

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ННІ лісового  
і садово-паркового господарства  
Роман ВАСИЛИШИН

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (ПБ)  
” ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Т.в.о. завідувача кафедри таксації лісу  
та лісового менеджменту  
Віктор МИРОНЮК

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (ПБ)  
” ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему:** Багаторічний розподіл площ та кількості пожеж на території  
Сарненського надлісництва Філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси  
України» за даними супутникової зйомки

Спеціальність \_\_\_\_\_ 205 - Лісове господарство \_\_\_\_\_  
(код і назва)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Лісове господарство \_\_\_\_\_  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

Кандидат с.-г. наук, доцент \_\_\_\_\_ Олександр БАЛА \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

Доктор с.-г. наук, професор \_\_\_\_\_ Віктор МИРОНЮК \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ Олександр СТЕПАНЕЦЬ \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПБ студента)

**КИЇВ - 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ННІ лісового і садово-паркового господарства**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Т.в.о. завідувача кафедри таксації лісу та  
лісового менеджменту

д. с.-г. н., проф. Віктор МИРОНЮК

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
СТУДЕНТУ**

Степанцю Олександрю Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 205 - Лісове господарство

(код і назва)

Освітня програма Лісове господарство

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Багаторічний розподіл площ та кількості  
пожеж на території Сарненського надлісництва Філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси  
України» за даними супутникової зйомки»

затверджена наказом ректора НУБіП України від №2324"С" від 13.10.2025.

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.14

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: Геопросторові дані з границями регіону дослідження;  
дані про термальні аномалії MODIS/VIIRS; периметри пожеж глобального продукту  
MCD64; контури пожеж, оцифровані вручну за знімками Sentinel.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Методи моніторингу лісових пожеж за допомогою технологій ДЗЗ.
2. Багаторічний розподіл кількості пожеж за даними продуктів ДЗЗ про термальні аномалії.
3. Можливості використання методів ДЗЗ для картографування згарищ.

Дата видачі завдання 20 листопада 2024 р.

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Віктор МИРОНЮК

(прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

(підпис)

Олександр СТЕПАНЕЦЬ

(прізвище та ініціали студента)

## РЕФЕРАТ

У роботі розглянуто питання моніторингу лісових пожеж із використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та аналізу багаторічних тенденцій їхнього розвитку. Дослідження виконано на прикладі території, що характеризується підвищеною горимістю лісових насаджень упродовж останнього десятиріччя.

У першому розділі наведено огляд сучасних методів моніторингу пожеж і технологій виявлення активних термальних аномалій. Розглянуто можливості супутникових систем MODIS і VIIRS, а також глобальних продуктів NASA FIRMS, які забезпечують регулярне спостереження за динамікою пожеж.

У другому розділі охарактеризовано фізико-географічні умови регіону дослідження та подано історію лісових пожеж. Описано структуру та властивості супутникових даних, використаних у роботі, зокрема термальні аномалії MODIS і VIIRS, карти згарищ MODIS і периметри згарищ за знімками Sentinel.

У третьому розділі проаналізовано багаторічний розподіл пожеж за 2015–2025 рр. Визначено кількість та площі пожеж за супутниковими спостереженнями, проведено порівняння результатів, отриманих на основі різних супутникових систем, і виявлено основні закономірності просторово-часового розподілу пожеж.

За результатами дослідження зроблено висновки про ефективність використання даних MODIS, VIIRS та Sentinel для моніторингу лісових пожеж. Розроблено рекомендації щодо підвищення точності оцінки наслідків пожеж і вдосконалення системи моніторингу на регіональному рівні.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, лісові пожежі, термальні аномалії, згарища, MODIS, VIIRS, Sentinel, FIRMS.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	7
1.1. Сучасні методи моніторингу пожеж .....	7
1.2. Виявлення активних пожеж за допомогою систем дистанційного зондування Землі .....	12
1.3. Картографування згарищ та визначення ступеня пошкодження лісових насаджень .....	19
1.4. Огляд глобальних продуктів дистанційного моніторингу пожеж .....	27
1.5. Висновок до розділу 1 .....	34
РОЗДІЛ 2 ПРИРОДНО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....	36
2.1. Характеристика фізико географічних умов регіону дослідження .....	36
2.2. Історія лісових пожеж .....	40
2.3. Характеристика даних ДЗЗ використаних у роботі .....	43
2.3.1. Дані термальних аномалій MODIS і VIIRS .....	43
2.3.2. Дані про згарища MODIS .....	47
2.3.3. Периметри згарищ за знімками Sentinel .....	51
2.4. Висновок до розділу 2 .....	53
РОЗДІЛ 3 БАГАТОРІЧНИЙ РОЗПОДІЛ ПОЖЕЖ НА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	54
3.1. Розподіл та кількість пожеж за 2015–2025 рр. ....	54
3.2. Розподіл площі лісових пожеж за даними MODIS .....	56
3.3. Порівняння глобальних продуктів із даними Sentinel .....	61
3.4. Висновок до розділу 3 .....	68
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ .....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	72

## ВСТУП

Актуальність дослідження полягає у тому, що проблема лісових пожеж є однією з найгостріших екологічних загроз сучасності. Упродовж останніх років на території України та світу спостерігається зростання кількості та масштабів пожеж, що пов'язано зі зміною клімату, посушливими періодами та антропогенним навантаженням. Наслідки лісових пожеж мають не лише екологічний, а й економічний характер: вони знищують цінні насадження, призводять до деградації ґрунтів, погіршення якості повітря та втрати біорізноманіття.

Сучасні виклики вимагають нових підходів до моніторингу пожеж. Традиційні наземні спостереження є обмеженими за площею охоплення, тому особливої актуальності набувають методи дистанційного зондування Землі, які дають змогу оперативно виявляти осередки займання, оцінювати площі згарищ та аналізувати просторово-часові закономірності поширення пожеж.

**Об'єкт дослідження** – природні ландшафти в зоні діяльності Сарненського надлісництва філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси України».

**Предмет дослідження** – просторово-часові закономірності поширення лісових пожеж за супутниковими даними MODIS, VIIRS та Sentinel.

**Мета роботи** полягає в аналізі багаторічного просторово-часового розподілу лісових пожеж на основі супутникових даних MODIS, VIIRS і Sentinel, а також у розробленні рекомендацій щодо вдосконалення системи їх моніторингу на регіональному рівні.

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

1. Проаналізувати сучасні підходи до моніторингу лісових пожеж за даними ДЗЗ.
2. Охарактеризувати природно-географічні умови та історію пожеж у регіоні дослідження.
3. Здійснити аналіз термальних аномалій за даними MODIS і VIIRS, карт згарищ MODIS та периметрів пожеж Sentinel.

4. Оцінити просторово-часовий розподіл пожеж за 2015–2025 рр. та порівняти результати різних супутникових продуктів.

5. Сформулювати практичні рекомендації для підвищення ефективності системи моніторингу лісових пожеж.

У роботі використано **методи** дистанційного зондування, геоінформаційного аналізу, статистичного узагальнення та картографічного моделювання. Дані про термальні аномалії отримано із системи NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Оброблення й візуалізація результатів здійснювалися з використанням ГІС-технологій.

**Наукова новизна** роботи полягає у комплексному використанні глобальних супутникових продуктів для аналізу багаторічної динаміки пожеж, а також у порівнянні даних різних систем спостереження. Це дозволяє підвищити достовірність оцінки площ згарищ і покращити моніторинг пожежної ситуації.

**Практичне значення** результатів полягає у можливості використання отриманих матеріалів для вдосконалення регіональних систем моніторингу лісових пожеж, планування заходів із запобігання їх виникненню та мінімізації наслідків.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Сучасні методи моніторингу пожеж

Історичний розвиток методів моніторингу пожеж відбувався у тісному зв'язку з науково-технічним прогресом і зміною підходів до управління природними ресурсами. На початкових етапах виявлення пожеж ґрунтувалося виключно на візуальному спостереженні, яке здійснювали лісові наглядачі або мешканці прилеглих територій. У ХХ столітті з розвитком засобів радіозв'язку та телеметрії почали створюватися перші системи централізованого повідомлення про займання, що дозволяло оперативніше реагувати на загрозу. Подальший етап еволюції пов'язаний із впровадженням авіаційних спостережень, які у 1950–1980-х роках стали основним методом контролю за пожежною ситуацією в лісових масивах. З кінця ХХ століття, із появою технологій дистанційного зондування Землі, моніторинг пожеж перейшов на якісно новий рівень – від локальних до глобальних систем спостереження. Використання супутникових даних, цифрових сенсорів, автоматизованих систем оповіщення та геоінформаційних технологій забезпечило можливість безперервного контролю, аналітичної обробки даних та прогнозування розвитку вогнищ займання. Таким чином, сучасні методи моніторингу пожеж є результатом тривалого еволюційного процесу, що поєднує традиційні способи спостереження з високотехнологічними інструментами аналізу і прогнозування [8].

Поняття моніторингу пожеж сформувалося у другій половині ХХ століття як складова екологічного та геоінформаційного моніторингу, спрямованого на спостереження, оцінку й прогнозування стану навколишнього природного середовища. Вперше систематичний підхід до моніторингу природних пожеж почав розвиватися в межах програм ООН та Міжнародної організації з продовольства і сільського господарства (FAO), які у 1970–1980-х роках

наголосили на необхідності створення глобальних систем спостереження за лісовими пожежами як одним із ключових чинників деградації екосистем. У науковій літературі поняття «моніторинг пожеж» визначається як система постійного спостереження, збору, оброблення, аналізу та прогнозування інформації про виникнення, розвиток і наслідки пожеж з метою своєчасного прийняття управлінських рішень і зменшення шкоди довкіллю та населенню. Формування сучасних підходів до моніторингу стало наслідком усвідомлення критичної ролі пожеж у глобальних кліматичних процесах, їхнього впливу на біорізноманіття, ґрунти та якість атмосферного повітря, тому в останні десятиліття моніторинг пожеж перетворився на один із пріоритетних напрямів екологічної безпеки та управління природними ресурсами.

