень, при цьому виявлення вночі покращується до площі всього 1 квадратний метр. Ця висока чутливість до малих пожеж особливо цінна для виявлення ранніх займань або розрізнення локалізованої, розсіяної пожежної активності в межах більшого периметра.

Довгострокова узгодженість даних: Як невід'ємна частина довготривалої програми Landsat, Landsat 8 сприяє безперервному та послідовному запису даних, що сягає 1970-х років. Ця неперевершена історична спадщина забезпечує послідовні радіометричні та геометричні продукти, що робить її безцінним ресурсом для довгострокового аналізу часових рядів, моніторингу тенденцій у режимах пожеж протягом десятиліть та оцінки тонких процесів відновлення рослинності після пожеж.

Покращена радіометрична точність: 12-бітний динамічний діапазон Landsat 8 значно покращує співвідношення сигнал/шум та покращує характеристику станів та умов земного покриву, що призводить до більш надійних аналітичних результатів.

Виклики: прогалини в часовій роздільній здатності, вплив хмарності.

Прогалини в часовій роздільній здатності: Landsat 8 працює за 16-денним циклом повторного відвідування, який, навіть у поєднанні з Landsat 9, досягає лише 8-денного часу повторного відвідування. У поєднанні з відносно вузькою шириною смуги 185 км це означає, що Landsat 8 не забезпечує всебічного глобального

покриття щодня. Це властиве обмеження значно обмежує його здатність фіксувати динамічний та швидкий процес поширення пожежі або моніторити прогрес пожежі в реальному часі. Джерела послідовно підкреслюють властивий компроміс між високою просторовою роздільною здатністю Landsat та його порівняно нижчою часовою роздільною здатністю, якщо порівнювати з MODIS/VIIRS. Це є фундаментальним обмеженням конструкції сенсора та орбітальних характеристик. Це означає, що для застосувань, які вимагають моніторингу поширення пожежі в реальному часі або щоденного глобального покриття, Landsat сам по собі є недостатнім. Це зумовлює необхідність використання додаткових джерел даних або застосування передових методів злиття даних, тим самим готуючи ґрунт для обговорення інтеграції даних у наступному розділі.

Вплив хмарності: Оптичні супутникові зображення, включаючи ті, що походять від Landsat, дуже чутливі до перешкод від хмар та тіней від хмар. Ці атмосферні умови можуть спричинити значні прогалини в даних, тим самим знижуючи загальну точність та ефективність аналізу часових рядів. У деяких хмарних регіонах отримання достатньо чітких зображень, особливо в послідовні пори року, може бути складним, потенційно вимагаючи тривалих періодів очікування. Повторювана згадка про хмарність як значну проблему є постійною темою в дослідженнях. Це не просто незручність, а фактор, який "знижує загальну точність досліджень часових рядів" і може ускладнити "захоплення деталей меж пожежі". Це встановлює чіткий причинно-наслідковий зв'язок: атмосферні перешкоди від хмар безпосередньо призводять до прогалин у даних та зниження точності аналізу в оптичному дистанційному зондуванні. Це обмеження підкреслює критичну потребу в надійних алгоритмах маскування хмар і, що важливіше, у підходах до злиття даних з кількох сенсорів для підтримки безперервних можливостей спостереження.

Обмежене покриття для продуктів майже реального часу: Наразі оперативний продукт Landsat для виявлення активних пожеж у майже реальному часі (LFTA) має обмежене географічне покриття. Він переважно обмежений територіями в

межах діапазону прямого мовлення даних станції Landsat Ground Station EROS USGS у Су-Фоллс, Південна Дакота. Розширення цього покриття в реальному часі по всьому світу вимагатиме значних інвестицій у впровадження подібних операційних потоків даних на інших наземних станціях.

Відсутність детальної характеристики пожежі: Продукт LFTA, хоча і є просторово точним, за своєю суттю не надає детальної інформації про характеристику пожежі, такої як оцінки випромінюваної потужності пожежі або загальної теплової енергії. Крім того, кожне виявлення гарячої точки/активної пожежі представляє приблизний центр 30-метрового пікселя, який може містити кілька окремих пожеж або інших теплових аномалій.

Супутникові дані Landsat-8 є фундаментальним активом для всебічної характеристики лісових пожеж, пропонуючи унікальне поєднання можливостей, які є критично важливими для управління пожежами та екологічних досліджень. Його інструменти OLI та TIRS надають взаємодоповнюючі спектральні дані, що дозволяють як виявляти активні пожежі за допомогою термальних сигнатур, так і точно картографувати вигорілі території за допомогою оптичних діапазонів. Особливо цінними є короткохвильові інфрачервоні (SWIR) та термальні інфрачервоні (TIR) діапазони, які ефективно проникають крізь дим та виявляють теплові та спектральні зміни, спричинені вогнем.

Головною перевагою Landsat-8 є його висока просторова роздільна здатність (30 м для мультиспектральних та 15 м для панхроматичних даних), що дозволяє виявляти навіть невеликі пожежі (до 4 м²) та забезпечувати неперевершену деталізацію меж вигорілих територій. Ця просторова точність відрізняє Landsat від сенсорів з грубішою роздільною здатністю, таких як MODIS та VIIRS, що робить його незамінним для тактичного управління пожежами та детальної оцінки збитків. Крім того, роль Landsat-8 у довготривалій програмі Landsat забезпечує послідовний архів даних, що охоплює десятиліття, що має вирішальне значення для аналізу тенденцій пожеж, розуміння екологічної сукцесії та моніторингу відновлення рослинності після пожеж. Покращена радіометрична точність Landsat-8 додатково підвищує якість даних, що призводить до більш надійних аналітичних результатів.

Таблиця 2.4 – Порівняння Landsat-8 з MODIS/VIIRS для моніторингу пожеж

Характеристика	L a n d s a t - 8 (OLI/TIRS)	MODIS (Terra/Aqua)	VIIRS (Suomi NPP/NOAA-20/21)
Просторова роздільна здатність	30 м (мультиспектральна), 15 м (панхроматична), 100 м (термальна, часто до 30 м)	1 км (активні пожежі)	375 м (активні пожежі)
Часова роздільна здатність (цикл повторного відвідування)	16 днів (один супутник); 8 днів (Landsat 8 + Landsat 9)	Щодня (комбіновані Terra та Aqua)	Щодня
Ширина захвату	185 км	2330 км	Не вказано, але значно ширше, ніж Landsat
Ключові переваги для моніторингу пожеж	Висока просторова деталізація (виявлення пожеж розміром до 4 м ²), довгострокова послідовність даних (з 1970-х), покращена радіометрична точність, точне картографування вигорілих територій	Щоденне глобальне покриття, швидка доступність даних (30 хв – 3 год), корисний для широкомасштабного моніторингу	Покращена просторова роздільна здатність порівняно з MODIS, здатність виявляти менші пожежі та окреслювати периметри великих пожеж
Ключові обмеження для моніторингу пожеж	Обмежена часова роздільна здатність для моніторингу динаміки поширення пожежі в реальному часі, вплив хмарності, обмежене покриття для продуктів майже реального часу	Груба просторова роздільна здатність (1 км), менш детальна інформація про межі пожеж	Відносно груба просторова роздільна здатність порівняно з Landsat, хоча краща, ніж MODIS

Однак, незважаючи на ці сильні сторони, Landsat-8 має певні обмеження. Його 16-денний цикл повторного відвідування (або 8-денний у поєднанні з Landsat-9)

обмежує його здатність відстежувати динаміку поширення пожежі в реальному часі. Крім того, оптичні дані Landsat чутливі до хмарності, що може призвести до прогалин у даних та зниження точності, особливо в регіонах з частими хмарами. Ці обмеження підкреслюють необхідність інтеграції даних з кількох сенсорів, таких як MODIS або VIIRS, які пропонують вищу часову роздільну здатність для безперервного моніторингу, що доповнює просторову деталізацію Landsat.

Застосування передових алгоритмів аналізу часових рядів, таких як LandTrendr та CCDC, є ключовим для максимального використання потенціалу даних Landsat. Ці алгоритми дозволяють дослідникам виходити за рамки простого виявлення змін, щоб характеризувати траєкторії відновлення та вивчати складну взаємодію факторів, що впливають на динаміку екосистем після пожеж. Загалом, Landsat-8 залишається незамінним інструментом у арсеналі дистанційного зондування для характеристики лісових пожеж, забезпечуючи критично важливу інформацію для оцінки впливу, планування відновлення та інформування стратегій управління в умовах зростаючої глобальної загрози лісових пожеж.

2.2 Модель глибокого навчання для виявлення лісових пожеж за супутниковими зображеннями

Лісові пожежі є критичним чинником трансформації ландшафтів, становлячи значну загрозу для екосистем, людських життів, інфраструктури та якості повітря. Їхня частота та інтенсивність зростають через зміни клімату та діяльність людини. Наприклад, бореальні лісові пожежі щорічно спалюють приблизно 10-15 мільйонів гектарів, а у 2021 році вони становили рекордні 23% глобальних викидів вуглецю від лісових пожеж. У 2024 році тропічні первинні ліси втратили рекордні 6,7 мільйонів гектарів, що майже вдвічі перевищує показник 2023 року, значною мірою через масштабні пожежі. Ця ескалація підкреслює нагальну потребу в передових рішеннях для моніторингу.

Історично виявлення лісових пожеж покладалося на традиційні підходи, такі як метеорологічні дані та людський досвід, які часто були обмежені в точності,

масштабованості та можливості реагування в реальному часі. Однак, зростання масштабів та інтенсивності лісових пожеж перевершило можливості цих звичайних методів, що вимагає фундаментальної зміни в стратегіях моніторингу. Це означає, що використання передових технологій, таких як глибоке навчання та супутникове дистанційне зондування, є не просто вдосконаленням, а стратегічним імперативом. Вони пропонують трансформаційні можливості, забезпечуючи широке покриття та дані високої роздільної здатності, що є вирішальними для моніторингу активності лісових пожеж протягом усього їхнього життєвого циклу – від умов до пожежі до відновлення після неї.

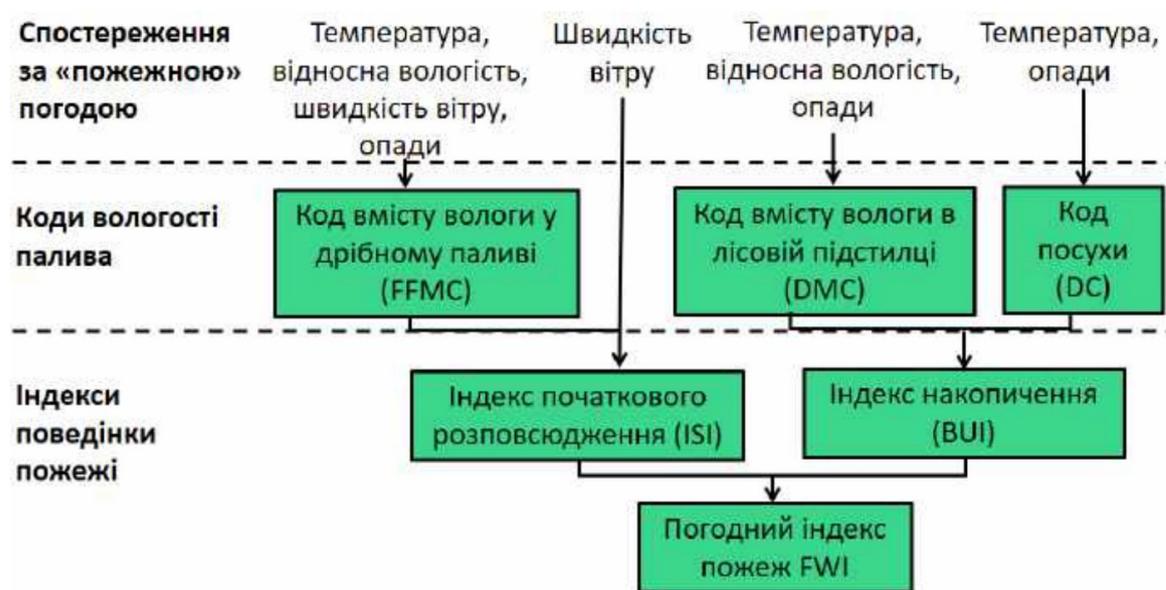


Рисунок 2.2 – Компоненти системи FWI, що враховують вплив вологості палива та погодних умов на поведінку вогню

Поява методів глибокого навчання (рис. 2.2) є значним кроком уперед у цій галузі. Їхня вроджена здатність обробляти величезні набори даних і розпізнавати складні закономірності дозволяє точніше прогнозувати виникнення та поведінку пожеж, значно покращуючи можливості виявлення та моніторингу в реальному часі порівняно з традиційними методами. Моделі ГН постійно демонструють сприятливі результати, причому більшість досліджень досягають показників точності понад 90%. Сила глибокого навчання полягає не лише в його вищій точності для виявлення пожеж, але й у його здатності синтезувати складні, багатовимірні супутникові дані в

цілісну, дієву інформацію про лісові пожежі протягом усього їхнього життєвого циклу. Це виходить за рамки простої класифікації, дозволяючи інтегрувати розрізнені типи даних для більш тонкого розуміння динаміки пожежі, включаючи оцінку ризиків до пожежі, картографування паливних матеріалів та моніторинг відновлення після пожежі.

Цей звіт систематично досліджує джерела супутникових даних, методології глибокого навчання, методи попередньої обробки даних, стратегії багатосенсорного злиття даних та практичні застосування для виявлення лісових пожеж та комплексного управління ними. Він також критично оцінює існуючі обмеження та окреслює перспективні напрямки майбутніх досліджень та оперативного розгортання.

Супутникове дистанційне зондування забезпечує неперевершену перевагу для безперервного моніторингу лісових пожеж протягом усього їхнього життєвого циклу: від оцінки умов паливних матеріалів до пожежі, виявлення активних загорянь, картографування інтенсивності горіння та відстеження екологічного відновлення після пожежі. Ключові місії, що надають критичні дані для цих застосувань, включають Landsat, MODIS та VIIRS, кожна з яких має свої особливі можливості.

Місії Landsat (Landsat 8/9 OLI & TIRS)

Супутник Landsat 8, запущений у 2013 році, та його наступник Landsat 9, запущений у 2021 році, оснащені двома основними приладами: Operational Land Imager (OLI) та Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Технічні характеристики:

Просторова роздільна здатність: Сенсор OLI надає багатоспектральні дані високої роздільної здатності 30 метрів та панхроматичний діапазон 15 метрів. Прилад TIRS вимірює температуру поверхні землі у двох теплових діапазонах (Діапазон 10: 10.6-11.19 мкм, Діапазон 11: 11.5-12.51 мкм) з власною просторовою роздільною здатністю 100 метрів, яка зазвичай передискретизується до 30 метрів для забезпечення узгодженості продуктів.

Спектральні діапазони: OLI збирає дані у дев'яти спектральних діапазонах, що

охоплюють видиму, ближню інфрачервону (NIR) та короткохвильову інфрачервону (SWIR) частини спектра. Ці діапазони особливо цінні для моніторингу лісових пожеж:

NIR (Діапазон 5): Підкреслює вміст біомаси та є вирішальним для оцінки стану рослинності та змін.

SWIR 1 (Діапазон 6, 1.57-1.65 мкм) та SWIR 2 (Діапазон 7, 2.11-2.29 мкм): Дуже чутливі до вмісту вологи в ґрунті та рослинності, а також здатні проникати крізь тонкі хмари, що робить їх незамінними для виявлення пожежних ділянок та шрамів від пожеж.

Термальний інфрачервоний (TIRS Діапазони 10, 11): Безпосередньо вимірюють температуру поверхні, що є критично важливим для виявлення теплових аномалій та ідентифікації активних загорянь.

Часова роздільна здатність: Кожен супутник Landsat (8 або 9) працює з 16-денним циклом повторного відвідування. Однак, оскільки Landsat 8 та 9 знаходяться на орбіті з 8-денним зсувом фаз, їхня комбінована часова роздільна здатність забезпечує покриття певної локації кожні 8 днів у середніх широтах. Додаткове нічне завдання може іноді забезпечувати ще вищу часову роздільну здатність.

Радіометрична точність: Landsat 8 OLI пропонує покращену 12-бітну радіометричну точність (4096 потенційних рівнів сірого) порівняно з 8-бітними приладами попередніх місій Landsat (256 рівнів сірого). Це покращення значно підвищує загальне співвідношення сигнал/шум та дозволяє більш детально характеризувати стан та умови земного покриву.

Продукти активних пожеж: Продукт Landsat 8 & 9 Active Fire and Thermal Anomalies, створений на основі даних OLI, надає виявлення активних пожеж з роздільною здатністю 30 метрів. Це дозволяє виявляти дуже малі палаючі пожежі, розміром до $\sim 4\text{м}^2$ вдень та $\sim 1\text{м}^2$ вночі. Ці продукти інтегруються в системи, такі як FIRMS, з затримкою приблизно 30 хвилин від моменту отримання.