Проблема своєчасного виявлення та моніторингу пожеж має надзвичайно важливе значення для системи цивільного захисту України. Одним із ключових завдань у цій сфері є забезпечення оперативного отримання достовірних геопросторових даних про осередки займання, включаючи час, місце, тип матеріалу горіння, а також природні умови, що впливають на розвиток вогню, серед яких: температуру повітря, вологість, швидкість і напрям вітру, наявність опадів тощо [10].

Методи виявлення пожеж поділяють на контактні та дистанційні. До контактних належать повідомлення очевидців або дані, отримані від сенсорів, розміщених безпосередньо на території потенційно небезпечних об'єктів, такий підхід є традиційним і досі широко використовується в діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) та Державного агентства лісових ресурсів України. Контактні методи відзначаються високою точністю опису ситуації, однак залежать від людського фактора і не завжди забезпечують своєчасність фіксації займання, особливо у віддалених районах.

Іншу групу становлять дистанційні методи, що ґрунтуються на використанні технологій дистанційного зондування Землі. До таких засобів належать супутники, літаки та безпілотні літальні апарати, обладнані тепловізійною або оптичною знімальною апаратурою. Дистанційні технології

дозволяють виявляти пожежі на великих площах, відстежувати динаміку поширення вогню та оцінювати наслідки займання. Особливе значення мають супутникові системи спостереження, які здійснюють регулярне сканування поверхні Землі у різних діапазонах електромагнітного спектра.

У світовій практиці значна увага приділяється інтеграції супутникових даних із системами прогнозування, побудованими на штучному інтелекті. Наприклад, система FIRMS (Fire Information for Resource Management System, NASA) забезпечує оперативне виявлення теплових аномалій із супутників Aqua, Terra та Suomi NPP, що дозволяє фіксувати пожежі з точністю до 1 км<sup>2</sup> у режимі майже реального часу. У Європі ефективно функціонує EFFIS (European Forest Fire Information System), яка об'єднує супутниковий моніторинг, метеорологічні прогнози та статистику пожеж для оцінки рівня пожежної небезпеки та підтримки рішень у сфері природоохоронного управління [19].

Найчастіше для виявлення теплових аномалій використовується інфрачервоний спектр випромінювання, що дозволяє фіксувати ділянки з підвищеною температурою, які є потенційними осередками пожеж. Інфрачервоне випромінювання охоплює діапазон довжин хвиль від 0,75 до 1000 мкм і є частиною електромагнітного спектра, що розташована між видимим світлом і мікрохвилями. Основною фізичною властивістю інфрачервоного випромінювання є його здатність відображати теплову енергію об'єктів, тобто будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) випромінює ІЧ-хвилі. Саме це дає змогу виявляти розігріті поверхні навіть крізь димові шари чи тонкі хмарні утворення. У цьому діапазоні спостерігається чіткий контраст між гарячими зонами горіння та навколишньою місцевістю, що забезпечує високу точність ідентифікації навіть у нічний час. Водночас денне спостереження у видимому спектрі ускладнюється впливом сонячного випромінювання, через що теплові сигнали від пожеж губляться на яскравому фоні поверхні.

Крім теплових зображень, дистанційні сенсори здатні виявляти газові домішки, які супроводжують горіння: монооксид вуглецю, діоксид азоту, вуглекислий газ та інші продукти згорання. Їх фіксують за допомогою

спектрометрів, розміщених на супутниках, що дозволяє опосередковано оцінювати масштаби великих пожеж і ступінь забруднення атмосфери.

Окрім безпосереднього виявлення вогнищ, важливою складовою моніторингу є моделювання пожежних процесів. Науковці застосовують математичні моделі для прогнозування розвитку пожежі залежно від виду рослинного покриву, вологості, рельєфу, швидкості вітру та інших факторів. Зокрема, у сучасних дослідженнях використовуються методи машинного навчання та нейронні мережі для оцінки рівня пожежної небезпеки за комплексом метеорологічних параметрів.

Таким чином, сучасна система виявлення і моніторингу пожеж базується на поєднанні традиційних контактних способів, автоматизованих сенсорних мереж та дистанційних супутникових технологій. Їх комплексне використання дозволяє не лише своєчасно фіксувати займання, а й створювати науково обґрунтовані моделі розвитку пожеж, що є важливою передумовою для зменшення матеріальних втрат і підвищення ефективності протипожежного управління в Україні [3].

Подана «Структура системи моніторингу пожеж» (рис. 1.1.) є авторською розробкою, створеною на основі аналізу сучасних наукових джерел, практичних рішень та досвіду застосування інформаційних технологій у сфері екологічного моніторингу. Система відображає комплексний підхід до організації процесу виявлення, аналізу та реагування на пожежі, охоплюючи всі ключові етапи – від збору первинної інформації до прийняття управлінських рішень.

Перший структурний блок «Джерела даних» включає різні типи систем спостереження: супутникові платформи, безпілотні літальні апарати, наземні сенсори, метеорологічні станції та повідомлення очевидців. Така багатоканальність забезпечує високу достовірність і просторову деталізацію інформації. Другий блок «Передача інформації» охоплює канали зв'язку, через які здійснюється оперативна передача даних: радіозв'язок, мобільні та супутникові мережі, інтернет-з'єднання та IoT-мережі, що гарантують безперервність інформаційного потоку.

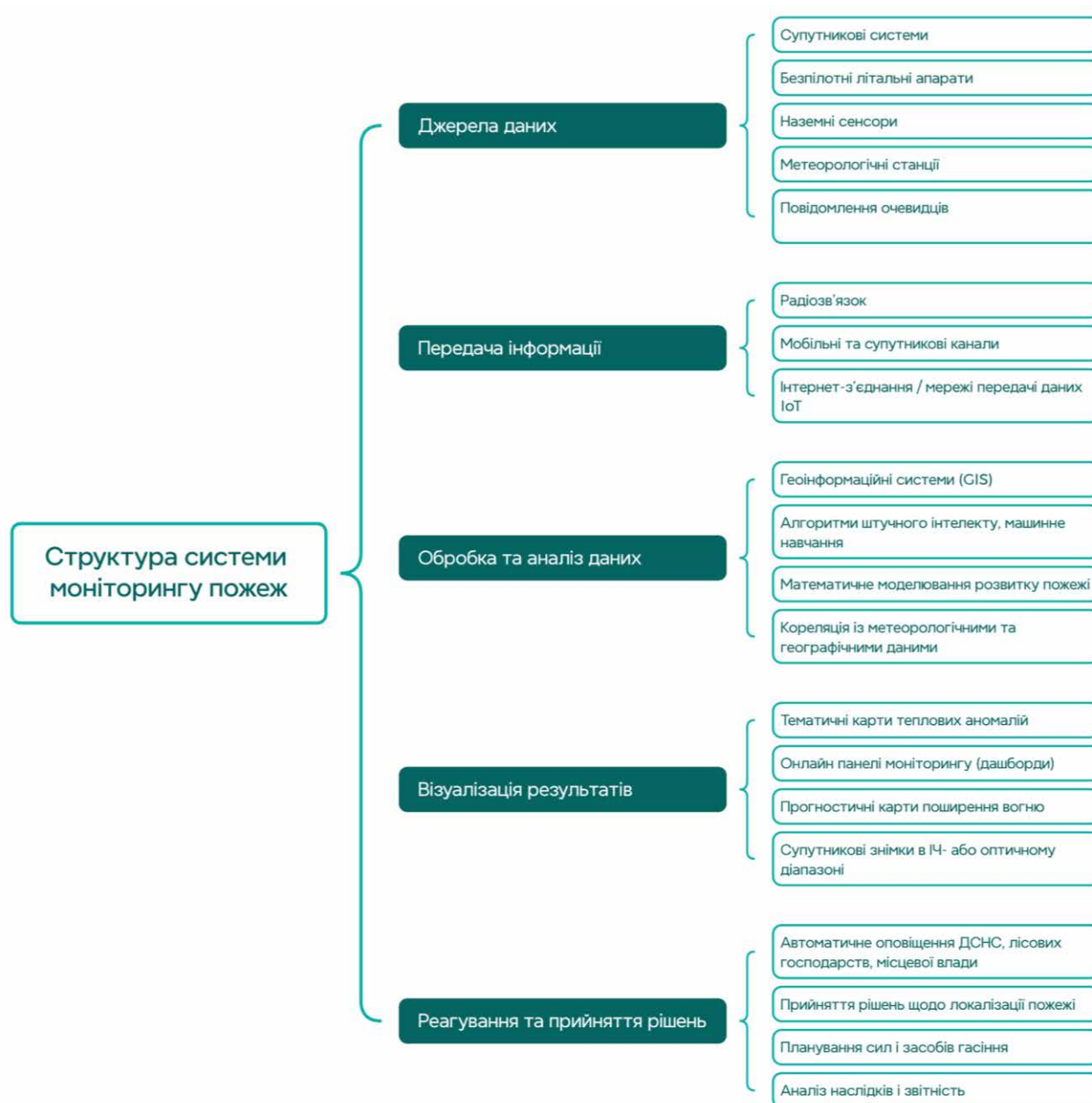


Рис. 1.1. Структура системи моніторингу пожеж

Наступний етап «Обробка та аналіз даних» реалізується за допомогою геоінформаційних систем (GIS), алгоритмів штучного інтелекту, машинного навчання та математичного моделювання розвитку пожеж. Важливим компонентом є кореляція з метеорологічними й географічними даними, що підвищує точність прогнозів. У розділі «Візуалізація результатів» передбачено створення тематичних карт теплових аномалій, онлайн-панелей моніторингу, прогнозних карт поширення вогню та аналіз супутникових знімків у різних діапазонах.

Фінальний блок «Реагування та прийняття рішень» передбачає інтеграцію отриманих результатів у систему управління: автоматичне оповіщення підрозділів ДСНС, лісових господарств і місцевих влад, планування сил та засобів гасіння, а також оцінку наслідків і підготовку звітності.

Таким чином, запропонована структура системи моніторингу пожеж відображає логічно завершену модель функціонування інтегрованої системи спостереження, аналітики та реагування, що поєднує інструменти дистанційного зондування Землі, телекомунікаційних технологій та інтелектуального аналізу даних для забезпечення ефективного управління пожежними ризиками.

## **1.2. Виявлення активних пожеж за допомогою систем дистанційного зондування Землі**

Пожежі суттєво впливають на стан екосистем, атмосферу та клімат Землі. Для ефективного управління лісовими пожежами, прогнозування їх поширення та мінімізації наслідків сучасна наука використовує системи дистанційного зондування Землі. Цей метод дозволяє проводити моніторинг усього життєвого циклу пожежі - від передпожежного прогнозування до післяпожежного аналізу.

На передпожежній фазі дистанційне зондування застосовується для оцінки типу рослинності, запасів палива, вологості ґрунту та рослин, а також метеорологічних умов, які можуть вплинути на виникнення або інтенсивність займання. На активній фазі ДЗЗ забезпечує оперативне виявлення активних осередків вогню (Active Fires, AF), визначення радіаційної потужності вогню (FRP) та площі горіння (Burned Area, BA). У післяпожежній фазі супутникові системи дають можливість оцінити зміни коефіцієнта відбиття поверхні, структури рослинного покриву, ступінь пошкодження екосистем і кількісно визначити емісії продуктів згоряння, які впливають на якість повітря та клімат (рис. 1.2).

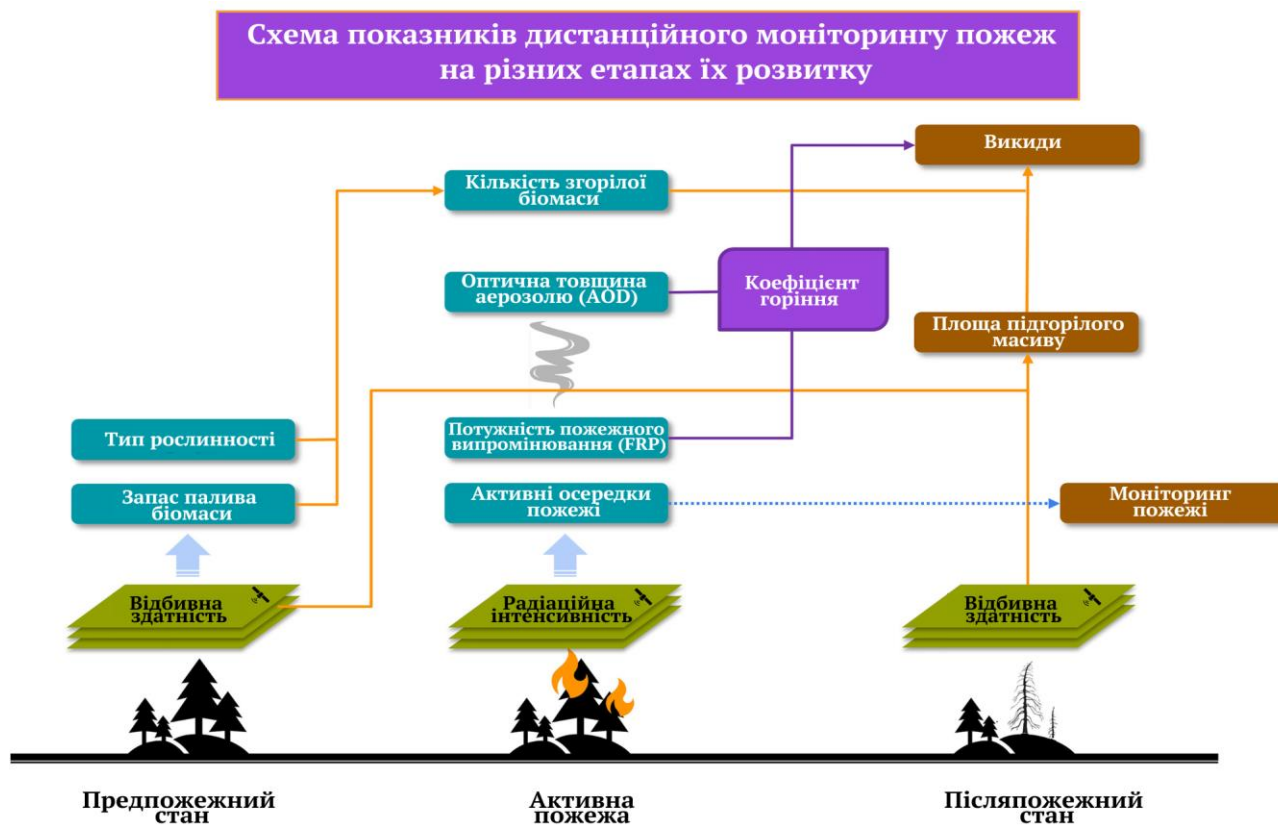


Рис. 1.2. Схема показників дистанційного моніторингу пожеж на різних етапах їх розвитку

Супутникові системи спостереження поділяються на дві основні групи за типом орбіти. Отже, перші супутники це геостаціонарні (GEO), які розташовані на висоті близько 35 786 км, вони забезпечують безперервний моніторинг конкретних регіонів, але мають нижчу просторову роздільну здатність. Прикладами таких супутників є: GOES-16/17/18, Meteosat, Himawari-8/9, вони дозволяють відстежувати добовий цикл пожеж і поширення вогню в режимі реального часу.

Ще одним типом супутників є низькоорбітальні (LEO), вони здійснюють глобальне спостереження з високою точністю, забезпечуючи детальні зображення територій. До них належать: MODIS (Terra, Aqua), VIIRS (SNPP, NOAA20, NOAA21), SLSTR (Sentinel-3), OLI та TIRS (Landsat-8,9), MSI (Sentinel-2), PlanetScope (Planet Labs) тощо [7].

Також варто зазначити, що залежно від просторової роздільної здатності ЛЕО-супутники поділяють на три основні категорії:

- груба роздільна здатність (сотні метрів) використовується для глобального моніторингу активності пожеж, оцінки викидів та формування світових наборів даних щодо площ вигорання;
- середня роздільна здатність (десятки метрів) забезпечує можливість регіонального аналізу пожеж, визначення динаміки їх поширення та створення довідкових даних для аналітичних систем;
- висока роздільна здатність (метри або субметри) застосовується для детального позиціонування лінії вогню, аналізу локальних наслідків, а також оцінки пошкоджень інфраструктури та майна.

Наукові алгоритми для визначення вигорілих територій базуються на часових рядах багатоспектральних супутникових даних. В останні роки широко застосовуються методи машинного навчання, які дають змогу автоматично класифікувати пікселі з ймовірністю горіння, використовуючи відкриті дані та високі обчислювальні потужності. Прикладами таких ініціатив є: USGS (США), MapBiomas (Бразилія), NBAS (Канада), TERN (Австралія), FireCCI (Африка), Greenpeace (Європа). Вони переважно використовують дані Landsat або Sentinel-2 [13].

Для підвищення точності оцінки площ вигорілих територій застосовуються процедури калібрування та валідації з використанням супутникових зображень високої роздільної здатності або аерофотозйомки. Помилки класифікації визначаються через коефіцієнти комісії (хибнопозитивні спалахи) та пропуску (невиявлені пожежі).

На глобальному рівні створено єдині узгоджені бази даних, зокрема GFED (Global Fire Emissions Database), яка поєднує спостереження MODIS із додатковими даними VIIRS та ATSR для врахування малих або тліючих пожеж. Це дозволяє оцінювати щомісячні та навіть субдодобові масштаби пожежної активності й пов'язаних викидів.

Таким чином, дистанційне зондування Землі є незамінним інструментом для виявлення, картографування, оцінки інтенсивності та наслідків пожеж, забезпечуючи достовірну інформацію для систем цивільного захисту, природоохоронних служб і дослідників.

Суть методу дистанційного зондування полягає у вимірюванні електромагнітного випромінювання, що відбивається, випромінюється або розсіюється земною поверхнею. Для моніторингу пожеж використовуються різні спектральні діапазони електромагнітного спектра - від видимого до мікрохвильового (рис. 1.3).

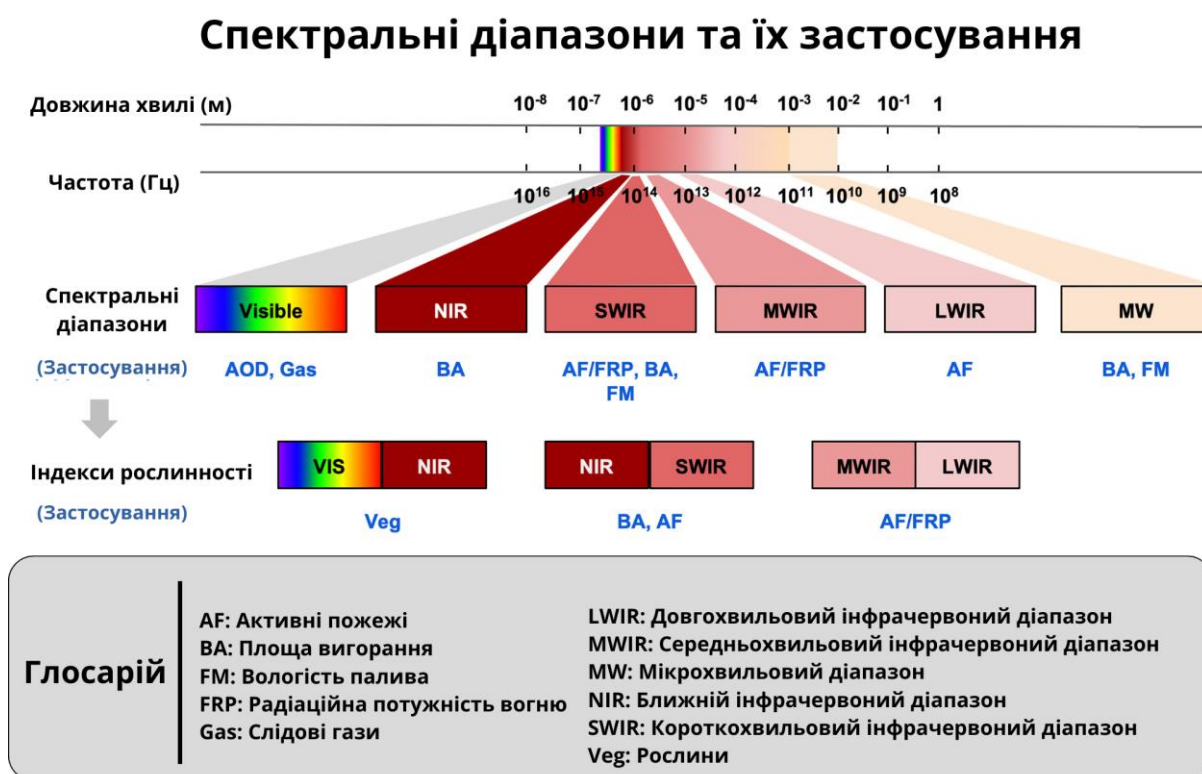


Рис. 1.3. Спектральні діапазони та їх застосування

Зображення демонструє спектральні діапазони електромагнітного спектра та їх застосування для моніторингу земної поверхні, зокрема в контексті пожеж.