Продукти вигорілих площ: Продукт Landsat Collection 2 Level-3 Burned Area Science розроблений спеціально для ідентифікації вигорілих площ у різноманітних екосистемах, включаючи ліси, чагарники та луки. Ці продукти доступні з 1984 року

по теперішній час і надають критичні дані про класифікацію та ймовірність вигорання.

Спектрорадіометр помірної роздільної здатності (MODIS)

Технічні характеристики: Сенсори MODIS, встановлені на супутниках NASA Terra та Aqua, забезпечують виявлення активних пожеж та теплових аномалій з грубішою просторовою роздільною здатністю 1 км. Кожне місце активної пожежі/теплової точки MODIS представляє центр 1-кілометрового пікселя, позначеного як такий, що містить одну або кілька пожеж.

Часова роздільна здатність: MODIS пропонує щоденне глобальне покриття. Комбіновані спостереження з Terra (ранковий проліт) та Aqua (післяобідній проліт) забезпечують кілька знімків даних на день. Дані ближнього реального часу (NRT) доступні протягом 3 годин по всьому світу, а дані ультра-реального часу (URT) для США та Канади – протягом 1-30 хвилин.

Застосування: Продукти активних пожеж MODIS широко використовуються для широкомасштабного виявлення активних пожеж та картографування вигорілих площ, незважаючи на їхню грубу роздільну здатність, яка може призвести до пропуску малих пожеж та ефектів змішаних пікселів, особливо у фрагментованих ландшафтах.

Радіометр видимого інфрачервоного зображення (VIIRS)

Технічні характеристики: Прилад VIIRS, що працює на супутниках Suomi NPP, NOAA-20 та NOAA-21, забезпечує виявлення активних пожеж та теплових аномалій з покращеною просторовою роздільною здатністю 375 метрів. Ця більш тонка роздільна здатність дозволяє краще реагувати на відносно невеликі пожежі та забезпечує покращене картографування великих периметрів пожеж порівняно з MODIS.

Часова роздільна здатність: VIIRS пропонує часте глобальне покриття, досягаючи повного покриття кожні 12 годин, причому регіони середніх широт отримують від 3 до 4 спостережень на день. Як і MODIS, VIIRS надає потоки даних NRT та URT, що робить його цінним для своєчасних сповіщень.

Канали для виявлення пожеж: Продукт активних пожеж VIIRS 375м використовує всі п'ять 375-метрових каналів VIIRS, доповнених додатковими 750-метровими каналами, застосовуючи багатоспектральний контекстуальний алгоритм для ідентифікації субпіксельної пожежної активності та теплових аномалій.

Угрупування супутників Sentinel-2

Технічні характеристики: Місія Sentinel-2 Європейського космічного агентства складається з двох супутників (Sentinel-2A та -2B), які надають високоякісні багатоспектральні зображення. Вони мають 13 спектральних діапазонів, з довжинами хвиль, подібними до Landsat 8/9, хоча, що важливо, без теплових інфрачервоних діапазонів. Просторова роздільна здатність коливається від 10 м до 60 м залежно від діапазону.

Часова роздільна здатність: Sentinel-2 пропонує часте повторне відвідування – 5 днів на екваторі, що робить його цінним джерелом для аналізу часових рядів.

Застосування: Дані Sentinel-2 широко використовуються для картографування вигорілих площ та для отримання вегетаційних індексів, таких як NDVI, для моніторингу стану та відновлення рослинності.

Додаткові супутникові та геопросторові дані

Геостационарні супутники (наприклад, GOES, Himawari-8): Ці супутники пропонують винятково високу часову роздільну здатність, з інтервалами отримання даних до 10 хвилин (Himawari-8) або 5 хвилин (GOES-R). Хоча їхня просторова роздільна здатність є грубішою, їхня можливість безперервного моніторингу є безцінною для виявлення пожеж у реальному часі та відстеження швидкого поширення вогню.

Синтетична апертурна радіолокація (SAR): Дані з SAR-сенсорів, таких як Sentinel-1, забезпечують всепогодну зйомку, проникаючи крізь хмари та дим, що робить їх дуже цінними для моніторингу в складних атмосферних умовах. Зображення SAR чутливі до змін у структурі лісового покриву і можуть використовуватися для оцінки після пожежі, хоча на них впливає шум.

LiDAR (виявлення світла та визначення дальності): Дані LiDAR надають високодетальну тривимірну інформацію про щільність дерев та структуру лісу. У поєднанні з даними Landsat про поверхневу відбивну здатність, LiDAR значно покращує розуміння умов лісу після пожежі та дозволяє прогнозувати різні траєкторії розвитку та відновлення лісу.

Допоміжні дані: Окрім супутникових зображень, інтеграція допоміжних геопросторових даних, таких як висота, детальні метеорологічні параметри (температура, опади, вітер) та інформація про землекористування, є вирішальною для покращення точності та прогностичних можливостей моделей виявлення та поширення пожеж.

Внутрішньо притаманний компроміс між просторовою та часовою роздільною здатністю різних супутникових сенсорів є фундаментальним обмеженням у моніторингу лісових пожеж. Це робить багатосенсорні стратегії не просто корисними, але й необхідними для отримання всебічної інформації. Наприклад, Landsat (30 м просторова роздільна здатність, 8-16 днів часова роздільна здатність) забезпечує високу просторову деталізацію для точного картографування шрамів від пожеж та виявлення невеликих загорянь. Однак, його нечасті прольоти обмежують моніторинг швидкого поширення пожеж у реальному часі. Навпаки, MODIS (1 км просторова роздільна здатність, щоденна/кілька разів на день часова роздільна здатність) та VIIRS (375 м просторова роздільна здатність, щоденна/кілька разів на день часова роздільна здатність) пропонують критичну часову частоту для виявлення активних пожеж, але їм бракує просторової деталізації для точних меж або дуже малих загорянь. Геостаціонарні супутники (GOES, Himawari-8) ще більше підвищують часову роздільну здатність до хвилин, але за рахунок ще грубіших просторових масштабів. Цей постійний компроміс означає, що жоден окремий сенсор не може надати повний спектр інформації, необхідної для ефективного управління лісовими пожежами. Це безпосередньо вимагає інтеграції даних з кількох сенсорів, щоб використати їхні взаємодоповнюючі сильні сторони та подолати індивідуальні обмеження.

Глибоке навчання (ГН) відіграє ключову роль в обробці та інтерпретації даних дистанційного зондування для виявлення та моніторингу лісових пожеж. Його здатність автоматично витягувати складні ознаки з великих обсягів даних робить його потужним інструментом у цій галузі.

Згорткові нейронні мережі (CNN) є основою багатьох систем виявлення пожеж на основі ГН, завдяки їхній здатності ефективно обробляти зображення.

Архітектури та застосування: Серед широко використовуваних архітектур CNN для класифікації зображень пожеж та не пожеж – InceptionV3, ResNet та VGG. Ці моделі відзначаються своєю ефективністю у розпізнаванні закономірностей, що вказують на присутність вогню або диму.

Витягування ознак: CNN складаються з кількох типів шарів для витягування та класифікації ознак. Згорткові шари відповідають за витягування ієрархічних ознак з вхідних даних. За ними слідує функції активації, які вводять нелінійні перетворення, збільшуючи складність мережі та її здатність вивчати складні закономірності. Шари пулінгу зменшують розмірність витягнутих ознак, зберігаючи при цьому найважливішу інформацію, що допомагає зменшити обчислювальні витрати та запобігти перенавчанню.

Для задач, які вимагають не тільки виявлення наявності пожежі, а й точного визначення її місцезнаходження на зображенні, використовуються моделі виявлення об'єктів YOLO, R-CNN. Сімейство моделей YOLO (You Only Look Once), включаючи YOLOv3, YOLOv5 та YOLOv8, широко застосовується завдяки їх винятковій швидкості висновку та високій точності, що робить їх ідеальними для виявлення пожеж у реальному часі. Ці моделі обробляють виявлення об'єктів як єдину задачу регресії, прогножуючи обмежувальні рамки та ймовірності класів безпосередньо з повних зображень за одну оцінку, що значно прискорює процес.

Сегментаційні моделі (U-Net, DeepLab) є критично важливими для детального картографування вигорілих площ та розуміння точних меж пожежі. Архітектури, такі як U-Net та її варіанти (наприклад, F-Unet), широко використовуються для точного розмежування пожежних ділянок на супутникових зображеннях. Ці моделі

дозволяють точно визначати межі пожежі та оцінювати її поширення, що є важливим для оцінки збитків та планування відновлювальних робіт.

Для моніторингу динаміки пожеж, таких як їхнє поширення та відновлення рослинності, використовуються моделі, здатні обробляти послідовні дані. Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема Long Short-Term Memory (LSTM) та Gated Recurrent Unit (GRU) мережі, ефективно обробляють дані часових рядів із сенсорів або відеопотоків. Ці моделі здатні захоплювати часові залежності, відстежуючи прогрес пожежі з часом та прогножуючи майбутні місця її поширення та інтенсивність, що допомагає у плануванні протипожежних заходів.

Для подальшого підвищення продуктивності та подолання обмежень окремих моделей дослідники розробляють гібридні моделі та генеративно-змагальні мережі (GAN). Гібридні моделі, що поєднують CNN з LSTM або GRU, демонструють покращену продуктивність у класифікації даних часових рядів для прогнозування виникнення пожеж. Крім того, генеративно-змагальні мережі (GAN) досліджуються для збільшення навчальних наборів даних, що є критично важливим для подолання проблеми дефіциту анотованих даних та покращення здатності моделі до узагальнення.

Ефективність моделей глибокого навчання у виявленні лісових пожеж значною мірою залежить від якості та відповідності вхідних даних, що вимагає ретельної попередньої обробки та створення наборів даних.

Набори даних для навчання моделей глибокого навчання часто включають зображення з різних супутників, таких як Landsat-8, Sentinel-2, MODIS та VIIRS.³ Додатково можуть використовуватися дані з дронів та наземних сенсорів, щоб забезпечити більш повний огляд.

Створення високоякісних наборів даних для навчання є критично важливим. Це включає збір наземних даних та їх анотацію, що часто є трудомістким процесом.⁴¹ Наприклад, програмне забезпечення LabelMe використовується для анотації зображень, де кожне зображення позначається як "пожежа" або "не пожежа", а також вказуються місцезнаходження та форма об'єктів. Дослідження підкреслюють

важливість різноманітних, добре анотованих наборів даних для успішного розвитку моделей глибокого навчання.

Перед подачею супутникових зображень до моделей глибокого навчання застосовуються кілька етапів попередньої обробки для покращення якості даних та вилучення релевантних ознак.

Радіометрична та атмосферна корекція: Супутникові зображення повинні бути радіометрично та атмосферно скориговані для отримання точних значень відбивної здатності на поверхні землі. Це включає перетворення сирих цифрових номерів (DN) у відбивну здатність на вершині атмосфери (TOA).

Маскування хмар та тіней від хмар: Хмари та їхні тіні значно знижують ефективність оптичних супутникових зображень та ускладнюють аналіз часових рядів. Тому застосовуються алгоритми для виявлення та видалення цих "шумних" спостережень, забезпечуючи, щоб лише чіткі дані використовувалися для аналізу.

Обчислення вегетаційних індексів: Різні спектральні індекси розраховуються на основі комбінацій спектральних діапазонів Landsat-8 для покращення виявлення пожеж та оцінки їхньої інтенсивності. До них відносяться:

Нормалізований індекс горіння (NBR): Широко використовується для ідентифікації вигорілих площ та оцінки інтенсивності горіння. Він розраховується як відношення між ближнім інфрачервоним (NIR) та короткохвильовим інфрачервоним (SWIR) діапазонами. Зменшення значень NBR вказує на порушення, тоді як збільшення – на відновлення.

Різницевий NBR (dNBR): Отримується шляхом віднімання післяпожежного NBR від до пожежного NBR. dNBR є ключовим індикатором інтенсивності горіння та використовується для картографування інтенсивності пожежі.

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI): Хоча NDVI чутливий до перших ознак озеленення та ранніх стадій відновлення рослинності, NBR часто вважається більш чутливим до структури рослинності та відбивної здатності ґрунту, що робить його кращим для моніторингу відновлення після пожежі.

Індекс лісової пожежі (FFI): Розраховується як відношення SWIR2 до синього діапазону (Діапазон 7 / Діапазон 2). FFI ефективно виділяє фонові пожежі та

допомагає усувати дим, який може заважати виявленню.

Збільшення даних: Для розширення наборів даних та покращення узагальнювальної здатності моделей застосовуються методи збільшення даних, такі як обертання зображень, трансформації та інші комп'ютерні візуальні техніки. Це допомагає подолати проблему обмежених анотованих даних та запобігти перенавчанню.

Незважаючи на значні досягнення, існують помітні проблеми, пов'язані з наборами даних для глибокого навчання у виявленні лісових пожеж:

~ Дефіцит анотованих даних: Однією з основних проблем є потреба у великих, високоякісних та різноманітних наборах даних для ефективного навчання моделей глибокого навчання. Це особливо проблематично, оскільки анотовані дані про пожежі часто є дефіцитними та незбалансованими.

~ Незбалансованість та різноманітність: Існуючі набори даних можуть бути незбалансованими, з більшою кількістю зображень без пожежі, ніж із пожежею. Крім того, важливо, щоб набори даних охоплювали широкий спектр екологічних сценаріїв, варіантів лісів, географічних розташувань та динаміки пожеж, щоб забезпечити надійність моделі та її здатність до узагальнення.

Багатосенсорне злиття даних здійснюється для подолання обмежень окремих сенсорів та покращеного моніторингу лісових пожеж. Як обговорювалося раніше, різні супутникові сенсори мають внутрішньо притаманні компроміси між просторовою та часовою роздільною здатністю. Landsat забезпечує високу просторову деталізацію (30 м), але має відносно низьку часову роздільну здатність (8-16 днів), що ускладнює моніторинг динамічного поширення пожежі. Навпаки, MODIS (1 км) та VIIRS (375 м) пропонують щоденне або навіть частіше покриття, що є критично важливим для виявлення активних пожеж, але їхня груба просторова роздільна здатність може призвести до пропуску малих пожеж або неточного визначення меж. Крім того, оптичні датчики, такі як Landsat та Sentinel-2, сильно залежать від хмарності, яка може значно обмежувати доступність зображень у вологих кліматичних умовах. Ці обмеження підкреслюють, що жоден окремий сенсор не може надати повний спектр інформації, необхідної для ефективного управління лісовими пожежами.

Інтеграція даних з кількох сенсорів дозволяє подолати ці індивідуальні обмеження, використовуючи їхні взаємодоповнюючі сильні сторони. Наприклад, об'єднання даних Landsat з високою просторовою роздільною здатністю та даних MODIS/VIIRS з високою часовою роздільною здатністю дозволяє отримати просторово-часово безперервні набори даних, що значно покращує виявлення меж пожежі та кількісну оцінку інтенсивності. Цей підхід забезпечує більш повне та цілісне уявлення про динаміку пожежі, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих рішень.

Синергія Landsat-MODIS-VIIRS: Інтеграція даних з Landsat, MODIS та VIIRS є потужним підходом. Хоча Landsat забезпечує неперевершену просторову деталізацію для виявлення малих пожеж та точного картографування, MODIS та VIIRS пропонують частіше покриття для моніторингу активних пожеж у реальному часі. Об'єднання цих даних дозволяє як точно визначати місцезнаходження пожеж, так і оцінювати їхній ступінь поширення.

Інтеграція з SAR та геостаціонарними даними: Подальше підвищення надійності досягається за рахунок включення даних SAR, які можуть проникати крізь хмари та дим, а також геостаціонарних супутників, які забезпечують безперервний моніторинг з дуже високою часовою роздільною здатністю. Це особливо корисно в складних умовах навколишнього середовища, таких як низька видимість або густий дим.

Багатосенсорне злиття даних, особливо в поєднанні з методами глибокого навчання, значно підвищує точність та надійність систем виявлення лісових пожеж.⁶ Це призводить до покращеної здатності розпізнавати пожежі в складних сценаріях, зменшуючи як пропущені виявлення, так і помилкові спрацьовування, що є критично важливим для своєчасного та ефективного реагування на лісові пожежі.

Глибоке навчання, інтегроване з даними дистанційного зондування, трансформувало різні аспекти управління лісовими пожежами, від раннього виявлення до довгострокового відновлення.

Технології дистанційного зондування, посилені глибоким навчанням, забезпечують безперервний моніторинг певних територій, дозволяючи рано виявляти

пожежі та надавати критично важливі, своєчасні дані під час лісових пожеж. Це допомагає службам реагування відстежувати поширення, інтенсивність та напрямок пожежі. Раннє виявлення значно зменшує площу ураженої землі, потенційно рятуючи життя та майно. Це також дозволяє ефективніше розгортати ресурси, зменшуючи витрати на реагування на надзвичайні ситуації.

Системи, такі як Fire Information for Resource Management System (FIRMS), розповсюджують глобальні дані про активні пожежі в ближньому реальному часі з супутників спостереження Землі, надаючи розширені інтерактивні інструменти для прогнозування, запобігання та управління лісовими пожежами. Ці системи використовують дані MODIS та VIIRS для швидкого виявлення гарячих точок та надання сповіщень у реальному часі.