Зображення відображає електромагнітний спектр у межах від ультрафіолетового до мікрохвильового випромінювання, містячи шкали довжини хвилі та частоти, позначення основних спектральних діапазонів (VIS,

NIR, SWIR, MWIR, LWIR, MW) та їх прикладне значення для дистанційного зондування Землі, зокрема, виявлення активних пожеж (AF), визначення площ вигорання (BA), оцінювання вологості палива (FM), розрахунок радіаційної потужності вогню (FRP) і спостереження за газовими домішками (Gas), а також діапазони, що використовуються для розрахунку індексів рослинності. Нижній блок містить глосарій аббревіатур, що пояснює спеціалізовані терміни [32].

Розглянемо всі спектральні діапазони, охарактеризувавши їх.

Видимий спектр (VIS, 0.4–0.7 мкм), цей діапазон охоплює довжини хвиль від 0,4 до 0,7 мкм і відповідає тій частині електромагнітного спектра, яку сприймає людське око. Частота випромінювання становить приблизно від  $4,3 \times 10^{14}$  до  $7,5 \times 10^{14}$  Гц. Саме у цьому діапазоні спостерігається основна відбивна здатність земної поверхні, що дозволяє отримувати зображення з високою просторовою роздільною здатністю. У системах ДЗЗ видимий спектр застосовується для ідентифікації типів рослинності, визначення стану вегетації за допомогою вегетаційних індексів (наприклад, Veg) та виявлення осередків пожеж через зміну кольору рослинного покриву. Наукове значення VIS-діапазону полягає у можливості детального аналізу структури ландшафту, однак його використання обмежене атмосферними факторами – хмарами, димом або аерозолями, які значно знижують якість отриманих даних.

Ближній інфрачервоний діапазон (NIR, 0.7–1.4 мкм), що охоплює хвилі від 0,7 до 1,4 мкм, він відповідає частоті приблизно  $2,1 \times 10^{14}$  –  $4,3 \times 10^{14}$  Гц. NIR-випромінювання є чутливим до внутрішньої структури клітин рослин і рівня вологості палива. У дистанційному зондуванні цей діапазон широко використовується для оцінки меж вигорілих територій (BA), визначення вологості палива (FM) та розрахунку вегетаційних індексів - зокрема NDVI, який базується на співвідношенні відбивання у NIR і VIS діапазонах. Отже, діапазон NIR є ключовим для розрізнення живої та обгорілої рослинності: здорові рослини відбивають значну частину ближнього інфрачервоного випромінювання, тоді як обгорілі або сухі ділянки, що майже повністю його поглинають.

Коротко- та середньохвильовий інфрачервоний (SWIR 1.4–3 мкм, MWIR 3–8 мкм) діапазони SWIR (1,4–3 мкм) та MWIR (3–8 мкм) є проміжними між ближнім і довгохвильовим інфрачервоним випромінюванням. SWIR особливо чутливий до вологості палива та структури рослинного покриву, що робить його ефективним для визначення меж вигорання, аналізу ступеня пошкодження лісових насаджень і виявлення сухих або стресових ділянок рослинності. MWIR, навпаки, безпосередньо фіксує теплове випромінювання від активних осередків пожеж, дозволяючи визначати їх інтенсивність через розрахунок радіаційної потужності вогню (Fire Radiative Power, FRP). Обидва діапазони менш чутливі до диму й атмосферних перешкод, ніж видимий спектр, тому вважаються основними для термічного моніторингу та моделювання динаміки пожеж [6].

Довгохвильовий інфрачервоний діапазон (LWIR, 8–15 мкм), охоплює хвилі від 8 до 15 мкм і використовується головним чином для виявлення активних пожеж (AF) та визначення температури поверхні Землі. На відміну від коротших інфрачервоних хвиль, довгохвильове випромінювання менш чутливе до атмосферних перешкод і здатне реєструвати теплове випромінювання навіть від тліючих або охолоджених осередків. Це робить LWIR надзвичайно цінним для довготривалого спостереження за пожежами, аналізу післяпожежних процесів та оцінювання теплового балансу ландшафтів. Довгохвильовий інфрачервоний діапазон забезпечує сталі термічні характеристики незалежно від умов освітлення, що дає змогу вести моніторинг і в нічний час.

Мікрохвильовий діапазон (MW,  $\lambda > 1$  мм) охоплює хвилі завдовжки від кількох міліметрів до одного метра (частота нижча ніж  $3 \times 10^{11}$  Гц). На відміну від оптичних і інфрачервоних діапазонів, мікрохвильове випромінювання має здатність проникати крізь хмари, дим та рослинний покрив, що робить його незамінним у складних погодних умовах. У дистанційному зондуванні мікрохвильові сенсори застосовуються для моніторингу вологості ґрунту й палива (FM), оцінки температури поверхні, а також для спостереження за пожежами незалежно від рівня хмарності. Наукове значення цього діапазону полягає у можливості отримання стабільних даних у будь-яких метеорологічних

умовах, що особливо важливо для тривалого моніторингу екосистем і виявлення прихованих термічних процесів [27].

Комплексне поєднання спектральних діапазонів електромагнітного спектра забезпечує отримання всебічної інформації про динаміку пожежних процесів. Використання видимого (VIS) та ближнього інфрачервоного (NIR) діапазонів дозволяє аналізувати стан рослинності, визначати вологість палива та межі вигорілих територій. Поєднання коротко- та середньохвильового інфрачервоного (SWIR і MWIR) спектрів дає змогу ідентифікувати активні осередки горіння, вимірювати радіаційну потужність вогню (FRP) і кількісно оцінювати інтенсивність пожежі. Довгохвильовий інфрачервоний (LWIR) діапазон забезпечує контроль тліючих або охолоджених ділянок, що залишаються після активного горіння, тоді як мікрохвильовий (MW) використовується для моніторингу вологості поверхні та відновлення даних за умов хмарності, диму або атмосферних завад.

Наукове значення інтегрованого підходу полягає у створенні багатовимірної системи моніторингу, що поєднує дані різних діапазонів для побудови повної картини пожежної динаміки. Такий підхід дозволяє не лише визначати просторові межі та інтенсивність вогню, а й оцінювати фізичні властивості палива, ступінь пошкодження рослинності та постпожежні зміни у ландшафті. Використання мультиспектральних комбінацій є ключовим елементом сучасних супутникових систем спостереження, забезпечуючи науково обґрунтовану основу для оперативного реагування та екологічного аналізу наслідків пожеж.

Індекси рослинності є важливим інструментом оцінки стану рослинного покриву, що виступає основним джерелом палива під час пожеж. Взаємодія видимого (VIS) і ближнього інфрачервоного (NIR) діапазонів використовується для обчислення нормалізованого різницевого індексу вегетації NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який відображає рівень фотосинтетичної активності та густоту рослинності. Поєднання NIR і SWIR-діапазонів дає змогу оцінювати водний баланс, вологість палива та потенційну

пожежну небезпеку. Використання MWIR і LWIR забезпечує фіксацію аномальних температурних зон, що вказують на активні або тліючі осередки горіння.

Отже, значення цих індексів полягає в тому, що вони створюють взаємозв'язок між станом рослинного покриву й параметрами пожежного ризику. Моніторинг пожеж без урахування стану рослинності є неповним, оскільки саме рослинна біомаса визначає інтенсивність горіння, швидкість поширення полум'я та характер постпожежних змін. Таким чином, індекси рослинності виступають ключовим елементом у системі комплексного супутникового моніторингу природних пожеж.

Отримані результати демонструють взаємозв'язок між характеристиками випромінювання в різних спектральних діапазонах та їхнім потенціалом у виявленні, аналізі й прогнозуванні пожежних процесів. Інтеграція цих даних забезпечує створення багатовимірної системи спостереження, здатної фіксувати як активні осередки горіння, так і приховані процеси тління чи зміни у вологості рослинного покриву, тому такий підхід підвищує ефективність моніторингу природних пожеж і формує наукове підґрунтя для удосконалення систем раннього попередження та управління ризиками в екосистемах.

### **1.3. Картографування згарищ та визначення ступеня пошкодження лісових насаджень**

Картографування згарищ є невід'ємною складовою системи дистанційного моніторингу природних пожеж, що забезпечує просторове відображення меж пошкоджених територій та ступеня їх деградації. Наукова сутність цього процесу полягає у використанні даних дистанційного зондування Землі, які дозволяють визначати зміни в спектральних характеристиках земної поверхні після проходження вогню. Завдяки різниці відбиття електромагнітного

випромінювання до та після пожежі можна встановити точні межі згарищ, визначити інтенсивність пошкоджень і ступінь порушення рослинного покриву.

Основна мета картографування згарищ полягає у виявленні територій, які зазнали впливу вогню, оцінці площ вигорілих ділянок, типу та інтенсивності пошкоджень, а також у створенні основи для подальшого аналізу процесів деградації екосистем. Ці карти є важливими аналітичними інструментами для оцінки екологічних наслідків пожеж, зокрема змін у структурі лісових масивів, складі рослинності, біорізноманітті та ґрунтовому покриві, також вони дають змогу простежити просторово-часову динаміку пожеж, визначити повторюваність займання на певних територіях і здійснювати оцінку ефективності лісоохоронних заходів [21].

У структурі системи моніторингу природних пожеж картографування згарищ займає проміжне місце між отриманням супутникових даних та їх інтеграцією в геоінформаційні системи (ГІС). Дані ДЗЗ забезпечують первинну інформаційну базу, тоді як польові спостереження використовуються для верифікації супутникових оцінок. На етапі ГІС-аналізу здійснюється просторове узгодження різних наборів даних, обчислення площ згарищ, визначення категорій пошкоджень та створення карт, придатних для практичного використання у природоохоронному плануванні.

Картографування згарищ має важливе значення для екологічного управління, оскільки дозволяє обґрунтувати пріоритети у відновленні лісових насаджень, плануванні лісовідновних робіт та оцінці потенційної небезпеки повторних пожеж, тому такі карти є основою для прогнозування подальших змін екосистем, розроблення заходів щодо мінімізації екологічних збитків і контролю за ефективністю відновлення природних ландшафтів після пожеж. В умовах зростання частоти та масштабів природних пожеж на території України та світу науково обґрунтоване картографування згарищ виступає ключовим інструментом у системі сталого природокористування та адаптації до кліматичних змін.

Процес картографування згарищ базується на послідовному виконанні низки етапів, кожен з яких спрямований на отримання достовірних, геопросторово точних даних про площу, межі та інтенсивність пошкодження лісових насаджень після пожеж. У системі моніторингу природних пожеж цей процес має не лише діагностичне, а й аналітичне значення, оскільки дозволяє виявити особливості просторового поширення вогню, ступінь деградації екосистем і наслідки порушення лісових структур [17].

Першим етапом є збір вихідних даних, який передбачає отримання супутникових знімків території дослідження до та після пожежі. Найчастіше для цього використовуються знімки із супутників Sentinel-2, Landsat 8/9 або MODIS, які забезпечують доступ до мультиспектральних даних у видимому та інфрачервоному діапазонах. Вибір конкретних супутників залежить від просторової роздільної здатності, частоти оновлення даних та площі охоплення. При цьому важливо враховувати сезонність, атмосферні умови та ступінь хмарності, оскільки ці фактори можуть суттєво впливати на якість подальшого аналізу.

Другим етапом є попередня обробка супутникових зображень, яка забезпечує коректність спектральних показників і просторову точність даних. Цей етап включає проведення атмосферної корекції, яка усуває вплив водяної пари, аерозолів і розсіювання сонячного випромінювання. Наступним кроком є обрізання (кліпінг) території дослідження відповідно до меж лісництва або адміністративної одиниці, що дозволяє зосередитися лише на релевантній площі. Важливою процедурою також є геоприв'язка, яка забезпечує суміщення координат знімків до та після пожежі, що є необхідним для точного порівняльного аналізу.

Після підготовки даних виконується виділення згарищ, яке ґрунтується на аналізі спектральних індексів, що відображають зміни в стані рослинності. Найпоширенішими є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований індекс різниці рослинності, та NBR (Normalized Burn Ratio) – нормалізований коефіцієнт згарища. Зниження значень NDVI після пожежі або

різке падіння NBR вказує на втрату зеленого покриву та наявність обгорілих ділянок. Для підвищення точності результатів часто застосовується  $dNBR$  - різниця між значеннями NBR до та після пожежі, що дозволяє оцінити ступінь пошкодження за шкалою від слабкого до катастрофічного [11].

Наступним кроком є побудова контурів згарищ і визначення площі, що здійснюється на основі отриманих індексних карт. Після класифікації пікселів за ступенем пошкодження виділяються полігони, які відображають межі згарищ. Застосовуючи інструменти векторизації в геоінформаційних системах, проводиться перетворення растрових зображень у векторні шари, де кожен полігон містить атрибутивну інформацію – площу, координати, дату пожежі та рівень пошкодження. Це дозволяє здійснити точні розрахунки площ вигорілих територій у гектарах і сформувані статистичні таблиці для подальшого аналізу.

Заключним етапом є картографічне оформлення результатів, що передбачає створення тематичної карти згарищ у спеціалізованому програмному забезпеченні – QGIS або ArcGIS. На цьому етапі виконується побудова легенди, нанесення топографічної основи, масштабної сітки, географічних координат, назв об'єктів і умовних позначень. Для покращення візуального сприйняття застосовується кольорове кодування ступенів пошкодження: від світлих відтінків для слабо обгорілих територій до темних для сильно зруйнованих ділянок. Крім того, карта може містити додаткові шари – дороги, водні об'єкти, межі лісництв, що дає змогу комплексно оцінити вплив пожежі на ландшафтні структури.

У результаті картографування формується просторово-аналітична модель, яка відображає не лише площу і контури згарищ, але й дозволяє виявляти закономірності поширення пожеж, кореляцію з типами рослинності, рельєфом та антропогенними факторами. Такий підхід має практичне значення для оцінки екологічних наслідків, планування відновлювальних заходів і формування бази даних для подальшого моніторингу. Отже, картографування згарищ є важливою складовою інтегрованої системи аналізу лісових пожеж, що поєднує дані

дистанційного зондування, геоінформаційні технології та польові спостереження для забезпечення комплексного контролю за станом природних екосистем.

Одним із ключових інструментів аналізу є використання спектральних індексів, які дозволяють кількісно оцінювати зміни рослинного покриву та ступінь пошкоджень. Серед них найбільш поширеними є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NBR (Normalized Burn Ratio) та dNBR (delta NBR) [10].

NDVI – це нормалізований різницевий індекс рослинності, який широко застосовується для оцінки стану вегетації. Він обчислюється за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1.1)$$

де NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні;  
RED – відбивна здатність у червоному діапазоні.

NDVI відображає інтенсивність фотосинтезуючої активності рослинності: значення, близькі до 1, свідчать про здорову густу рослинність, тоді як значення близькі до 0 або негативні вказують на відсутність або сильне пошкодження рослинного покриву.

NBR спеціально розроблений для моніторингу наслідків пожеж та оцінки ступеня вигорання. Його формула має вигляд:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}, \quad (1.2)$$

де SWIR – відбивна здатність у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні.

NBR дозволяє виділити зони згарищ та оцінити їхню площу й інтенсивність. Індекс dNBR (delta NBR) є різницею між NBR до і після пожежі, що дозволяє кількісно визначити ступінь пошкодження лісових насаджень:

$$dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \quad (1.3)$$

Цей індекс використовується як основний показник вигорання та дозволяє класифікувати пошкодження за ступенем.

Таблиця 1.1

**Класифікація ступенів пошкодження лісових масивів за значеннями dNBR**

<b>Значення dNBR</b>	<b>Ступінь пошкодження</b>	<b>Характеристика пошкодження</b>
0,1–0,27	Слабке	Незначні втрати деревного покриву
0,27–0,44	Середнє	Часткове знищення підліску та окремих дерев
0,44–0,66	Сильне	Значна загибель дерев та руйнування ґрунтового покриву
>0,66	Катастрофічне	Катастрофічне пошкодження, повне вигорання насаджень та високий ризик ерозії ґрунтів

Розрахунки NDVI, NBR та dNBR можуть виконуватися у сучасних ГІС-платформах та програмних комплексах, таких як SNAP (Sentinel Application Platform) або GEE (Google Earth Engine). У цих системах використовується спектральна інформація супутникових знімків для автоматизованого обчислення індексів, що дозволяє швидко аналізувати великі території та отримувати кількісні показники пошкодження рослинності.

Використання індексів особливо ефективно при аналізі великомасштабних пожежних територій, коли польові обстеження є ускладненими або неможливими. Завдяки визначенню даних індексів можна не лише оцінити ступінь пошкоджень, а й прогнозувати відновлення лісових екосистем та планувати заходи з їхньої реабілітації.

Після визначення значень dNBR проводиться класифікація ступенів пошкодження лісових насаджень, що дозволяє створити чітку картину просторового розподілу зони впливу пожежі. Основним підходом є порівняння показників NBR до і після пожежі, визначення різниці (dNBR) та встановлення порогових значень, які відповідають певним категоріям пошкодження.

Для забезпечення достовірності результатів аналітичні дані завжди підлягають верифікації на місцевості. Цей процес включає польові обстеження, інспекцію деревостанів та фотозйомку, що дозволяє підтвердити або скоригувати автоматично отримані показники. Порівняння результатів дистанційного зондування та польових даних підвищує точність оцінки та забезпечує обґрунтовані висновки щодо стану лісових екосистем [24].

У ГІС створюються карти ступенів пошкодження, на яких використовується градаційна колірна шкала від зеленого (слабкі пошкодження) до червоного (катастрофічні), адже такий підхід дозволяє наочно відобразити осередки сильних руйнувань. Карти дозволяють виявити просторові закономірності пошкоджень, визначити пріоритетні зони для лісомеліоративних заходів та сприяти плануванню протипожежної діяльності.

Класифікація ступенів пошкодження також є основою для моделювання відновлення лісів, оцінки ризиків ерозії та планування лісовідновлювальних заходів. Науково обґрунтований підхід до інтерпретації даних дозволяє визначати не лише масштаби збитків, а й потенційні стратегії відновлення екосистеми. Геоінформаційні системи забезпечують інтеграцію, оброблення та візуалізацію великого обсягу просторових даних, що дозволяє проводити комплексну оцінку масштабів та інтенсивності вигорання лісових насаджень. Застосування ГІС дає можливість поєднувати дані дистанційного зондування Землі, польових спостережень і статистичної інформації, створюючи точну та динамічну картину змін у лісових екосистемах [46].

Одним із базових інструментів є оверлей-аналіз, який полягає у накладанні просторових шарів, отриманих до та після пожежі. Завдяки цьому методу можна визначити межі пошкоджених територій, оцінити просторове співвідношення

різних ступенів вигорання та встановити зони, де спостерігаються найсильніші зміни індексів рослинності (наприклад, dNBR або NDVI).

Іншим важливим елементом є розрахунок площі пошкоджених територій, використовуючи растрові або векторні дані, ГІС забезпечує точне визначення площ згарищ, класифікованих за ступенем руйнування. Цей підхід дозволяє отримати статистичну інформацію про відсоткове співвідношення пошкоджених ділянок різної інтенсивності, що є основою для оцінки екологічних збитків і планування лісовідновлювальних заходів.