Супутникові дані, зокрема Landsat, є незамінними для оцінки інтенсивності горіння та картографування вигорілих площ. Нормалізований індекс горіння (NBR) та його різницевий варіант (dNBR) широко використовуються для цієї мети. NBR вимірює відбивну здатність у ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах, які чутливі до змін рослинності, спричинених вогнем. dNBR, розрахований як різниця між NBR до та після пожежі, надає кількісну оцінку інтенсивності горіння, що дозволяє класифікувати рівні інтенсивності. Точні дані про вигорілі площі є критично важливими для ефективного впровадження заходів з відновлення після пожежі. Вони допомагають визначити ступінь пошкодження та потенціал для регенерації, направляючи зусилля з лісовідновлення та планування відновлення екосистем.

Моніторинг екологічної сукцесії та відновлення після пожежі.

Landsat-дані, особливо при аналізі часових рядів, відіграють ключову роль у моніторингу відновлення рослинності після пожеж. Такі індекси, як NBR та NDVI, використовуються для відстеження змін у зелені та біомасі з часом. Алгоритми, такі як LandTrendr, дозволяють витягувати інформацію про те, як ландшафт змінюється внаслідок порушень (наприклад, пожежі) та відновлення, представляючи історію пікселя як лінійні сегменти, що показують зміни та подальше відновлення.

Моніторинг післяпожежного відновлення є важливим для дослідження глобального вуглецевого циклу та розуміння політики управління лісами. Він допомагає оцінити вплив різних режимів відновлення (наприклад, природна регенерація, штучне лісовідновлення) на структуру лісу та видове різноманіття. Landsat-дані можуть виявити унікальні реакції відновлення на ранніх стадіях (через 5 років) після лісових пожеж, які вказують на довгострокові відмінності в майбутніх лісах.

Застосування моделей глибокого навчання для виявлення лісових пожеж за супутниковими зображеннями є трансформаційним кроком уперед у боротьбі з цією зростаючою глобальною загрозою. Супутникові місії, такі як Landsat, MODIS, VIIRS та Sentinel-2, надають неперевершені дані для моніторингу всього життєвого циклу пожежі – від оцінки ризиків до пожежі та виявлення активних загорянь до картографування інтенсивності горіння та відстеження екологічного відновлення. Хоча окремі сенсори мають свої сильні та слабкі сторони щодо просторової та часової роздільної здатності, стратегічна інтеграція даних з кількох джерел є абсолютно необхідною для отримання всебічної та дієвої інформації.

Моделі глибокого навчання, включаючи CNN для витягування ознак, YOLO для виявлення об'єктів у реальному часі, U-Net для точної сегментації та LSTM для аналізу часових рядів, продемонстрували виняткову точність та ефективність. Їх здатність синтезувати складні, багатовимірні дані та автоматично витягувати релевантні ознаки значно перевершує традиційні методи. Однак, для повного розкриття їхнього потенціалу необхідно вирішити такі проблеми, як дефіцит великих, анотованих наборів даних, обчислювальні вимоги та вплив хмарності.

Майбутні напрямки досліджень повинні зосередитися на розробці більш досконалих гібридних архітектур глибокого навчання, впровадженні граничних обчислень для моніторингу в реальному часі та посиленні міждисциплінарної та міжнародної співпраці. Постійне вдосконалення цих технологій є вирішальним для розробки більш ефективних та точних систем виявлення пожеж, що в кінцевому підсумку сприятиме кращому управлінню лісовими пожежами, захисту екосистем та збереженню людських життів та майна.

2.3 Модель прогнозування небезпеки лісових пожеж на основі дистанційного зондування

Поняття "небезпека пожежі" є багатогранним, охоплюючи такі виміри, як потенціал займання, ймовірність поширення, інтенсивність та потенційні наслідки. Кожен окремий аспект небезпеки пожежі вимагає специфічних даних дистанційного зондування та похідних індексів для точної оцінки. Наприклад, виявлення активної пожежі значною мірою залежить від теплових смуг, тоді як вміст вологи в паливі найкраще фіксується комбінаціями SWIR/NIR, а післяпожежне відновлення вимагає аналізу часових рядів індексів рослинності. Справді комплексна та ефективна модель для "прогнозування небезпеки лісових пожеж" не може покладатися на один тип даних або спектральний індекс. Натомість вона вимагає складного багатопараметричного підходу, що інтегрує різноманітні потоки даних, адаптовані до різних аспектів пожежної небезпеки. Ця властива складність підкреслює критичну потребу в передових методах злиття даних та моделюючих фреймворках, здатних безперешкодно обробляти та синтезувати широкий спектр вхідних даних з різних платформ дистанційного зондування.

Точне прогнозування небезпеки лісових пожеж вимагає глибокого розуміння та кількісної оцінки кількох критичних екологічних параметрів. Ці фактори взаємодіють складним чином, визначаючи ймовірність займання, швидкість поширення та інтенсивність пожежі.

Вміст вологи в паливі (FMC), зокрема вміст вологи в живих паливах (LFMC), послідовно визначається як один з найважливіших вхідних даних для моделей поширення пожеж. Він безпосередньо визначає схильність рослинності до займання та поширення вогню. Високий вміст вологи значно збільшує кількість тепла, необхідного для займання палива, оскільки енергія витрачається на випаровування води. Емпіричні дані показують чіткий зв'язок: 98% лісових пожеж площею понад 500 га відбулися, коли LFMC був нижчим за 100%, а швидко поширювані лісові пожежі збігалися з нижчими умовами LFMC. Важливо, що якщо співвідношення вологи в паливі перевищує певний поріг (відомий як вологість згасання), поширення

лісової пожежі стає неможливим. І навпаки, значення LFMC, близькі до нуля, вказують на надзвичайну схильність до поширення лісової пожежі.

Методи дистанційного зондування пропонують значну перевагу над традиційними польовими роботами або метеорологічними індексами для оцінки FMC, забезпечуючи безперервне часове та просторове покриття, безпосередньо пов'язане з динамічними процесами рослинності. Спектральні індекси, такі як NDII, NDWI та GVMi, чутливі до еквівалентної товщини води (EWT) і, як очікується, забезпечують прямі оцінки LFMC завдяки характерним особливостям поглинання води в SWIR-смугах. **Перпендикулярний індекс вологості (PMI)** є новим спектральним індексом, безпосередньо пов'язаним з LFMC, отриманим з каналів MODIS 2 (0,86 мкм) та 5 (1,24 мкм), що демонструє стійкість до різних факторів відбивної здатності пологуг, крім індексу площі листя (LAI). Взаємозв'язок між температурою поверхні (Ts) та індексами рослинності (наприклад, NDVI) може дозволити вивести вологість поверхні, причому нахил співвідношення Ts-NDVI сильно корелює зі станом вологості поверхні. Цей взаємозв'язок може бути перетворений на індекс пожежної небезпеки, забезпечуючи автоматичне та просторово безперервне картографування небезпеки займання пожежі. Супутникові пасивні мікрохвильові вимірювання оптичної глибини рослинності (VOD) також можуть бути використані для оцінки вмісту LFMC, пропонуючи глобальне покриття в майже реальному часі, хоча зазвичай з грубішою просторовою роздільною здатністю.

Супутники Landsat відіграють вирішальну роль у моніторингу паливного навантаження, що є важливим для пожежних менеджерів для зменшення ризику. Мультиспектральні можливості Landsat дозволяють класифікувати рослинність на різні "типи палива", кожен з яких має різну ймовірність горіння. Програма LANDFIRE, спільна ініціатива, використовує дані Landsat для картографування рослинних матеріалів, які живлять пожежі по всій території Сполучених Штатів, тим самим допомагаючи громадам оцінювати ризик лісових пожеж. Вона створює ландшафтні карти та дані, що описують характеристики рослинності, пожеж та палива з роздільною здатністю 30 м. Дані LiDAR можуть надати додаткову, детальну

інформацію про щільність або склад дерев, доповнюючи дані Landsat для більш повного розуміння структури лісу та розташування палива.

Здорова, зволожена рослинність за своєю суттю менш схильна до горіння, тоді як суха, стресова або заросла рослинність діє як критичний "трут", посилюючи пожежі при їхньому займанні. Зображення Landsat можуть ефективно показувати, як рослинність змінюється з часом, дозволяючи виявляти ділянки, які стають сухішими або щільнішими, що вказує на підвищену займистість. Моніторинг фенології земної поверхні — термінів стадій росту та подій рослинності — важливий для розуміння тенденцій росту та сезонності рослинності до та після пожежі, а також змін у земному покриві, які можуть бути результатом управлінських втручань або мінливості клімату.

Роль висоти, схилу та експозиції в поведінці пожежі: Особливості рельєфу, такі як схил, експозиція (напрямок, куди дивиться схил) та висота, значно впливають на поведінку пожежі, впливаючи на вітрові моделі, теплопередачу та доступність палива. Топографія послідовно визначається як ключовий вхідний параметр у моделях прогнозування природних небезпек, оскільки вона фундаментально формує те, як пожежа поширюється по ландшафту. Передові моделі, такі як китайська модель поширення пожеж на основі дистанційного зондування, явно включають регіональні форми рельєфу (наприклад, лінії хребтів, лінії долин та схили) та рослинний покрив для імітації напрямку та швидкості поширення пожежі.

Метеорологічні параметри є невід'ємною частиною прогнозування небезпеки пожеж, оскільки вони безпосередньо впливають на вологість палива, займання та поширення. До них відносяться температура, вологість, швидкість та напрямок вітру, опади та індекси посухи. Наприклад, тривалі сухі літні періоди значно збільшують ризик пожеж через високу займистість хвойних лісів та макі.

Метеорологічні дані поєднуються з даними дистанційного зондування для прогнозування вологості палива (наприклад, у змішаних моделях для живих палив). Система індексу пожежної погоди (FWI) інтегрує дані про погоду (температуру, вологість, швидкість вітру та опади) для оцінки рівнів пожежної небезпеки та прогнозування поведінки пожежі.

Хоча природні фактори, такі як блискавки, є значною причиною лісових пожеж, де їх важче виявити та придушити, ніж пожежі, спричинені людиною, людська діяльність також є основним фактором.

У тропічних лісах пожежі майже повністю спричинені людиною, часто для розчищення земель під сільське господарство, і поширюються безконтрольно на сусідні ліси. Людські займання, пов'язані з сільськогосподарською діяльністю, є поширеними навесні в західній Канаді.

Історичні записи про пожежі та соціально-економічні дані є важливими для емпіричних моделей, які встановлюють зв'язки між ймовірністю пожежі та змінними навколишнього середовища.

Комплексна та ефективна модель для "прогнозування небезпеки лісових пожеж" не може покладатися на один тип даних або спектральний індекс. Натомість вона вимагає складного багатопараметричного підходу, що інтегрує різноманітні потоки даних, адаптовані до різних аспектів пожежної небезпеки. Ця властива складність підкреслює критичну потребу в передових методах злиття даних та моделюючих фреймворках, здатних безперешкодно обробляти та синтезувати широкий спектр вхідних даних з різних платформ дистанційного зондування. Ці параметри є складовими цієї багатогранної небезпеки.

Прогнозування небезпеки лісових пожеж пройшло шлях від традиційних статистичних підходів до передових методологій машинного та глибокого навчання, кожна з яких пропонує унікальні можливості та долає певні обмеження.

Традиційні методи прогнозування небезпеки лісових пожеж ґрунтуються на детерміністичних, детерміністично-імовірнісних, емпіричних та фізичних моделях.

~ **Детерміністичні підходи** покладаються на фізичні моделі для прямого моделювання та прогнозування поведінки пожежі на основі точних вхідних умов, таких як тип палива, швидкість вітру, температура та вологість. Прикладами є моделі поширення пожеж, такі як Rothermel, WRF-Fire та FARSITE, які прогнозують швидкість поширення, довжину полум'я та інтенсивність.

~ **Емпіричні підходи** використовують історичні дані про пожежі та статистичний аналіз для прогнозування майбутніх подій, встановлюючи зв'язки між

ймовірністю пожежі та змінними навколишнього середовища, такими як погодні умови, типи рослинності та людська діяльність.

Статистичні моделі використовують регресійні моделі, розроблені на основі історичних даних, для оцінки ймовірності виникнення пожежі за різних місцевих екологічних умов, наприклад, з використанням щоденних значень опадів, блискавок, температури, швидкості вітру та вологості.

Ці традиційні моделі часто покладаються на вимірювання в фіксованих точках та приблизні оцінки (наприклад, використання метеорологічних даних про вологість замість вологості палива на рівні землі), що призводить до значних розбіжностей між змодельованими результатами та фактичним поширенням пожежі. Вони можуть не мати універсальності через регіональні невідповідності в характеристиках пожежної небезпеки. Вони також мають труднощі з обробкою в реальному часі та зі складними, випадковими моделями (диму, форм пожеж). Використання фіксованих порогів яскравості температури в традиційному виявленні може зменшити застосовність алгоритму в різних просторово-часових регіонах.

3 АНАЛІЗ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

3.1 Дослідження лісових пожеж у Чорнобильській зоні

Як приклад розглянуто масштабні лісові пожежі, що сталися у квітні 2020 року в Чорнобильській зоні відчуження. Займання почалося 4 квітня 2020 року на території Котовського лісництва, в районі смт Поліське та прилеглих сіл, а згодом вогонь поширився і на Житомирську область. Для аналізу ситуації було використано знімок супутника Sentinel-2 у видимому діапазоні (комбінація каналів 4, 3, 2). На отриманому зображенні (рис. 3.1) чітко візуалізуються шлейфи диму від пожежі та ділянки вигорілого лісу.

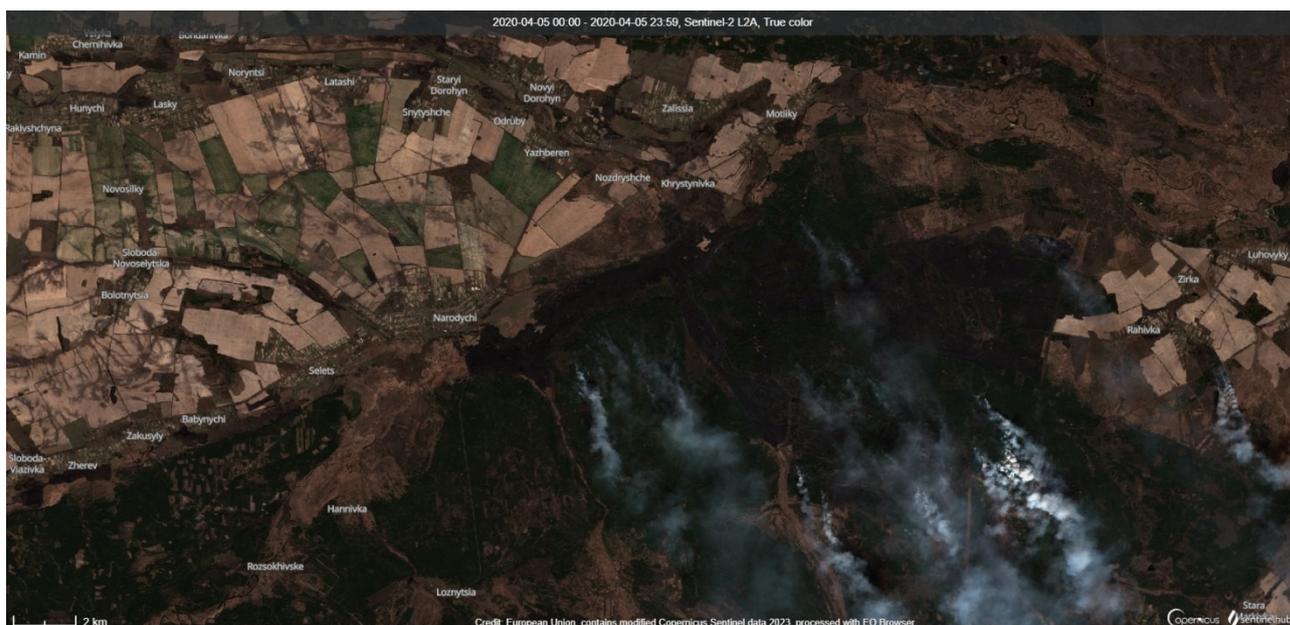


Рисунок 3.1 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, канали 4,3,2

Для точнішого окреслення меж пожежі було застосовано композитне зображення, що базується на каналах короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, канали SWIR 12, 8A, 4

Застосування композитного зображення в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR), зокрема 12-го каналу супутника Sentinel-2, дозволило чітко ідентифікувати осередки горіння та вигорілу територію. Згодом, за допомогою інструментарію EO Browser, було окреслено контур пожежі (рис. 3.3). Розрахована в результаті цього аналізу площа займання склала 113,05 км².