Крім того, у ГІС здійснюється побудова буферних зон навколо згарищ, ці зони застосовуються для аналізу впливу пожежі на прилеглі екосистеми, транспортну або рекреаційну інфраструктуру, також вони дозволяють оцінити можливе поширення негативних наслідків, наприклад: ерозії, деградації ґрунтів, зниження біорізноманіття.

Серед переваг ГІС-технологій варто відзначити: високу точність візуалізації, можливість оновлення інформації у реальному часі та зручність представлення результатів у картографічній формі. Карти, створені у ГІС, дозволяють швидко і наочно виявити осередки інтенсивних руйнувань, а також прогнозувати напрямки відновлення лісових угруповань. Інтеграція супутникових зображень, аналітичних індексів і польових спостережень забезпечує створення єдиної просторової бази даних, яка може бути використана для довгострокового моніторингу та планування природоохоронних заходів [15].

Застосування ГІС у дослідженні наслідків лісових пожеж значно підвищує ефективність аналізу пошкоджень. Поєднання спектральних індексів (NDVI, NBR, dNBR) з просторовими методами оброблення даних дозволяє точно оцінити площі згарищ, ступінь пошкодження рослинності та динаміку відновлення лісових екосистем. Використання інструментів накладання шарів, розрахунку площ та побудови буферних зон створює можливість комплексного підходу до оцінки наслідків пожеж. Отже, ГІС-технології є невід'ємним компонентом сучасного екологічного моніторингу та прийняття рішень у сфері охорони, управління і відновлення лісових територій.

#### 1.4. Огляд глобальних продуктів дистанційного моніторингу пожеж

Глобальні супутникові продукти дозволяють виявляти осередки активного горіння, фіксувати зміни рослинного покриву, визначати площі згарищ та оцінювати енергетичні характеристики пожеж. На відміну від локального моніторингу, який охоплює окремі території або країни, глобальні продукти забезпечують безперервне спостереження за всією земною поверхнею, що є критично важливим для побудови моделей глобального клімату, прогнозування розповсюдження диму та аналізу транскордонних наслідків пожеж.

Глобальні супутникові місії відіграють фундаментальну роль у системі екологічного нагляду за пожежами, забезпечуючи систематичне спостереження за змінами, що відбуваються в біосфері. Такі місії, як MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на супутниках Terra та Aqua, VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на супутниках Suomi NPP та NOAA-20, а також Sentinel-3 Європейського космічного агентства, є основними джерелами даних для створення глобальних продуктів пожежного моніторингу [26].

Головними перевагами глобальних супутникових даних є оперативність, регулярне оновлення, повне охоплення великих територій і відкритість доступу до інформації. Більшість таких продуктів є загальнодоступними через портали NASA, Copernicus, NOAA та інші міжнародні ресурси. Завдяки цьому дослідники, державні установи та екологічні організації мають можливість проводити систематичний моніторинг пожеж без значних фінансових витрат і технічних обмежень.

Основна мета глобальних продуктів дистанційного моніторингу пожеж полягає у виявленні активних осередків горіння (Active Fires), визначенні площ згарищ (Burned Area) та оцінці вивільненої енергії під час горіння (Fire Radiative Power, FRP). Active Fires – це пікселі на супутникових зображеннях, у яких зафіксовано теплове випромінювання, характерне для процесу горіння. Їх виявлення дозволяє оперативно ідентифікувати місця виникнення пожеж і

контролювати їх розвиток у режимі реального часу. Burned Area – це продукт, що визначає території, які зазнали впливу вогню, шляхом порівняння спектральних характеристик до і після пожежі із застосуванням індексів NBR та dNBR, ці дані дають змогу оцінити масштаби екологічних втрат, визначити рівень деградації екосистем і прогнозувати темпи природного відновлення. Fire Radiative Power (FRP), своєю чергою, характеризує інтенсивність теплового випромінювання під час горіння, тобто кількість енергії, що виділяється внаслідок пожежі, даний показник використовується для оцінки обсягів викидів вуглекислого газу, чадного газу та аерозолів в атмосферу, тому має важливе значення для дослідження кліматичних наслідків великих пожеж [41].

На відміну від локального картографування, глобальні продукти відзначаються нижчою просторовою роздільною здатністю, проте мають високу періодичність оновлення від кількох разів на добу до щоденного спостереження. Це забезпечує стабільність даних і дає змогу створювати багаторічні серії спостережень, які використовуються для аналізу тенденцій і частотності пожеж у різних кліматичних зонах світу.

Дані глобальних супутникових продуктів мають велике значення для: виявлення пожеж у віддалених або важкодоступних регіонах; моніторингу впливу пожеж на глобальні біогеохімічні цикли; оцінки викидів парникових газів і моделювання їхнього впливу на атмосферу; аналізу довгострокових змін у площах згорілих територій.

Однією з найважливіших систем є MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) – сенсор, встановлений на супутниках Terra (запущений у 1999 р.) та Aqua (2002 р.), які належать до космічної програми NASA. MODIS здійснює зйомку у 36 спектральних каналах із просторовою роздільною здатністю від 250 до 1000 метрів, що дозволяє охоплювати великі території з періодом повторного спостереження 1–2 доби. Основними продуктами, що використовуються для моніторингу пожеж, є MOD14/MYD14 (виявлення активних осередків горіння) та MCD64A1 (визначення вигорілих площ). Ці дані формують основу численних глобальних баз, зокрема Fire Information for

Resource Management System (FIRMS), яка забезпечує відкритий доступ до інформації про пожежі в режимі майже реального часу. Завдяки стабільній періодичності та широкому охопленню, продукти MODIS стали базовими для довгострокового аналізу динаміки пожеж у світі [33].

Іншим важливим джерелом супутникової інформації є VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), розміщений на супутниках Suomi NPP (2011 р.) та NOAA-20 (2017 р.). Порівняно з MODIS, сенсор VIIRS має вищу просторову роздільну здатність – 375 метрів, що забезпечує кращу ідентифікацію дрібних та низькоінтенсивних вогнищ. Значною перевагою системи є підвищена чутливість у нічний час завдяки використанню спеціального каналу Day/Night Band (DNB), що дозволяє виявляти пожежі навіть за слабкого світіння. Продукти VIIRS є сумісними з даними MODIS, що створює можливість для комбінованого аналізу та забезпечує безперервність рядів спостережень після завершення місії MODIS.

Серед європейських супутникових місій особливе значення має Sentinel-2, запущений у межах програми Copernicus Європейського космічного агентства (ESA). Sentinel-2 обладнаний мультиспектральним сенсором (MSI) з просторовою роздільною здатністю 10–20 метрів, що робить його надзвичайно цінним для детального картографування згарищ та оцінки постпожежних змін рослинного покриву. Дані Sentinel-2 широко застосовуються для створення індексів на кшталт Normalized Burn Ratio (NBR) або dNBR, які дають змогу оцінити ступінь пошкодження лісових екосистем. Попри меншу частоту оновлення (5 діб), висока деталізація знімків забезпечує точне відображення меж вигорілих ділянок та структурних змін ландшафтів [14].

До найдавніших і водночас найстабільніших місій належать супутники серії Landsat 8–9, спільного проєкту NASA та USGS (United States Geological Survey). Супутники Landsat мають просторову роздільну здатність 30 метрів і використовуються переважно для верифікації глобальних продуктів MODIS та VIIRS, а також для ретроспективного аналізу пожежних процесів. Завдяки безперервній архівній базі, що охоплює понад 50 років, Landsat забезпечує

можливість вивчення довгострокових змін у природних екосистемах, пов'язаних із пожежами, урбанізацією та зміною землекористування.

Оперативний моніторинг активних осередків горіння забезпечують геостаціонарні супутники, зокрема Meteosat (EUMETSAT, Європа), Himawari (JMA, Японія) та GOES (NOAA, США), дані платформи функціонують на висоті близько 36 000 км, що дає можливість постійного спостереження за певним регіоном Землі. Основною перевагою геостаціонарних супутників є висока часова роздільна здатність – оновлення даних здійснюється кожні 10–30 хвилин. Така оперативність є критично важливою для служб цивільного захисту, оскільки дозволяє відстежувати розвиток пожеж у режимі близькому до реального часу, визначати напрямки поширення полум'я та потенційні загрози населеним пунктам.

Отже, сучасна система супутникового моніторингу пожеж базується на інтеграції даних різних місій, які взаємодоповнюють одна одну за просторовою, часовою та спектральною роздільністю. MODIS та VIIRS забезпечують глобальне охоплення з високою частотою оновлення, Sentinel-2 і Landsat - детальне картографування наслідків, а геостаціонарні супутники – оперативне виявлення активних вогнищ. Такий комплексний підхід дозволяє отримувати багатовимірне уявлення про динаміку пожежних процесів, оцінювати їх екологічні наслідки та підвищувати ефективність систем попередження надзвичайних ситуацій.

Сучасні системи дистанційного моніторингу пожеж не обмежуються лише отриманням супутникових знімків або аналітичних продуктів. Важливим компонентом глобальної системи спостереження є онлайн-сервіси доступу, оброблення та візуалізації даних, які забезпечують інтеграцію інформації з різних джерел і спрощують її використання для наукових, управлінських і природоохоронних цілей, такі платформи створюють можливість оперативного аналізу, просторової візуалізації пожежної активності, а також швидкого реагування на надзвичайні ситуації. Найбільш відомими серед них є: NASA

FIRMS, Copernicus Emergency Management Service (EMS), Global Forest Watch Fires (GFW Fires) та ESA Fire\_cci [27].

Сервіс NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System) є одним із найпопулярніших інструментів для спостереження за активними пожежами у режимі реального часу, адже він забезпечує безперервний доступ до супутникових даних з сенсорів MODIS та VIIRS, що дозволяє користувачам отримувати інформацію про координати, час виявлення та інтенсивність осередків горіння. Завдяки простому інтерфейсу FIRMS дає змогу візуалізувати активні пожежі на карті, завантажувати дані у форматах shapefile, KML чи CSV, а також інтегрувати їх у середовища ГІС для подальшого аналізу.