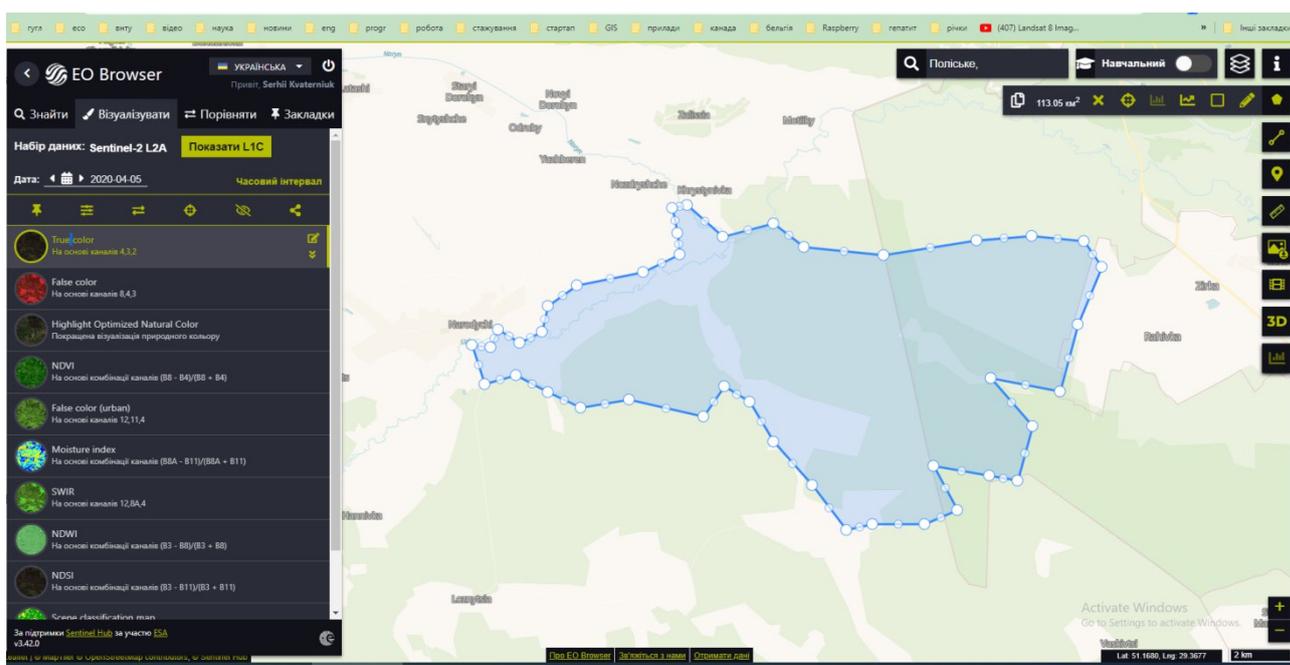


Рисунок 3.3 – Встановлення контуру пожежі (супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область)

На рис. 3.4 виділено контур пожежі. В його межах чітко розрізняються осередки займання, повністю вигорілі території та ділянки, уражені низовою пожежею, де крони дерев ще зберігають зелений колір.

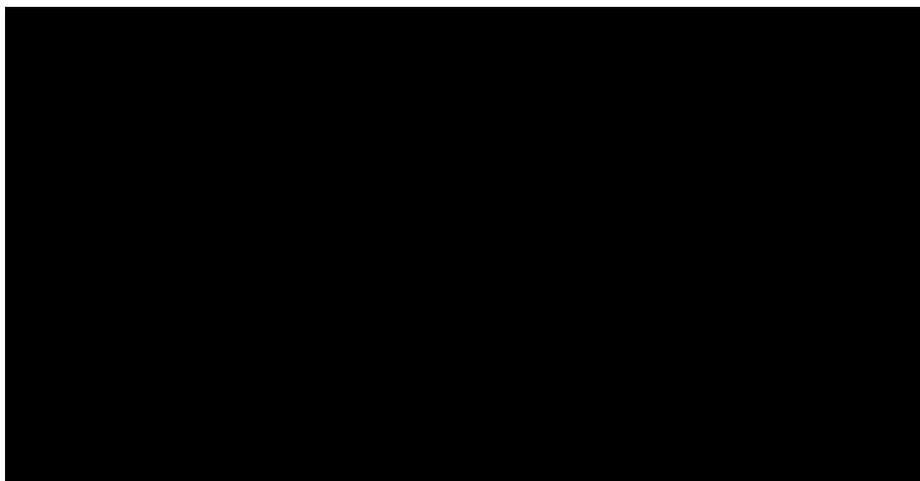


Рисунок 3.4 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, контур пожежі

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) є простим та ефективним показником для кількісної оцінки зеленої біомаси (рис. 3.5). На рис.3.6 показано динаміку його сезонних змін.

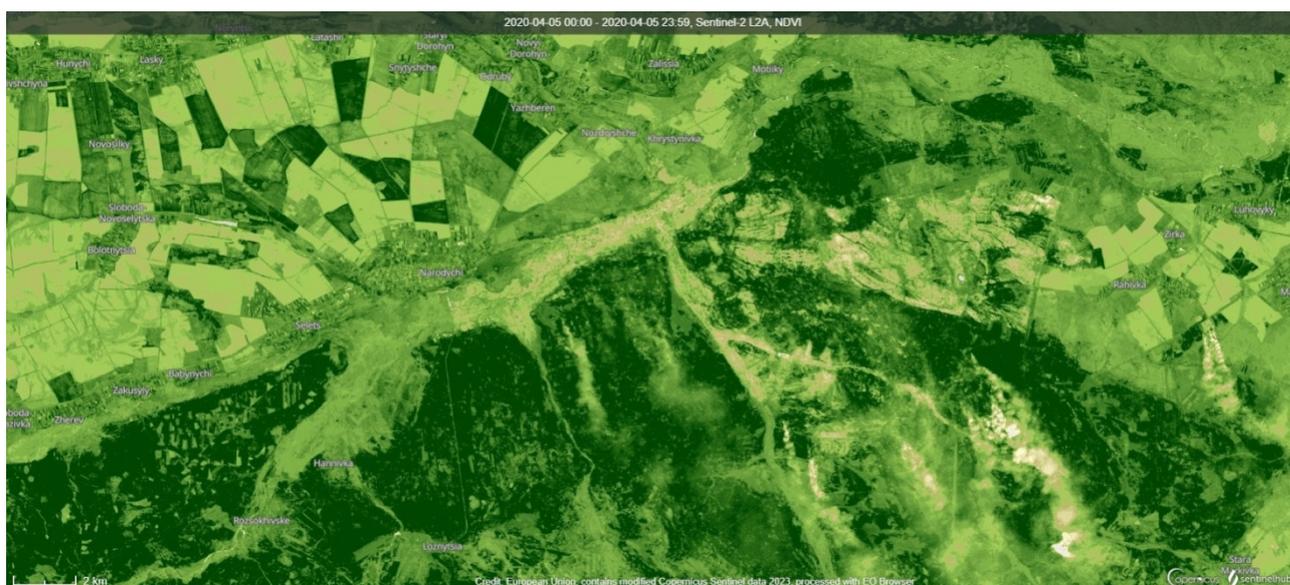


Рисунок 3.5 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, NDVI

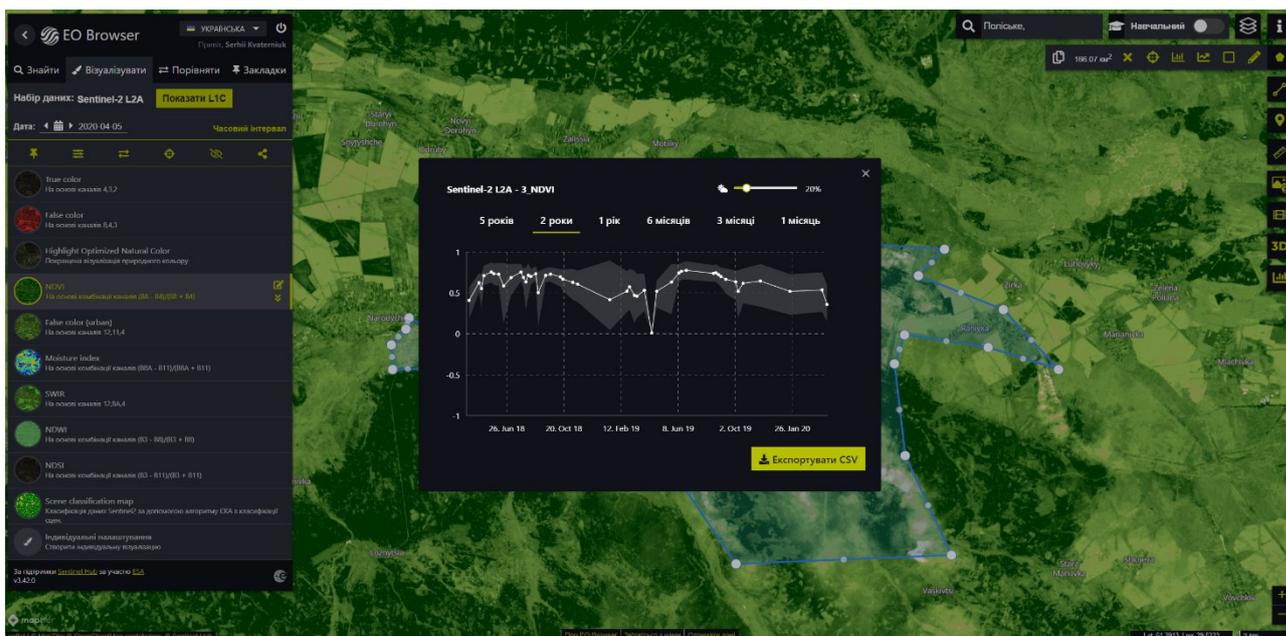


Рисунок 3.6 – Дослідження сезонної зміни індексів NDVI (супутник Sentinel-2, Поліське, Київська область)

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) — це широко вживаний та ефективний показник для кількісної оцінки зеленої рослинності. Його значення отримують шляхом нормалізації різниці між відбиттям світла від листя у ближньому інфрачервоному діапазоні та його поглинанням хлорофілом у червоному діапазоні спектра.

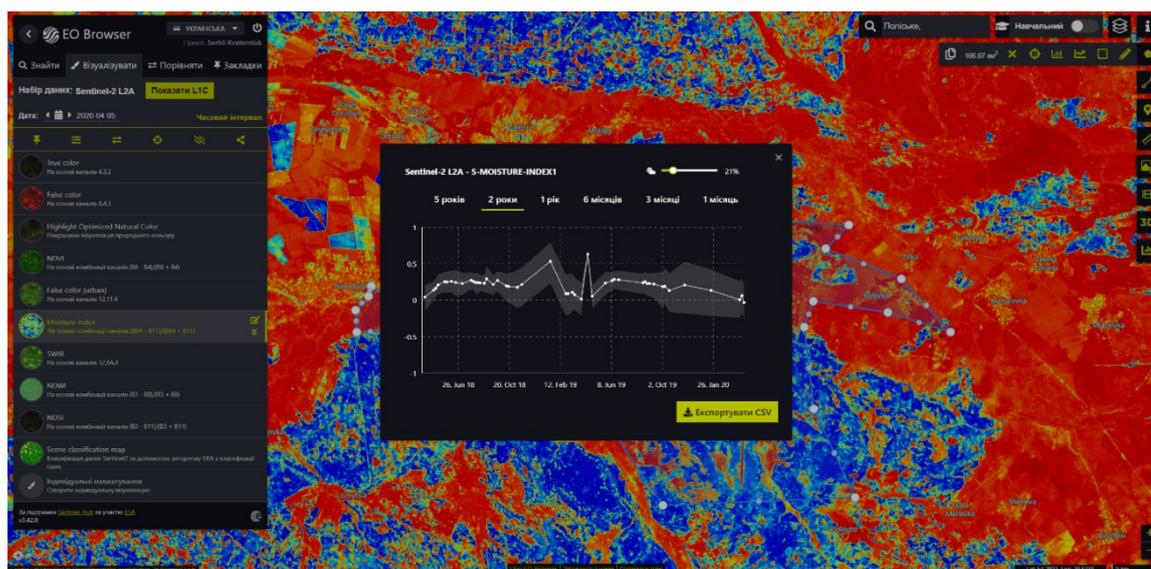


Рисунок 3.7 – Дослідження сезонної зміни індексу NDMI (супутник Sentinel-2, Поліське, Київська область)

Нормалізований диференційний індекс вологості (NDMI) використовується для оцінки вмісту води в рослинності та моніторингу посухи (рис. 3.7). Він розраховується за допомогою ближнього (NIR) та короткохвильового (SWIR) інфрачервоних каналів. Така комбінація ефективна, оскільки SWIR реагує на вологість, а NIR — на структуру листа. Їхнє поєднання дозволяє ізолювати показник вологості, мінімізуючи вплив інших факторів. Слід зазначити, що NDMI (комбінація NIR-SWIR) часто плутають з індексом NDWI. Однак ми розмежуємо ці поняття, залишаючи назву NDWI для комбінації GREEN-NIR, яка використовується для виявлення водних об'єктів, а не вологості рослин.



Рисунок 3.8 – Дослідження сезонної зміни індексу NDWI (супутник Sentinel-2, Поліське, Київська область)

Моніторинг динаміки вмісту води у водоймах здійснюється за допомогою нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI). Принцип його дії полягає у використанні зеленого та ближнього інфрачервоного спектральних каналів для ідентифікації водних поверхонь, що базується на високій поглинальній здатності води у цих діапазонах. Важливою особливістю індексу є його чутливість до антропогенних об'єктів (забудови), що може спричинити переоцінку загальної площі водних тіл.

3.2 Дослідження лісових пожеж у Херсонській області

Для аналізу лісових пожеж на території Раденського лісництва (Олешківський район, Херсонська область) було використано супутникові дані. На рис.3.9 представлено зображення, отримане із супутника Sentinel-2 у видимому діапазоні випромінювання, що є комбінацією каналів 4, 3 та 2 (True color).

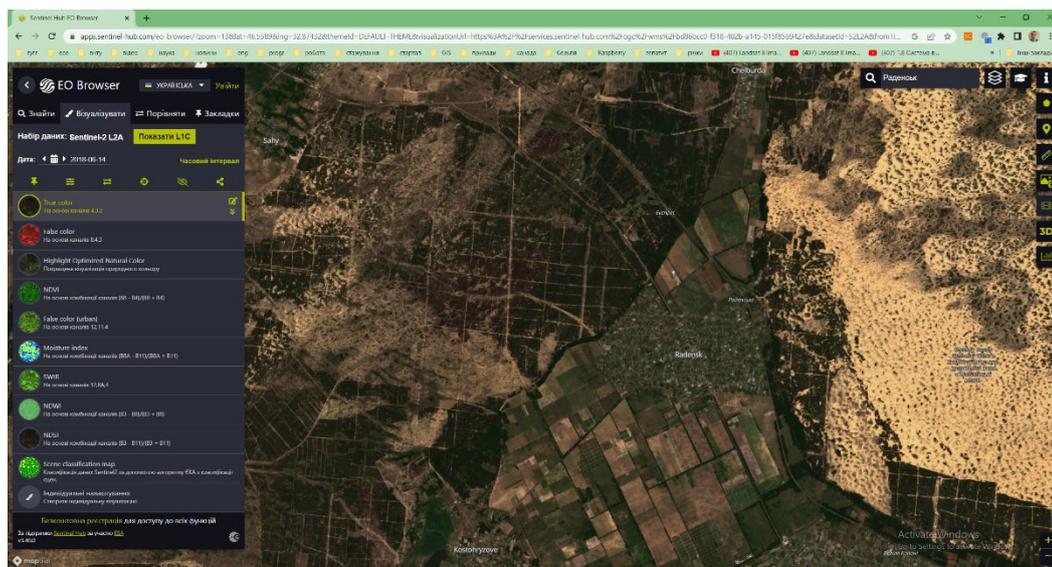


Рисунок 3.9 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, True color канали 4-3-2

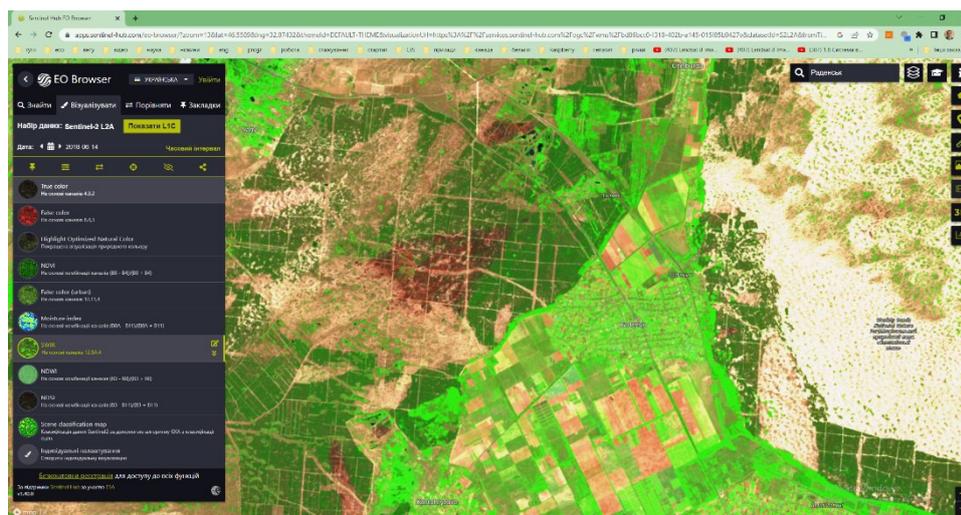


Рисунок 3.10 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, SWIR-діапазон

З метою точнішої делінеації (окреслення) контуру пожежі було застосовано композитне зображення короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) (рис. 3.10). Для оцінки змін проводиться порівняльний аналіз цього зображення зі знімком, отриманим у період до пожежі (рис. 3.11).

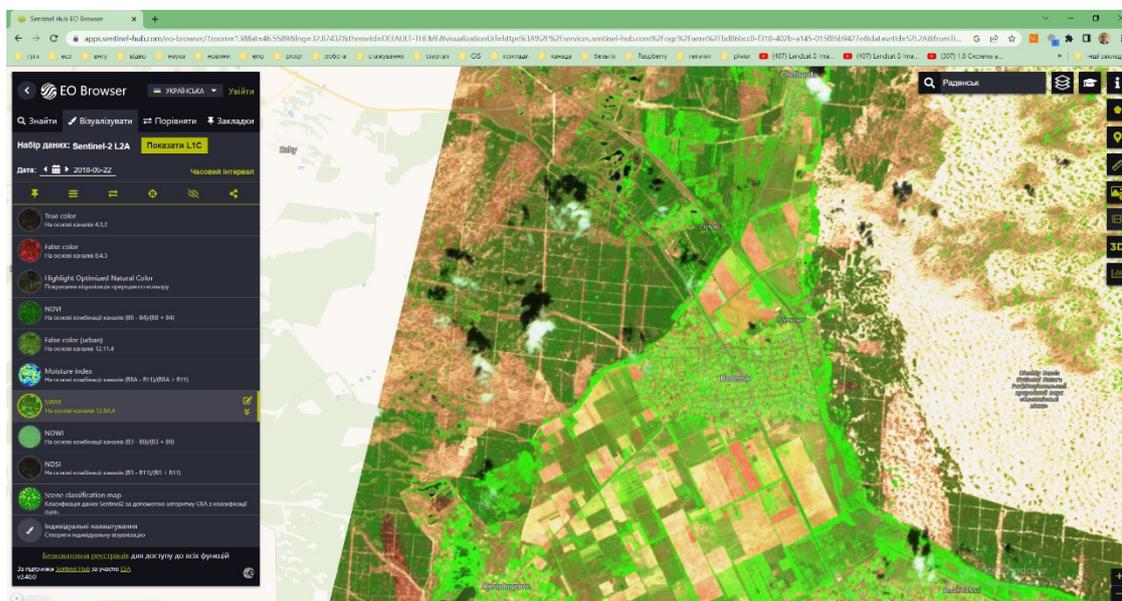


Рисунок 3.11 – Зображення поверхні перед виникненням пожежі у Херсонській області, супутник Sentinel 2, SWIR-діапазон

Також було використано композитне зображення в штучних кольорах (False color), синтезоване з каналів 8, 4 і 3 за даними супутника Sentinel-2 (рис. 3.12).

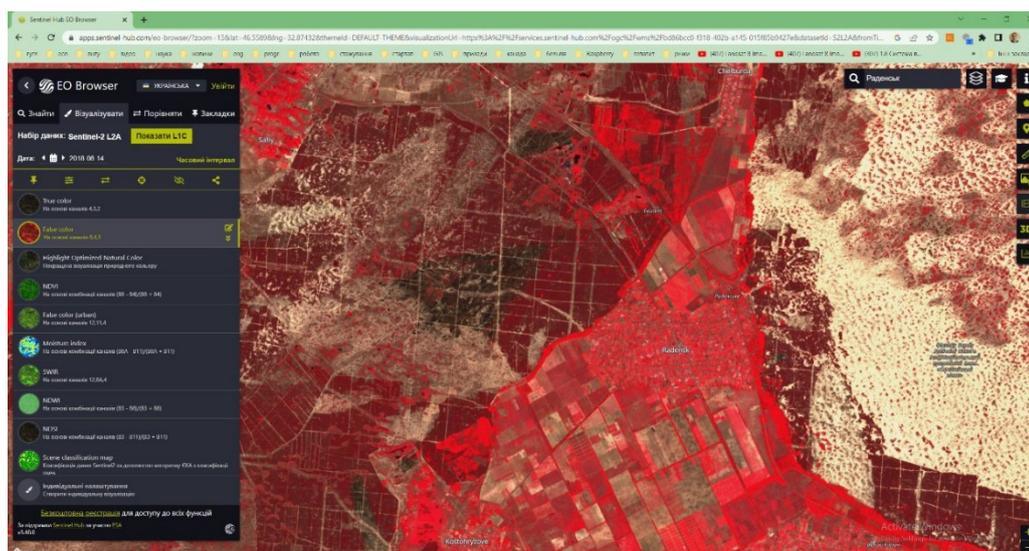


Рисунок 3.12 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, False color канали 8-4-3

Проаналізуємо сезонну динаміку нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI), що проілюстровано на рис. 3.13 та 3.14.

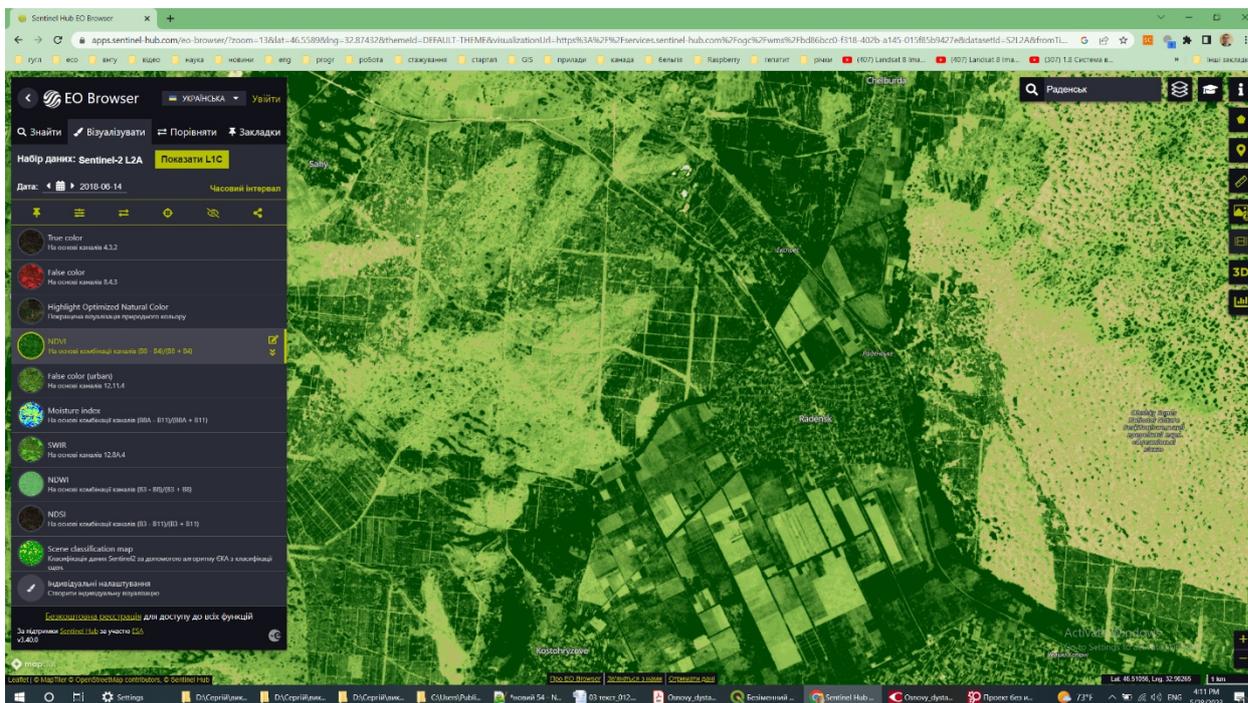


Рисунок 3.13 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, розрахунок індексу NDVI

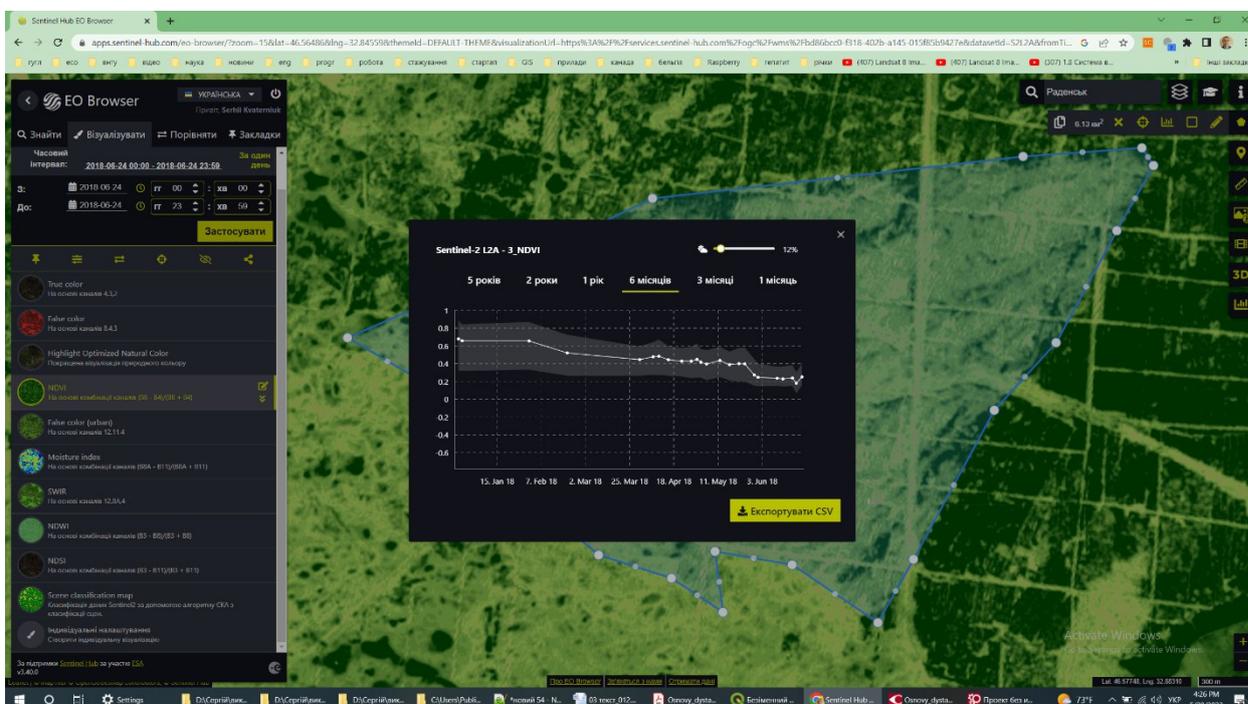


Рисунок 3.14 – Зміни індексу NDVI перед виникненням пожежі

Оцінимо сезонну зміну індексу нормалізованої різниці води NDWI (рис. 3.15, 3.16).

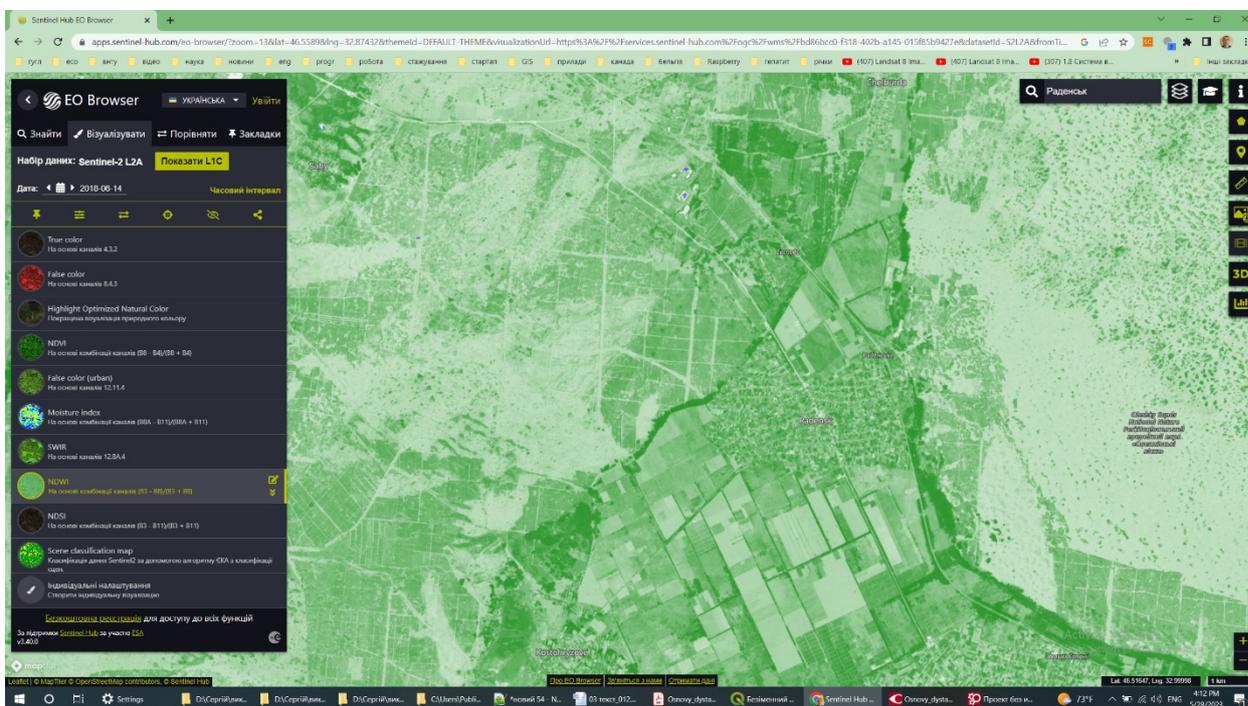


Рисунок 3.15 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, розрахунок індексу NDWI