Особливістю FIRMS є оперативність оновлення даних – інформація надходить із затримкою лише кілька годин після проходження супутника. Це робить систему цінним інструментом для моніторингу надзвичайних ситуацій, прогнозування поширення вогню та координації робіт із ліквідації наслідків. Крім того, FIRMS пропонує функції побудови часових рядів пожежної активності, що дає змогу аналізувати тенденції змін інтенсивності пожеж протягом тижнів або сезонів.

Європейська програма Copernicus Emergency Management Service (EMS) є частиною системи космічного спостереження\*Copernicus, спрямованої на забезпечення швидкого реагування на природні та техногенні катастрофи. У контексті пожеж EMS пропонує оперативні карти пошкоджень, оцінку масштабів вигорання та визначення зон найбільшої деградації. Дані для сервісу формуються на основі спостережень супутників Sentinel-1, Sentinel-2 та інших платформ Європейського космічного агентства. Особливу увагу в системі EMS приділено верифікації результатів і точності просторового аналізу. Карти, створені у межах цього сервісу, використовуються урядовими установами, рятувальними службами та екологічними організаціями для оцінки збитків і планування відновлення. Крім того, EMS надає доступ до історичних даних пожеж, що дає змогу проводити порівняльні оцінки впливу катастроф у різні роки та регіони. Важливою перевагою Copernicus EMS є відкритість і

стандартизований формат даних, що забезпечує їх сумісність із більшістю аналітичних платформ і ГІС-програм [51].

Платформа Global Forest Watch Fires, створена Інститутом світових ресурсів (World Resources Institute, WRI), є інтерактивною системою моніторингу пожеж і вирубок лісів, яка інтегрує супутникові спостереження з просторовими даними про типи землекористування, лісовий покрив та адміністративні межі. Вона надає можливість аналізувати динаміку пожежної активності у взаємозв'язку з антропогенними факторами, такими як розширення аграрних угідь, видобуток ресурсів або будівництво інфраструктури.

GFW Fires дозволяє фільтрувати дані за країною, часовим періодом, типом землекористування або охоронним статусом території. Завдяки цьому система є потужним інструментом для оцінки ефективності природоохоронних заходів і моніторингу пожеж у природних заповідниках та лісових резерватах. Крім того, GFW Fires забезпечує автоматичні сповіщення про нові осередки пожеж, що допомагає урядовим і громадським організаціям оперативно реагувати на загрози. Перевагою цього сервісу є поєднання екологічних, соціальних і просторових даних, що забезпечує комплексне розуміння впливу пожеж на довкілля.

Програма ESA Fire\_cci, яка є частиною більш масштабної ініціативи Climate Change Initiative (CCI) Європейського космічного агентства, зосереджується на створенні високоточних і стабільних довгострокових наборів даних про пожежі для потреб кліматології. Основна мета Fire\_cci забезпечити науково верифіковані продукти, що відображають просторово-часову динаміку вигорілих площ та частоту пожеж у глобальному масштабі.

Особливістю цієї ініціативи є уніфікована методологія оброблення даних, що забезпечує порівнюваність результатів між різними регіонами та часовими періодами. Завдяки цьому продукти Fire\_cci широко використовуються у глобальних кліматичних моделях для оцінки впливу пожеж на вуглецевий цикл, зміну альbedo та енергетичний баланс планети. Висока просторово-часова

стабільність цих даних робить їх основою для багаторічного екологічного моніторингу та дослідження тенденцій кліматичних змін [9].

Таким чином, глобальні сервіси візуалізації даних про пожежі виконують критично важливу функцію у сфері оперативного екологічного моніторингу, аналітики та прогнозування, вони поєднують дані з різних супутникових систем, забезпечують інтерактивний доступ до картографічної інформації та сприяють прийняттю ефективних рішень у сфері охорони навколишнього середовища. Завдяки відкритості та науковій точності такі сервіси стали невід'ємною частиною сучасної системи управління природними ризиками.

Застосування глобальних супутникових продуктів моніторингу пожеж в Україні має особливе значення у зв'язку з підвищенням частоти екстремальних природних явищ, масштабними лісовими пожежами та зростанням антропогенного навантаження на природні екосистеми. Дані з супутників MODIS, VIIRS та Sentinel активно використовуються для виявлення активних осередків горіння, оцінки площ згарищ і просторового аналізу наслідків пожеж. Одним із найбільш відомих прикладів є моніторинг пожеж у Чорнобильській зоні відчуження, де супутникові продукти MODIS та VIIRS дозволили відстежити поширення вогню, визначити інтенсивність горіння та прогнозувати напрямки розповсюдження диму. Аналогічні підходи застосовуються й у південних областях України, зокрема в Одеській, Херсонській та Миколаївській, де супутниковий моніторинг допомагає оцінювати пожежну небезпеку в агроландшафтах і степових територіях. У Карпатському регіоні дані Sentinel-2 використовуються для аналізу лісових масивів, оцінки деградації рослинного покриву та планування заходів із лісовідновлення.

Важливим напрямом є інтеграція глобальних супутникових продуктів у національні геоінформаційні системи та екологічні проєкти. Зокрема, платформи «ЕкоСистема» та «Зелена Країна» використовують супутникові дані для контролю змін у лісовому покриві, оцінки ефективності природоохоронних заходів і моніторингу динаміки відновлення лісів. Також результати обробки продуктів MODIS та VIIRS впроваджуються у систему дистанційного

моніторингу лісів, яку адмініструє Державне агентство лісових ресурсів України, для виявлення потенційно небезпечних територій і формування бази даних пожежних подій [20].

Потенціал глобальних супутникових продуктів полягає не лише у фіксації фактів горіння, а й у побудові національних карт ризику пожеж. Поєднання даних про температуру поверхні, рослинний індекс NDVI та показники вологості з геопросторовими шарами землекористування дозволяє створювати моделі прогнозування пожежної небезпеки. Такі підходи особливо актуальні для адаптації до змін клімату та розроблення стратегій зниження вразливості природних екосистем. Використання глобальних супутникових продуктів у поєднанні з національними базами даних формує основу для ефективного управління природними ресурсами, планування лісогосподарських робіт і реалізації державних програм сталого розвитку.

Глобальні супутникові продукти відіграють ключову роль у системі екологічного моніторингу України, забезпечуючи оперативний, достовірний та масштабний контроль за динамікою пожеж. Їхнє використання сприяє підвищенню точності оцінки екологічних наслідків, розробленню карт ризику та ефективному плануванню заходів із лісовідновлення. Оптимальним підходом є поєднання глобальних і локальних методів ГІС-аналізу, що дозволяє комплексно досліджувати пожежні процеси та формувати науково обґрунтовану політику управління природними територіями.

### **1.5. Висновок до розділу 1**

Узагальнення аналізу літератури свідчить, що система моніторингу пожеж еволюціонувала від локальних візуальних спостережень до інтегрованих багаторівневих комплексів, що поєднують контактні методи, супутникове дистанційне зондування, геоінформаційні технології та алгоритми штучного інтелекту. Ключовою основою сучасних підходів є використання різних спектральних діапазонів (VIS, NIR, SWIR, MWIR, LWIR, MW) і спектральних

індексів (NDVI, NBR, dNBR), які дозволяють не лише виявляти активні осередки горіння, а й кількісно оцінювати ступінь пошкодження рослинності та динаміку постпожежного відновлення. Важливу роль відіграє ГІС-аналіз, що забезпечує розрахунок площ згарищ, класифікацію ступенів пошкодження, накладання просторових шарів і створення тематичних карт для підтримки управлінських рішень.

Глобальні продукти та сервіси (MODIS, VIIRS, Sentinel, Landsat, FIRMS, Copernicus EMS, GFW Fires, Fire\_cci) забезпечують оперативне виявлення пожеж, визначення площ згарищ і оцінку їхнього впливу на біосферу й клімат, тоді як високодетальні знімки Sentinel-2 і Landsat є основою для точного картографування периметрів згарищ і валідації глобальних наборів даних. Для України поєднання цих глобальних продуктів із національними ГІС-системами та даними лісового фонду відкриває широкі можливості для створення карт ризику пожеж та оцінки екологічних наслідків. Таким чином, сучасні методи дистанційного моніторингу пожеж формують науково обґрунтовану базу для комплексного управління пожежними процесами на регіональному й національному рівнях.

## РОЗДІЛ 2

### ПРИРОДНО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1. Характеристика фізико географічних умов регіону дослідження

Сарненське надлісництво розташоване у північній частині Рівненської області, в межах Сарненського адміністративного району. Територія надлісництва охоплює площу 113,0 тис. га і включає 18 лісництв, серед яких найбільшими за площею є Озерське (9153,4 га), Страшівське (8751,7 га) та Дубровицьке (8114,9 га). Адміністративний центр надлісництва знаходиться за адресою: м. Сарни, вул. Гоголя, 34, 34500.

Організаційна структура надлісництва представлена системою лісництв, кожне з яких здійснює комплекс заходів із ведення лісового господарства, охорони, відтворення та раціонального використання лісових ресурсів. Зовнішні межі надлісництва, адміністративного району та місця розташування контор відображені на офіційній карті-схемі.

До складу Сарненського надлісництва входять Карпилівське, Руднянське, Сарненське, Страшівське, Костянтинівське, Кричильське, Немовицьке, Тинненське, Лісівське, Літвицьке, Дубровицьке, Трипутнянське, Бережницьке, Перебродівське, Будимельське, Залузьке, Озерське та Черменське лісництва.

Площа окремих лісництв коливається від 2586,4 га (Трипутнянське) до 9153,4 га (Озерське). Ліси надлісництва адміністративно підпорядковуються територіальним громадам Сарненського району – Сарненській міській, Немовицькій, Вирівській, Дубровицькій, Клесівській селищній, Миляцькій, Старосільській та Висоцькій сільським територіальним громадам. Найбільші площі лісових насаджень зосереджені в межах Сарненської міської (26,2 тис. га) та Дубровицької міської (49,0 тис. га) територіальних громад [5].