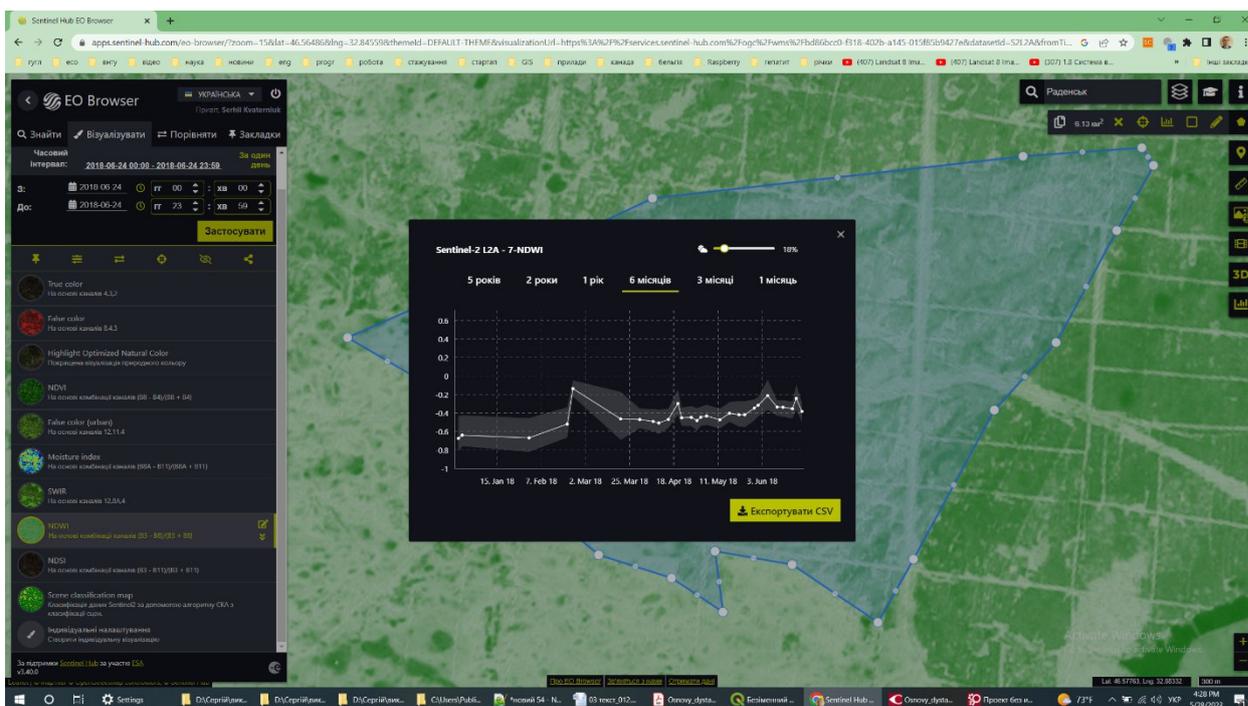


Рисунок 3.16 – Зміни індексу NDWI перед виникненням пожежі

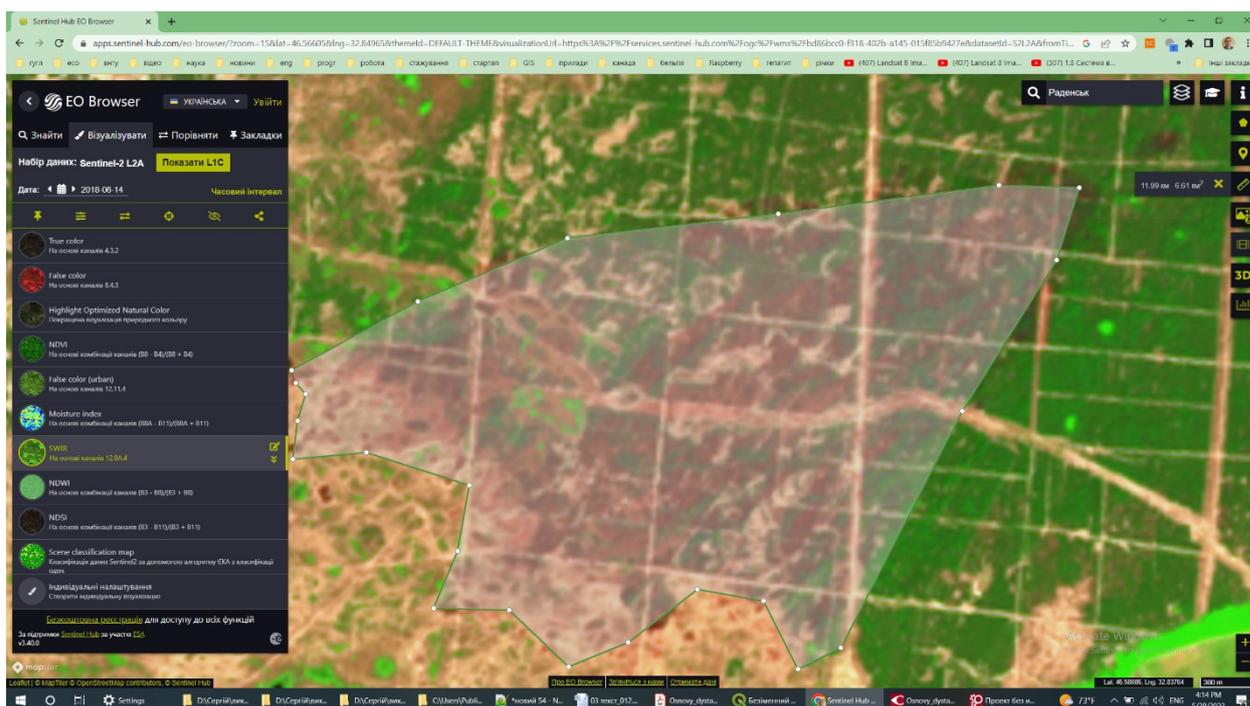


Рисунок 3.17 – Лісова пожежа у Херсонській області, супутник Sentinel 2, локалізація ділянки пожежі

Для аналізу пожежі за допомогою супутникових даних Sentinel 2 було порівняно ефективність різних комбінацій каналів. Встановлено, що стандартна комбінація True Color (канали 4-3-2, рис. 3.9) не забезпечує чіткого окреслення контурів займання. Натомість, використання каналів середнього інфрачервоного діапазону (SWIR, рис. 3.10) дозволило точно локалізувати осередок та визначити його площу, яка склала 6,61 км² (контур показано на рис. 3.17). Як менш точна альтернатива може бути застосована комбінація False Color (канали 8-4-3, рис. 3.12).

Додатково було проаналізовано фактори, що підвищують ризик виникнення пожеж. Сезонна динаміка нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI, рис. 3.13, 3.14) та індексу вологості (NDWI, рис. 3.15, 3.16) вказує на періоди стресу рослинності та низького зволоження. Важливо зазначити, що ці індекси визначають лише сприятливі умови для пожежі, тоді як її безпосередньою причиною можуть бути різноманітні природні чи антропогенні чинники.

3.3 Інноваційні рішення системи запобігання лісовим пожежам з використанням дистанційного зондування

Лісові пожежі є однією з найсерйозніших природних катастроф, що загрожують глобальним екосистемам, кліматичній стабільності та безпеці людини. Зі зростанням частоти та інтенсивності цих подій, спричинених зміною клімату, щорічно збільшуються економічні втрати, відбувається вимушене переселення громад та виникають значні ризики для здоров'я населення через задимлення. Неконтрольовані пожежі можуть швидко знищити житлові будинки та інфраструктуру, а також завдати непоправної шкоди лісам, лукам та іншим природним середовищам, призводячи до загибелі або витіснення незліченної кількості тварин і рослин.

У цьому контексті дистанційне зондування відіграє ключову роль як ефективний інструмент моніторингу та запобігання лісовим пожежам. Швидкі досягнення у цій галузі дозволяють збирати та аналізувати дані з великих територій, що є неможливим для традиційних методів. Цей звіт має на меті представити та проаналізувати десять інноваційних рішень у системах запобігання лісовим пожежам, які активно використовують технології дистанційного зондування, а також порівняти їхні можливості та обмеження.

Запобігання та управління лісовими пожежами значною мірою залежить від здатності швидко та точно виявляти вогонь, прогнозувати його поширення та оцінювати ризики. Сучасні системи досягають цього завдяки інтеграції різноманітних технологій дистанційного зондування та передових аналітичних інструментів.

Безпілотні Літальні Апарати (БПЛА): Дрони є гнучким доповненням до супутникового моніторингу. Оснащені інфрачервоними датчиками та камерами високої роздільної здатності, БПЛА можуть збирати зображення в реальному часі, охоплюючи широкі території та надаючи детальні дані навіть за різних умов освітлення. Їхня маневреність та здатність літати на контрольованій висоті дозволяють отримувати високоякісні зображення, що є критично важливим для точної ідентифікації джерел пожежі та прогнозування її поширення. Переваги БПЛА включають їхню гнучкість, доступність, можливість точного картографування та

надання даних у реальному часі. Проте, існують обмеження, такі як дальність польоту, час роботи від акумулятора та ризик падіння в умовах сильного диму або вогню.

Наземні сенсори та камери: Мережі наземних камер та датчиків забезпечують гіперлокальний та безперервний моніторинг. Ці системи можуть виявляти зміни температури, вологості, наявності дрібних частинок, диму та газів, що вказують на початок пожежі. Вони пропонують переваги у вигляді надраннього виявлення та постійного спостереження, особливо в зонах високого ризику. Однак, передача даних у віддалених районах може бути складною, і існує ризик хибних спрацьовувань.

Географічні інформаційні системи (ГІС): ГІС є центральним компонентом інтегрованих систем, що дозволяє об'єднувати та аналізувати просторові дані з різних джерел, таких як розподіл лісових ресурсів, рельєф місцевості та метеорологічні умови. Це допомагає у визначенні потенційних зон ризику, прогнозуванні шляхів поширення пожежі, а також забезпечує динамічне оновлення та візуалізацію просторових даних для відстеження пожежі в реальному часі. Крім того, ГІС відіграє ключову роль в оптимізації маршрутів порятунку, аналізуючи умови місцевості та існуючі шляхи, щоб забезпечити найшвидше прибуття до джерела пожежі.

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН): ШІ та МН революціонізують аналіз даних дистанційного зондування, дозволяючи автоматично ідентифікувати пожежі, прогнозувати їх поширення та оптимізувати розподіл ресурсів. Ці технології значно підвищують точність та ефективність виявлення диму та вогню, особливо в умовах швидкого поширення пожежі. Наприклад, алгоритм YOLOv11x демонструє високу точність (точність 0.949, повнота 0.850) у розпізнаванні диму, що є критично важливим для систем раннього попередження. Інші методи, такі як SVM, Random Forest та нейронні мережі, також успішно використовуються для картографування зон пожеж та оцінки ризиків. ШІ дозволяє системам обробляти величезні обсяги даних у реальному часі, перетворюючи їх на цінну інформацію для прийняття рішень.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ЗАПОБІГАННЯ ЛІСОВИМ ПОЖЕЖАМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

4.1 Методика калькулювання собівартості інноваційного рішення

Принциповими особливостями програмного продукту з точки зору його вартості є віртуальність [26]. Процес оцінювання визначається двома основними підходами: економічний (за ринковими цінами) та бухгалтерський (вартість розраховується на основі витрат) [27]. Необхідність оцінки собівартості програмного продукту виникає при його постановці на бухгалтерський облік, при страхуванні, а також в інших випадках. Програмний продукт відповідає визначенню нематеріального активу і підпадає під дію Положення (стандарту) бухгалтерського обліку 8 (П(С)БО 8) «Нематеріальні активи», Міжнародний стандарт бухгалтерського обліку 38 (МСБО 38) «Нематеріальні активи» [28]. Аналогічне положення у МСБО 38 [29].

Собівартість програмного продукту можна обчислити за формулою:

$$S_{пз} = S_{опл.пр.} + S_{соц.зах.} + S_{мат.} + S_{ен.} + S_{відр.} + S_{спец.уст.} + S_{стор.орг.} + S_{інш.} + S_{накл.}, \quad (4.1)$$

де $S_{пз}$ – собівартість розроблення програмного продукту;

$S_{опл.пр.}$ – затрати на оплату праці працівників, які безпосередньо зайняті розробкою програмного забезпечення;

$S_{соц.зах.}$ – затрати на соціальні заходи працівників;

$S_{мат.}$ – матеріальні витрати;

$S_{ен.}$ – витрати на енергію;

$S_{відр.}$ – витрати на службові відрядження;

$S_{спец.уст.}$ – витрати на придбання спецустаткування;

$S_{стор.орг.}$ – витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства та організації;

$S_{інш.}$ – інші витрати;

$S_{накл.}$ – накладні [27].

Перелік і склад статей калькулювання виробничої собівартості продукції встановлюється підприємством [30]. Діяльність програмістів у різних організаціях щодо виготовлення програмного продукту має свої особливості: в одному випадку вони виключно розробляють програмне забезпечення, а в другому виготовлюють програмні комплекси.

4.2 Калькуляція собівартості програмного продукту

Враховуючи, що геоінформаційні технології - програмний продукт, тому застосовувати будемо калькулювання виробничої собівартості матеріального носія з програмним продуктом.

Типова калькуляція собівартості продукції містить такі статті витрат:

- комплектуючі та матеріали;
- інформацію про матеріали, що використовуються для даного інноваційного продукту (занесено до таблиці 4.1.).

Таблиця 4.1 – Матеріали, що використовуються для даного інноваційного продукту (1 копія)

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено, шт.	Вартість витраченого матеріалу, грн
Флеш-накопичувач USB	124,00	1 шт.	124,00
Всього, грн	124,00 грн		

1. Витрати на електроенергію.

До цих витрат відноситься енергія, що використовується в процесі відтворення. Враховується фактичний час роботи комп'ютера, що необхідний для запису програмного продукту на матеріальний носій. Витрати на силову електроенергію розраховуються за формулою:

$$V_e = V \times \Pi \times \Phi \times K_{\Pi}, \quad (4.2)$$

де V – вартість 1 кВт електроенергії становить 4,32 грн./кВт;

Π – установлена потужність обладнання, 0,4 кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, яке задіяно для запису програмного продукту на матеріальний носій, 2 години;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужностей ($K_{\Pi} \leq 1$) 0,9.

Отже, на енергію витрати становлять:

$$V_e = 4,23 \times 0,4 \times 2 \times 0,9 = 3,1 \text{ грн.}$$

2. Основна зарплата робітників

Витрати за відрядною оплатою праці визначаються тарифними ставками та нормами витрат часу на виробництво одиниці продукції.

Витрати на основну заробітну плату робітників розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (4.3)$$

де n – число робіт за видами та розрядами;

t_i – норма часу на виконання конкретної операції;

K_c – коефіцієнт співвідношень ($K_c = 1..5$);

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує певну роботу, грн./год (формула 4.4). Величину основної заробітної плати робітників відображено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основна заробітна плата робітників для тиражування 1 копії програмного продукту

Найменування робіт	Трудовісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн..	Величина оплати, грн.
Тиражування матеріального носія	1	5	48×1,36	65,3
Всього				65,3

Над тиражуванням даного програмного продукту працює один робітник.

Погодинну тарифна ставка робітника розраховуємо за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – мінімальна місячна оплата праці;

K_i – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;

T_p – число робочих днів у місяці;

$T_{зм}$ – тривалість зміни.

Таким чином, погодинна тарифна ставка робітника становить:

$$C_i = \frac{8000 \cdot 1,36}{23 \cdot 8} = 59,1 \text{ грн.}$$

де M_M – мінімальна місячна оплата праці, грн;

K_i – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;

T_p – число робочих днів у місяці (21...23);

$T_{зм}$ – тривалість зміни.

Таким чином, витрати на основну заробітну плату становлять:

$$Z_p = 1 \cdot 59,1 \cdot 1,5 \approx 88,7 \text{ грн.}$$

3. Витрати на додаткову заробітну плату

До додаткової заробітної плати відносяться витрати на виплату виробничому персоналу підприємства за працю понад установлені норми, заохочувальні виплати за поточну виробничу діяльність, компенсаційні виплати, тощо. Розмір додаткової заробітної плати розраховується за формулою:

$$З_{д} = (10...12\%) \cdot З_{р}, \quad (4.5)$$

Витрати на додаткову заробітну плату становлять 10% від основної заробітної плати і дорівнюють:

$$З_{д} = 0,1 \cdot 88,7 = 8,87 \text{ грн.}$$

4. Нарахування на заробітну плату.

Розраховується за формулою:

$$В_{зп} = 0,22 \cdot (З_{р} + З_{д}), \quad (4.6)$$

Відрахування на соціальні заходи здійснюється від суми всіх витрат на оплату праці робітників, зайнятих безпосередньо розробкою сайту.

При тиражуванні програмного продукту розмір ЄСВ становить 0,22 (тобто, 22%).

$$В_{зп} = 0,22 \cdot (88,7 + 8,87) = 21,5 \text{ грн.}$$

5. Витрати на інтелектуальну власність закладаються у вартість розробки програмного продукту. Розраховується за формулою:

$$I_{в} = I_{р} \cdot k, \quad (4.7)$$

$I_{р}$ – кошти, які буде отримувати розробник за виконання кожної послуги,

k – коефіцієнт, який враховує відповідні нарахування на заробітну плату.

Таким чином, витрати на інтелектуальну власність становлять:

$$I_{в} = 2500 \cdot 1,39 = 3475 \text{ грн.}$$

6. Загальновиробничі витрати з розрахунку на одиницю продукції можна розрахувати за нормативами відносно основної заробітної плати розробника. Розраховують за формулою:

$$ЗВВ = Н \cdot З_p, \quad (4.8)$$

Норматив загальновиробничих витрат для ЕОМ становить 240%.

$$ЗВВ = 2,4 \cdot 88,7 = 212,9 \text{ грн.}$$

Сума усіх зазначених статей витрат утворює виробничу собівартість для даного програмного продукту.

Таблиця 4.3 – Калькуляція виробничої собівартості інноваційного рішення

Стаття калькуляції	Витрати, грн.
1. Витрати на електроенергію	3,1
2. Основні заробітна плата операторів	88,7
3. Додаткова заробітна плата	8,87
4. Нарахування за заробітну плату	21,5
5. Витрати на інтелектуальну власність	3475
6. Загальновиробничі витрати	212,9
Виробнича собівартість інноваційного рішення	3810,07

Отже, виробнича собівартість інноваційного рішення становить 3810,07 гривень.

4.3 Визначення ціни і критичного обсягу виробництва інноваційного рішення

Формування і реалізація цінової політики вимагає більш чіткого розуміння процесу впливу цінової діяльності в умовах ринку на формування прибутку підприємства. Інноваційний шлях розвитку, як один з найважливіших чинників економічного росту, припускає випуск і поширення принципово нових видів техніки

і технології, розробку науково-технічних програм, розробку і запровадження ресурсозберігаючих програм та ін.

Нижня межа ціни реалізації інноваційного рішення розраховується за формулою:

$$C_{н.м.} = S_B \cdot \left(1 + \frac{P}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{ПДВ}}{100}\right), \quad (4.9)$$

S_B – виробнича собівартість інновац. рішення, грн;

P – узгоджений із замовником норматив рентабельності ($P = 35\%$);

$\alpha_{ПДВ}$ – ставка податку на додану вартість, % ($\alpha_{ПДВ} = 20\%$).

$$C_{н.м.} = 3810,07 \cdot \left(1 + \frac{35}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 6172,3 \text{ грн.}$$

Верхня межа ціни інноваційного рішення відображає ціну, яку готовий платити споживач за інноваційний товар:

$$C_{в.м.} = C_{н.м.} \cdot K_{я.в.}, \quad (4.10)$$

$K_{я.в.}$ – відносний рівень якості інноваційного рішення.

$$C_{в.м.} = 6172,3 \cdot 2,21 = 13640,8 \text{ грн.}$$

Договірна ціна може бути встановлена за домовленістю між виробником і споживачем в інтервалі між нижньою та верхньою лімітними цінами.

$$C_{н.м.} > C_{дог} > C_{в.м.}$$

Критичний обсяг виробництва інноваційного продукту визначається за формулою:

$$Q_k = \frac{0,3 \cdot S_B \cdot ПП}{C_{дог} - 0,7 \cdot S_B}, \quad (4.11)$$

де $C_{дог}$ – договірна ціна (без ПДВ),

$$Ц_{\text{дог}} = \frac{5}{6} \cdot 13640,8 = 11367,3 \text{ грн.}$$

По формулі (4.11) отримуємо:

$$Q_k = \frac{0,3 \cdot 3810,07 \cdot 15}{11367,3 - 0,7 \cdot 3810,07} = 2 \text{ копії/рік.}$$

Якщо порівнювати значення реалістичного попиту та критичного обсягу, то він перевищує значення другого, що говорить про те, що є підстави припускати, що дана інновація принесе прибутки.

4.4 Визначення експлуатаційних витрат при використанні інноваційного рішення

Експлуатаційні витрати при використанні розроблюваного програмного продукту враховують фактичну кількість годин, які працівник витрачає на його обслуговування.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу розраховується за формулою:

$$З_{\text{обс}} = 12 \cdot M \cdot \beta, \quad (4.12)$$

де 12 – число місяців;

M – місячний посадовий оклад програміста, M = 18000 грн ;

β – частка часу, який витрачає працівник для технічного обслуговування, $\beta = 0,01$.

$$З_{\text{обс}} = 12 \cdot 18000 \cdot 0,01 = 2160 \text{ грн/рік.}$$

Додаткова заробітна плата розраховується за формулою :

$$З_{\text{д}} = (10 \dots 12\%) \cdot З_{\text{обс}}, \quad (4.13)$$

$$З_{\text{д}} = 0,11 \cdot 996 = 237,6 \text{ грн/рік.}$$

Нарахування на заробітну плату визначаємо за формулою:

$$H_{зп} = 0,22 \cdot (З_{обс} + З_{д}), \quad (4.14)$$

$$H_{зп} = 0,22 \cdot (2160 + 237,6) = 527,5 \text{ грн.}$$

Введений в експлуатацію програмний продукт відносять до складу об'єктів нематеріальних активів підприємства, які протягом терміну корисного використання амортизуються з метою відновлення її вартості.

Амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$A = \frac{Ц_{дог} \cdot H_a}{100}, \quad (4.15)$$

де $Ц_{дог}$ – договірна ціна нематеріального активу (без ПДВ),

$$Ц_{дог} = \frac{5}{6} \cdot 13640,8 = 11367,3 \text{ грн.}$$

H_a – річна норма амортизації, %.

Норма амортизації розраховується за наступною формулою:

$$H_a = \frac{100}{T_{кор}}, \quad (4.16)$$

$T_{кор}$ – корисний термін використання програмного продукту.

Корисний термін використання програмного продукту становить 2 роки.

$$H_a = \frac{100}{2} = 50,$$

$$A = \frac{11367,3 \cdot 50}{100} = 5683,7 \text{ грн/рік.}$$

Інші витрати приймаємо за 5% від суми всіх попередніх витрат.

Результатом розрахунку витрат експлуатаційних є таблиця 4.4.

Таблиця 4.4 – Експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Витрати, грн
Витрати на заробітну плату	2160
Додаткова заробітна плата	237,6
Нарахування на заробітну плату	527,5
Амортизаційні відрахування	5683,7
Інші витрати	430,4
Експлуатаційні витрати – Е	9039,2

Експлуатаційні витрати на програмний продукт за 12 місяців становлять 9039,2 гривень.

В даному розділі було розраховано виробничу собівартість, визначено ціну та критичний обсяг виробництва інноваційного продукту, а також розраховано експлуатаційні витрати.

В ході виконання розрахунків було отримано такі результати:

виробнича собівартість становить 3810,07 грн;

нижня і верхня межа ціни відповідно становить 6172,3 грн та 13640,8 грн;

витрати експлуатаційні при використанні продукту становлять 9039,2 грн.

обсяг критичного виробництва відповідає 2 копії/рік.

Виходячи з вище отриманих результатів, а саме низька ціна і співвідношення обсягу критичного виробництва та реалістичного прогнозу, припускаємо, що впровадження даної інновації буде прибутковою справою, але для повної оцінки ситуації необхідно провести додаткові обрахунки по визначенню економічної ефективності інноваційного рішення.

4.5 Оцінювання економічної ефективності інноваційного рішення

Основними критеріями економічної ефективності інноваційних проектів є розрахунок та аналіз таких показників:

- чистий дисконтовий дохід;
- період окупності;
- індекс рентабельності.

Чистий приведений дохід (чистий дисконтований дохід) фактично є різницею між сумою вкладених інвестицій та загальною сумою доходу від цієї інвестиції протягом планованого періоду. Оскільки грошові потоки розподіляються в часі, то вони повинні бути дисконтовані (приведені до теперішньої вартості) за допомогою норми дисконту, що встановлюється інвестором на основі щорічного відсотка, який він хоче мати на інвестований капітал.

Термін окупності – це період часу (кількість років), протягом якого відбудеться відшкодування суми інвестицій, тобто вона повернеться інвестору як чистий дохід (чистий прибуток плюс амортизація).

Рентабельність інвестицій є відносним показником на відміну від чистого приведенного ефекту, за допомогою якого також можна здійснювати оцінку та вибір одного проекту з декількох альтернативних. Під час оцінювання економічної ефективності інноваційного рішення головним завданням є визначення вартості майбутніх вигід, які можна одержати протягом терміну реалізації рішення. При цьому майбутня вартість вигід через процедуру дисконтування приводиться до їхньої дійсної вартості. Ефективність інновації – це відносна величина, що характеризує результативність будь-яких затрат в інноваційне рішення.

Чистий дисконтований дохід розраховується за формулою:

$$D = \sum_t^T \frac{W_t}{(1+i)^{t-1}} - \sum_t^T \frac{K_t}{(1+i)^{t-2}}, \quad (4.17)$$

де T – термін здійснення проекту, становить 2 роки;

i – норма дисконту, яка є прийнятною для інвестора, як норма доходу на капітал, становить 20 %;

t – номер кроку розрахунку;

W_t – грошовий потік t -му році, грн.

K_t – капіталовкладення на t -му році, грн..

Капіталовкладення розраховується за формулою:

$$K_t = 0,2 \cdot Q \cdot C_{\text{дог.}}, \quad (4.18)$$

де Q – річний обсяг реалізованої продукції (шт/рік). Дане значення можна прийняте рівним реалістичному попиту РП. (РП = 15 копій/рік)

З формули (4.18), маємо:

$$K_t = 0,2 \cdot 15 \cdot 11367,3 = 34101,9 \text{ грн.}$$

Грошовий потік знаходиться за такою формулою:

$$W_t = \Pi_{\text{ч}} + A, \quad (4.19)$$

$$W_t = 69650,96 + 5683,7 = 75334,66 \text{ грн}$$

де A – амортизаційні відрахування, які становлять 10% від загальної собівартості реалізованої продукції за рік, грн;

$\Pi_{\text{ч}}$ – чистий прибуток, грн і розраховується за формулою:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_{\text{о}} \cdot (1 - \alpha_{\text{н}}), \quad (4.20)$$

$$\Pi_{\text{ч}} = 84940,2 \cdot (1 - 0,18) = 69650,96 \text{ грн}$$

де $\alpha_{\text{н}}$ – ставка податку на прибуток, становить 18%;

$\Pi_{\text{о}}$ – оподаткований прибуток, грн.

Оподаткований прибуток $\Pi_{\text{о}}$ знаходиться за формулою:

$$\Pi_{\text{о}} = \left(\frac{C_{\text{дог.}}}{1 + \alpha_{\text{пдв}}} - S_{\text{в}} \right) \cdot Q, \quad (4.21)$$

де $\alpha_{\text{пдв}}$ – ставка прибутку на додану вартість, що становить 20 %;

Таким чином, з формули (4.21) маємо:

$$\Pi_0 = \left(\frac{11367,3}{1 + 0,2} - 3810,07 \right) \cdot 15 = 84940,2 \text{ грн.}$$

Використовуючи формулу (4.17), знаходимо чистий дисконтований дохід:

$$D = \left(\frac{75334,66}{(1 + 0,2)^{1-1}} + \frac{75334,66}{(1 + 0,2)^{2-1}} \right) - \left(\frac{34101,9}{(1 + 0,2)^{1-1}} \right) = 109695 \text{ грн.}$$

Оскільки $D > 0$, інноваційний проект доцільно прийняти.

Ще одним показником ефективності інноваційного рішення є період його окупності, який розраховується за формулою:

$$T = \frac{\sum_t^T \frac{K_t}{(1+i)^{t-1}}}{\sum_t^T \frac{\Pi_0}{(1+i)^{t-1}}}. \quad (4.22)$$

$$T = \frac{\frac{34101,9}{(1+0,2)^{1-1}}}{\frac{75334,66}{(1+0,2)^{1-1}} + \frac{75334,66}{(1+0,2)^{2-1}}} \approx 0,206 \text{ року} = 2,5 \text{ місяці.}$$

Також показником ефективності є індекс рентабельності. Його розраховують за такою формулою:

$$IP = \frac{\sum_t^T \frac{W}{(1+i)^{t-1}}}{\sum_t^T \frac{K_t}{(1+i)^{t-1}}}. \quad (4.23)$$

З формули (4.23) отримуємо:

$$IP = \frac{\frac{75334,66}{(1+0,2)^{1-1}} + \frac{75334,66}{(1+0,2)^{2-1}}}{\frac{34101,9}{(1+0,2)^{1-1}}} = 4,9.$$

Враховуючи те, що чистий дисконтований дохід $D > 0$ і становить 109695 грн, то впровадження запропонованого інноваційного рішення є прибутковим, доцільним, а отже економічно ефективним.

В той же час і період окупності $T = 2,5$ місяці, що дає підстави стверджувати, що інноваційна ідея буде привабливою для інвесторів. Також економічну ефективність даної інновації підтверджує і індекс рентабельності, що становить 4,9.

ВИСНОВКИ

Комплексний аналіз основних підходів до дослідження лісових пожеж виявляє динамічну та багатогранну галузь, що постійно адаптується до зростаючої глобальної загрози. Досягнення в дистанційному зондуванні та ГІС революціонізували збір та аналіз просторових даних, перетворивши їх на основу сучасної науки про пожежі. Ці технології не тільки дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі та оцінку впливу, але й значно покращують прогностичні можливості. Водночас, моделювання поширення та поведінки пожеж, що включає як фізично обґрунтовані, так і емпіричні підходи, а також нові методи ШІ/МН, є критично важливим для прогнозування та оптимізації управління. Найбільш нагальним викликом, що посилює всі інші, є зміна клімату, яка фундаментально змінює режими пожеж і вимагає постійної адаптації дослідницьких методологій.

На основі цього аналізу надаються наступні рекомендації для майбутніх досліджень та управління лісовими пожежами:

- Пріоритет дослідженням дистанційного зондування та ШІ/МН: Це покращить можливості прогнозування, моніторингу та раннього виявлення, дозволяючи більш своєчасне та ефективне реагування.
- Розробка більш надійних та масштабованих моделей пожеж: Ці моделі повинні враховувати вплив зміни клімату та різні просторові/часові масштаби, щоб забезпечити точніші прогнози в умовах, що швидко змінюються.
- Покращення збору, стандартизації та механізмів обміну даними: Подолання проблем інтеграції даних є фундаментальним для розблокування повного потенціалу міждисциплінарних досліджень та підвищення точності моделей.
- Перетворення результатів досліджень на дієву політику та адаптивні стратегії управління: Це забезпечить, щоб наукові знання ефективно використовувалися для запобігання, гасіння та відновлення, сприяючи стійкості до лісових пожеж у глобальному масштабі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи дистанційного зондування Землі : робочий зошит. Частина 1. / С. М. Бабійчук, Л. Я. Юрків, О. В. Томченко, Т. Л. Кучма. – Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 122 с.
2. Forest fire vulnerability mapping of Jammu and Kashmir. Project Implementing Agency Department of Ecology, Environment & Remote Sensing, Government of Jammu and Kashmir, 2021. 200 p.
3. Faour G. Forest fire fighting in lebanon using remote sensing and GIS. Technical Report, 2004. 161 p.
4. Zhang X, Lan M, Ming J, Zhu J, Lo S. Spatiotemporal Heterogeneity of Forest Fire Occurrence Based on Remote Sensing Data: An Analysis in Anhui, China. *Remote Sensing*. 2023, 15(3). P. 598.
5. Chaudhary S.K., Pandey A.C., Parida B.R. Forest Fire Characterization Using Landsat-8 Satellite Data in Dalma Wildlife Sanctuary. *Remote Sens Earth Syst Sci*. 2022, 5(4). P. 230-245.
6. Yoojin Kang, Eunna Jang, Jungho Im & Chung Eun Kwon. A deep learning model using geostationary satellite data for forest fire detection with reduced detection latency, *GIScience & Remote Sensing*, 2022. 59:1. P. 2019-2035.
7. Dumka U.C., Kosmopoulos P.G., Patel P.N., Sheoran R. Can Forest Fires Be an Important Factor in the Reduction in Solar Power Production in India? *Remote Sensing*, 2022. 14(3). P. 549.
8. Ahmed M.R., Hassan Q.K., Abdollahi M., Gupta A. Introducing a New Remote Sensing-Based Model for Forecasting Forest Fire Danger Conditions at a Four-Day Scale. *Remote Sensing*, 2019. 11(18). P. 2101.
9. Основи дистанційного зондування Землі : історія та практичне застосування : навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. – К. : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 316 с.

10. Landsat [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Landsat>. (дата звернення: 28.05.2023).
11. Landsat Then and Now [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>. (дата звернення: 28.05.2023).
12. Bauman P.R. Remote Sensing History. Part II. GEO/SAT2. New York State University. Department of Geography. Oneonte. – New York, 13820. – 2009.
13. Landsat 9 Is Coming [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/nasa-usgs-begin-work-on-landsat-9-to-continue-land-imaging-legacy/>. (дата звернення: 28.05.2023).
14. Focus on Copernicus applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Focus_on_Copernicus_applications. (дата звернення: 28.05.2023).
15. Первинна обробка (нормалізація) даних ДЗЗ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://helpiks.org/6-84343.html>. (дата звернення: 28.05.2023).
16. Abdollahi M., Islam T., Gupta A., Hassan Q. An Advanced Forest Fire Danger Forecasting System: Integration of Remote Sensing and Historical Sources of Ignition Data. *Remote Sens.*, 2018. 10. P. 923.
17. Chowdhury E.H., Hassan Q.K. Development of a new daily-scale forest fire danger forecasting system using remote sensing data. *Remote Sens.*, 2015. 7. P. 2431-2448.
18. Babu K.V.S., Kabdulova G., Kabzhanova G. Developing the Forest Fire Danger Index for the Country Kazakhstan by Using Geospatial Techniques. *J. Environ. Inform. Lett.*, 2019. 1. P. 48-59.
19. Yu B., Chen F., Li B., Wang L., Wu M. Fire Risk Prediction Using Remote Sensed Products: A Case of Cambodia. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 2017. 83. P. 19-25.
20. Chowdhury E.H., Hassan Q.K. Use of remote sensing-derived variables in developing a forest fire danger forecasting system. *Nat. Hazards*, 2013. 67. P. 321-334.

21. Akther M.S., Hassan Q.K. Remote sensing-based assessment of fire danger conditions over boreal forest. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2011. 4. P. 992-999.
22. Li X., Lanorte A., Telesca L., Song W., Lasaponara R. Assessment of MODIS-Based NDVI-Derived Index for Fire Susceptibility Estimation in Northern China Abstract. In *Computational Science and Its Applications—ICCSA 2015*; Springer International Publishing AG Switzerland: Banff, AB, Canada, 2015. P. 193-203.
23. Bisquert M., Caselles E., Sanchez J.M., Caselles, V. Application of artificial neural networks and logistic regression to the prediction of forest fire danger in Galicia using MODIS data. *Int. J. Wildl. Fire*, 2011. 21. P. 1025-1029.
24. Liu W., Wang S., Zhou Y., Wang L., Zhu J., Wang F. Lightning-caused forest fire risk rating assessment based on case-based reasoning: A case study in DaXingAn Mountains of China. *Nat. Hazards* 2016, 81, 347-363.
25. Arganaraz J.P., Landi M.A., Bravo S.J., Gavier-Pizarro G.I., Scavuzzo, C.M., Bellis L.M. Estimation of Live Fuel Moisture Content from MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2016. 9. P. 5339-5349.
26. Біляченко О.П. Особливості програмного продукту на рахунках бухгалтерського обліку /О.П. Біляченко// Вісник ЖДТУ. – 2010.- № 4(54). – С.22- 26.
27. Гроховатський В.О. Методика визначення собівартості програмного забезпечення /В.О. Гроховатський, В.Ю. Дубницький, А.М. Кобилін, В.О. Лукін, О.В. Москаленко// Системи обробки інформації. – 2014. - випуск 4(120). – С.90-96.
28. Водоп'янова О. Облік витрат на створення веб-сайта /О. Водоп'янова// Дебет Кредит. – 2013. - №43. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://online.dtkr.ua/2013/43/60872>.

29. Волянюк І.В. Особливості бух обліку в ІТ-компаніях / Вісник. Офіційно про податки. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.buh24.com.ua/osoblivosti-buhgalterskogo-obliku-v-it-kompaniyah/>.
30. Диба М.І. Формування облікової інформації для управління витратами на інновації / М.І. Диба, В.В. Гик // Економіка: реалії часу. – 2015. - №4(20). – С.223-227.

ДОДАТОК А
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Вдосконалення системи запобігання лісовим пожежам з використанням 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 2,5 %

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)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Кватернюк С. М.

Здобувач

Дзюбенко К.Р.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Методика розрахунку спектральних індексів

<p>NDVI Sentinel 2 (B8A-B04) / (B8A+B04)</p> <p>NDVI Landsat 8 (B5-B4)/(B5+B4)</p>	<p>Нормалізований диференційний індекс рослинності часто використовується для моніторингу посухи, для сільськогосподарського виробництва тощо. NDVI - це стандартизований індекс рослинності, який дає нам змогу генерувати зображення, що показують відносну біомасу. Поглинання хлорофілу у червоній смузі і відносно висока відбивна здатність рослинності в ближній інфрачервоній смузі (NIR) використовуються для розрахунку NDVI.</p>
<p>ARVI Sentinel 2 (B08-(B04- 1*(B02-B04))) / (B08+(B04- 1*(B02-B04)))</p> <p>ARVI Landsat 8 (B5-(B4-1*(B2-B4))) / (B5+(B4-1*(B2-B4)))</p>	<p>Вегетаційний індекс стійкий до впливу атмосфери. Це поліпшений NDVI, який використовується для корекції впливу атмосфери. Він найбільш корисний в регіонах з високим вмістом атмосферного аерозолу, в тому числі в тропічних районах, забруднених сажею. Користувачі використовують його спільно з NDVI.</p>
<p>EVI Sentinel 2 $2.5 * ((B8A - B04) / ((B8A + 6 * B04 - 7.5 * B02) + 1))$</p> <p>EVI Landsat 8 $2.5 * ((B5 - B4) / ((B5 + 6 * B4 - 7.5 * B2) + 1))$</p>	<p>Розширений індекс рослинності EVI - це «оптимізований» індекс рослинності, призначений для посилення сигналу рослинності з поліпшеною чутливістю в регіонах з високою біомасою і поліпшеним моніторингом рослинності за рахунок зменшення впливу атмосфери.</p>
<p>SIPI Sentinel 2 (B08-B02)</p>	<p>SIPI дає змогу визначити початкову стадію хвороби</p>

/ (B08-B04) SIPI Landsat 8 (B5-B2) / (B5-B4)	рослин. Аналізується разом з NDVI. SIPI є хорошим індикатором для використання в районах з високою мінливістю структури рослинності.
NBR Sentinel 2 (B8A-B12) / (B8A+B12) NBR Landsat 8 (B5-B7) / (B5+B7)	Стандартизований індекс горіння NBR використовує канали NIR і SWIR для виділення згорілих ділянок, приглушує різницю в освітленні та атмосферних умовах. Перед використанням цього індексу ваші зображення мають бути скориговані з урахуванням значень відбиття.
NDWI Sentinel 2 (B03-B08) / (B03+B08) NDWI Landsat 8 (B3-B5) / (B3+B5)	Нормалізований різницевий водний індекс NDWI використовує відбите ближнє інфрачервоне випромінювання і видиме зелене світло, щоб посилити присутність таких елементів, виключаючи при цьому наявність елементів ґрунту і наземної рослинності. NDWI дає змогу дослідникам оцінити каламутність водних об'єктів за допомогою космічних знімків.
Index Stack Sentinel 2 (B03-B11) / (B03+B11), (B8A-B04) / (B8A+B04), (B03-B08) / (B03+B08) INDEX STACK Landsat 8 (B3-B6) / (B3+B6), (B5-B4) / (B5+B4), (B3-B5) / (B3+B5)	У цьому індексі зображення змінюється, і певні кольори можуть бути прирівняні до різних елементів ландшафту. Наприклад, рослинність тут стає зеленою, вода - фіолетовою, сніг/лід - пурпуровим, а ґрунт, камені і безплідна земля - синіми.
NDSI Sentinel 2 (B03-B11) / (B03+B11) NDSI Landsat 8 (B3-B6) /	Нормалізований індекс різниці снігу NDSI - це відношення спектральних каналів, яке використовує спектральні відмінності снігу в короткохвильовому інфрачервоному і видимому спектральних діапазонах для

(B3+B6)	<p>ідентифікації снігу в порівнянні з іншими об'єктами в сцені. На видимих довжинах хвиль сніговий покрив настільки ж яскравий, як хмари, і тому його важко відрізнити від хмарного покриву. Однак при довжині хвилі 1,6 мікрон сніговий покрив поглинає сонячне світло, і тому має вигляд набагато темніший від хмар. Це дає змогу ефективно розрізнити сніговий покрив і хмари. Значення $NDSI > 0,4$ зазвичай вказують на наявність снігу.</p>
---------	---

ДОДАТОК В

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ЛІСОВИМ ПОЖЕЖАМ З
ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ**

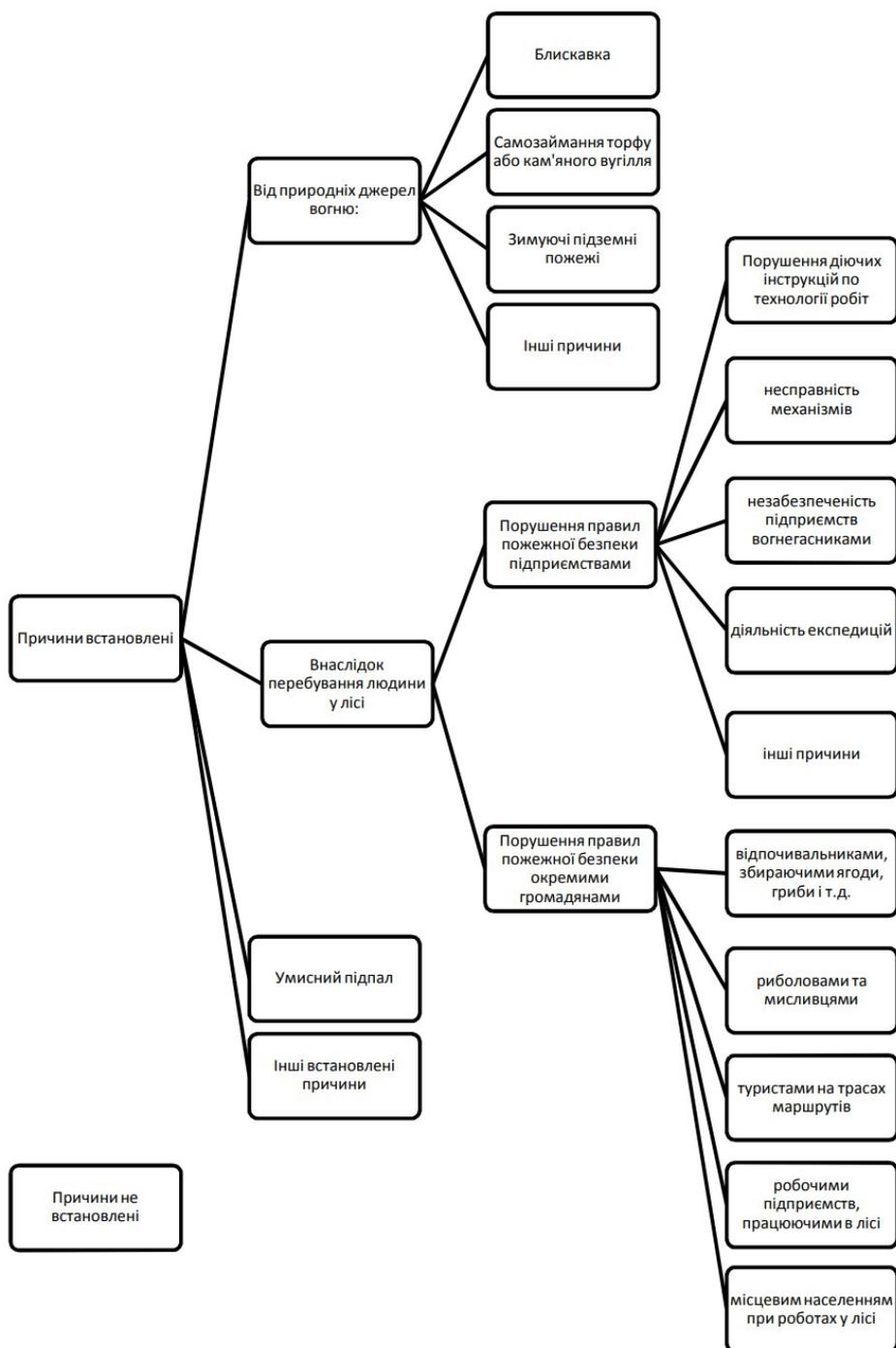


Рисунок В.1 – Класифікація причин виникнення лісових пожеж

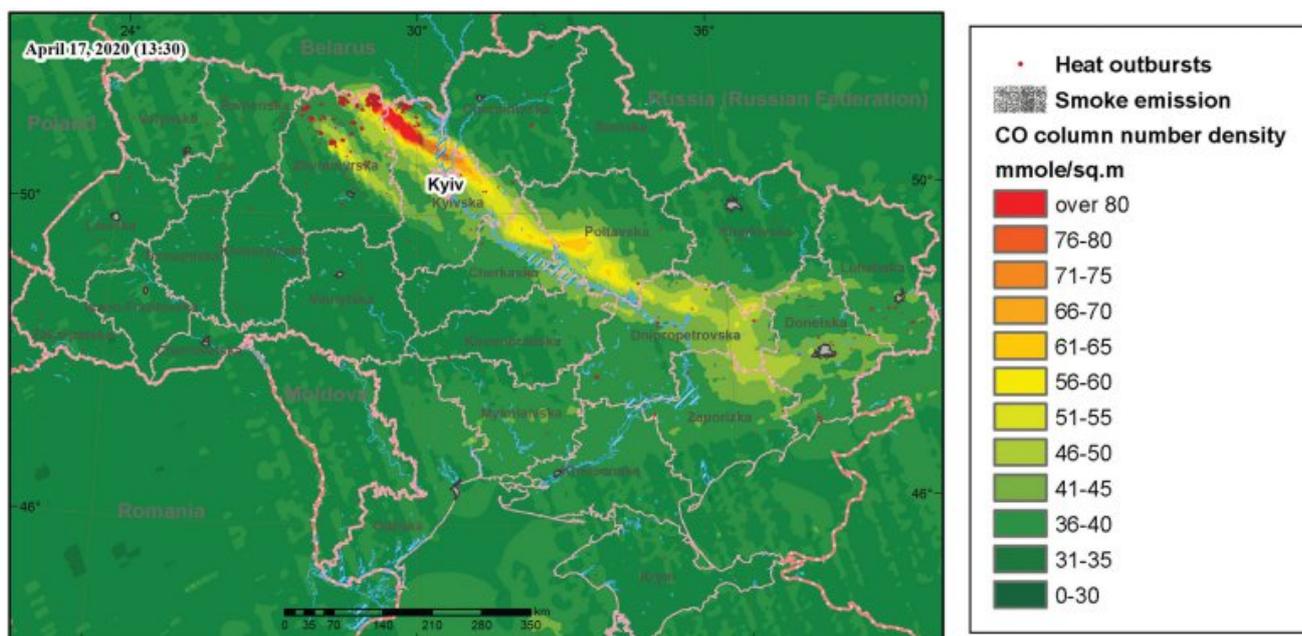


Рисунок В.2 – Просторовий розподіл загального вмісту CO в атмосфері під час лісових пожеж



Рисунок В.3 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, канали SWIR 12, 8A, 4

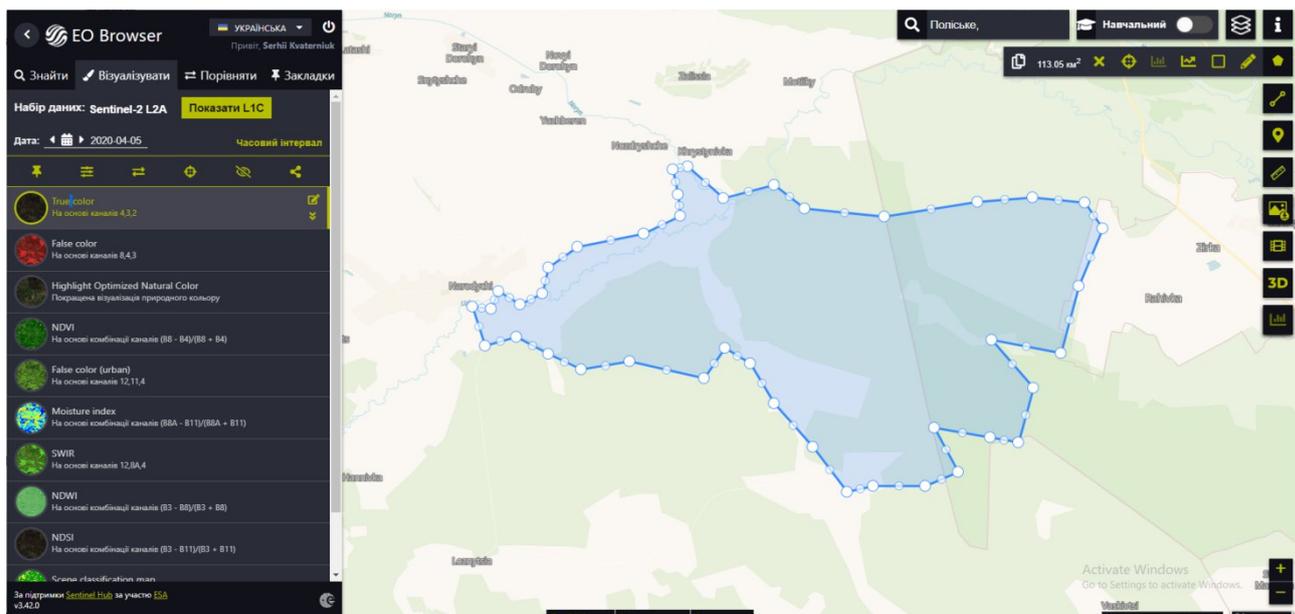
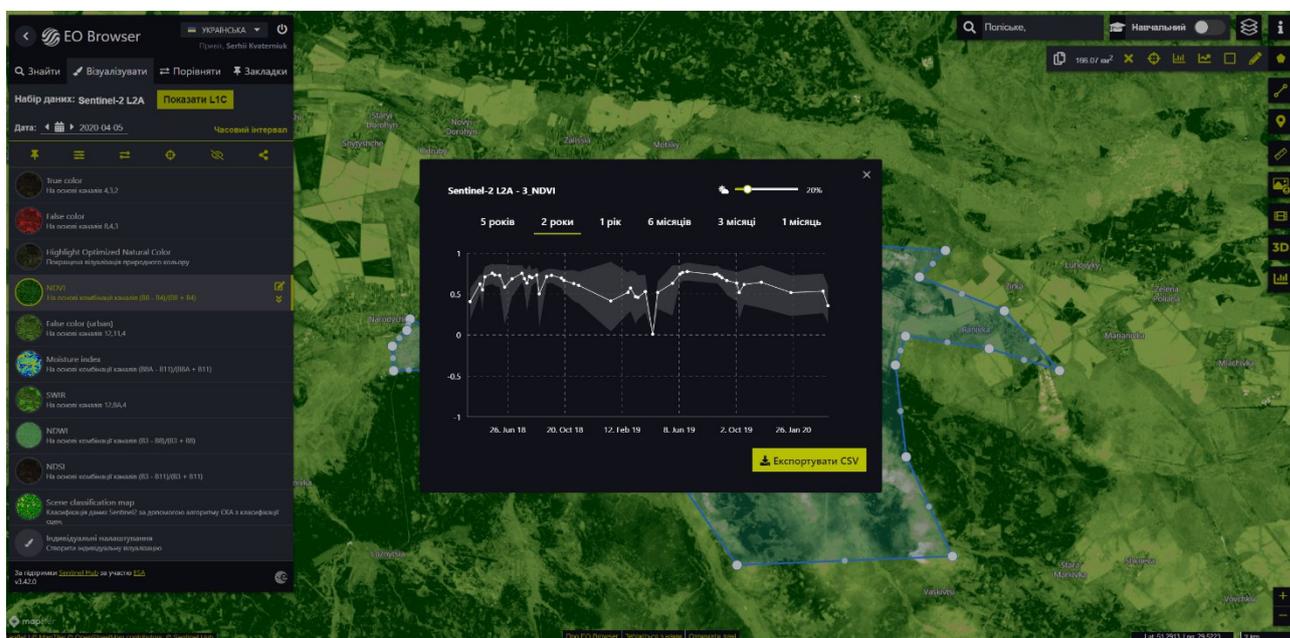


Рисунок В.4 – Встановлення контуру пожежі



а)



б)

Рисунок В.5 – Дослідження лісової пожежі з супутника Sentinel-2, Поліське, Київська область, NDVI