Державне підприємство «Сарненський лісгосп» було створене у 1940 році, одразу після приєднання Західної України до складу УРСР. Спочатку воно

включало чотири лісництва загальною площею 37,3 тис. га. Протягом 1960-х років площа підприємства неодноразово збільшувалася за рахунок приєднання земель колгоспів і малопродуктивних угідь, унаслідок чого сформувалася сучасна територіальна структура господарства. У 1991 році підприємство отримало сучасну назву – Державне підприємство «Сарненське лісове господарство», а у 2021 році, відповідно до наказу Державного агентства лісових ресурсів України, до його складу увійшли землі ліквідованого ДП «Дубровицький лісгосп» загальною площею 58,5 тис. га.

Перші лісовпорядні роботи на території надлісництва проводилися у 1951 році, наступні – у 1958, 1969, 1979, 1989 та 2006 роках. Останнє комплексне лісовпорядкування виконано у 2019 році Харківською лісовпорядною експедицією за I розрядом відповідно до вимог чинної інструкції. Загальна площа лісовпорядкування становила 113 014 га, у межах якої було виділено 1603 квартали та 52 598 таксаційних виділів. Середня площа кварталу становить 70,5 га, а виділу – 2,1 га. У процесі робіт закладено понад 2300 пробних площ для оцінювання лісових насаджень, а також проведено вибірково-перелікові та санітарні обстеження.

Лісовпорядні планшети створені на основі ортофотопланів масштабу 1:10 000 (зйомка 2018 року), матеріалів попередніх лісовпорядкувань і документів безперервного спостереження. Усі зміни площ та характеристик лісів фіксуються у цифровій базі даних, яка щорічно оновлюється для забезпечення точності моніторингу.

Під час організації лісовпорядних робіт керуються положеннями Лісового кодексу України, Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», іншими нормативно-правовими актами у сфері ведення лісового господарства, а також протоколами лісовпорядних нарад. Діяльність надлісництва спрямована на сталий розвиток лісових ресурсів, охорону екосистем, відтворення лісів і підвищення їх продуктивності [13].

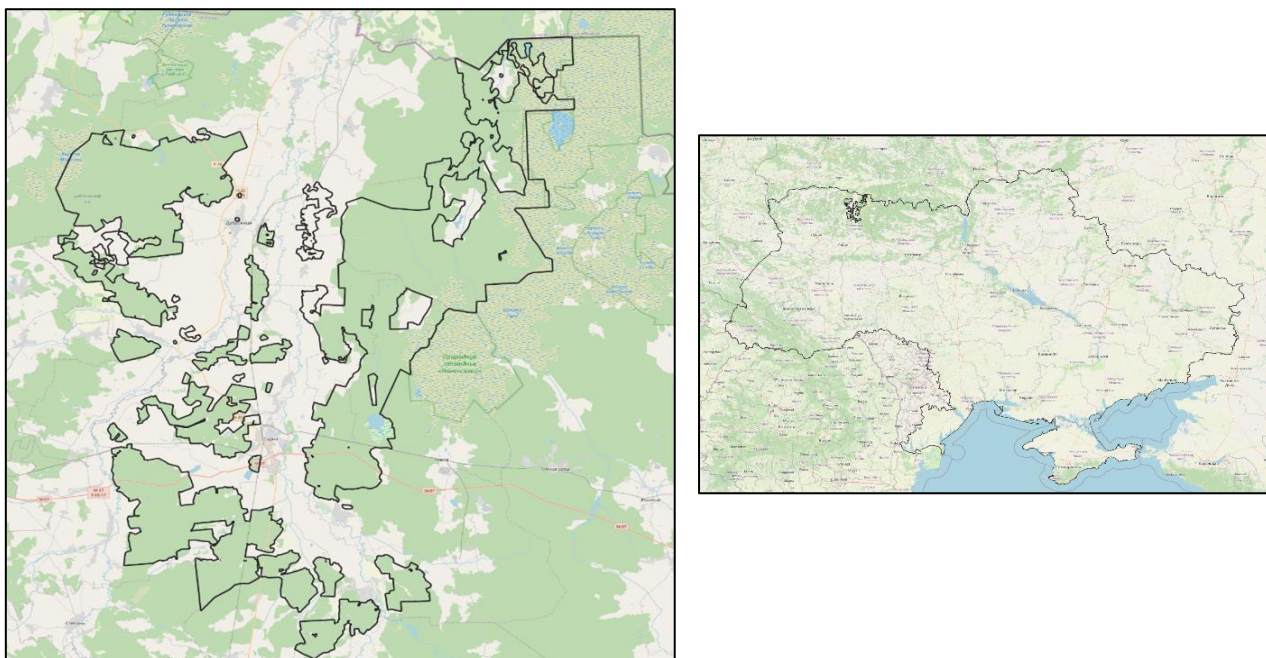


Рис. 2.1. Розташування території досліджень на карті України (зона діяльності Сарненського надлісництва)

Сарненське надлісництво Філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси України» – загальна площа 113014,0 га (значення наведено у проекті організації лісового господарства для Сарненського надлісництва; дані за лісовпорядкуванням на 01.11.2019).

Рельєф території переважно рівнинний, із незначними хвилястими формами, зумовленими діяльністю давнього льодовика. Абсолютні висоти змінюються в межах від 130 до 180 м над рівнем моря. На півночі та сході трапляються зниження з перезволоженими ґрунтами й болотами. Ерозійні процеси слабо виражені, що характерно для поліських рівнин. Гідрографічна мережа надлісництва належить до басейну річки Прип'ять. Основними водотоками є річки Случ, Горинь і Бистриця з їхніми численними притоками. У пониженнях місцевості розташовані дрібні озера та заболочені ділянки, які відіграють важливу роль у підтриманні водного режиму лісових екосистем і формуванні мікроклімату. На значній частині території функціонують меліоративні системи, створені для регулювання рівня ґрунтових вод [5].

Кліматичні умови території є помірно-континентальними з м'якою зимою та теплим літом. Середня температура січня становить  $-5...-6$  °С, липня –  $+18...+19$  °С. Середньорічна кількість опадів коливається в межах 550–650 мм, причому більша їх частина припадає на теплий період року. Для регіону характерні північно-західні вітри середньої сили. Тривалість вегетаційного періоду становить близько 190–200 днів. У посушливі роки підвищується ризик виникнення природних пожеж.

Ґрунтовий покрив представлений переважно дерново-підзолистими піщаними та супіщаними ґрунтами, які сформувалися на водно-льодовикових відкладах. У зниженнях і долинах річок поширені торф'яно-болотні ґрунти, місцями – світло-сірі лісові. Вміст гумусу в більшості ґрунтів становить 1–2 %, кислотність – слабокисла або кисла. Такі умови є сприятливими для росту соснових та березових лісів.

Рослинний покрив і ландшафти належать до Поліської природної зони. Домінують соснові ліси, що займають більшу частину території. На вологих ґрунтах трапляються вільха чорна, береза повисла, осика, а на більш сухих – дуб звичайний і ялина. Ландшафти представлені рівнинно-зандровими та озерно-алювіальними комплексами з переважанням лісових і лісово-болотних екосистем.

Природно-охоронні об'єкти у межах Сарненського надлісництва мають важливе екологічне значення. Тут збереглися ділянки цінних природних біотопів, заказники місцевого значення, пам'ятки природи та охоронні території, що сприяють збереженню біорізноманіття Поліського регіону.

Відтворення лісів та лісорозведення на території Сарненського надлісництва здійснюється відповідно до проектних рішень, розрахованих на найближчі 10 років. Основні заходи спрямовані на лісовідновлення не вкритих лісовою рослинністю ділянок, серед яких зруби, згарища, рідколісся та загиблі насадження. Загальна площа, що потребує лісовідновлення, становить 6660,2 га, з яких природне поновлення можливе на 2159,5 га, тоді як решта 4500,7 га вимагає штучного відтворення або сприяння природному поновленню.

Найбільша частка лісових культур запланована із сосни звичайної, що обумовлено її екологічною пластичністю та господарською цінністю. Термін змикання лісових культур становить у середньому 5 років, що відповідає середнім показникам для поліських типів лісу. До фонду лісорозведення віднесено 514,1 га земель (368,6 га галявин і 145,5 га нелісових ділянок), серед яких частина потребує рекультивації після незаконного видобутку бурштину. Лісорозведення передбачено здійснювати протягом п'ятирічного періоду зі щорічним створенням лісових культур на площі близько 37 га. Загалом система лісовідновлення і лісорозведення в межах надлісництва забезпечує збалансоване використання земельних ресурсів, спрямована на підвищення лісистості території та відновлення стійкості екосистем після антропогенних і природних порушень.

## **2.2. Історія лісових пожеж**

Історія лісових пожеж на території України має тривалу і складну динаміку, що безпосередньо пов'язана з кліматичними змінами, рівнем антропогенного навантаження та ефективністю системи охорони лісів. Починаючи з другої половини ХХ століття, лісові пожежі стали одним із найвагоміших екологічних чинників деградації лісових екосистем. У радянський період основна увага приділялася гасінню пожеж, а не їх попередженню, що зумовило накопичення великої кількості сухої біомаси та підвищення пожежної небезпеки. Після здобуття Україною незалежності система лісоохоронних заходів зазнала істотних змін: було створено державну службу охорони лісів, запроваджено моніторинг пожежної небезпеки, проте проблема масових загорянь у посушливі роки залишилася актуальною. Особливо складними для лісового господарства стали 2010, 2015 та 2020 роки, коли внаслідок екстремальних погодних умов та людського чинника зафіксовано різке зростання кількості великих пожеж у Поліському регіоні, зокрема й у межах

Сарненського надлісництва філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси України» [11].

Більшість пожеж мала низовий характер, тобто займання поширювалося переважно по поверхневому покриву. Встановлено, що у 100% випадків причини займання офіційно не визначено, однак аналіз свідчить про домінування людського фактора, зокрема порушення правил пожежної безпеки, випалювання сухої рослинності та необережне поводження з вогнем. Загалом за період спостережень було виявлено 61 випадок порушення вимог пожежної безпеки, з них 9 у 2018 році та 12 у 2019 році. За ці порушення накладено адміністративні стягнення на загальну суму 1 853 грн у 2018 році та 1 020 грн у 2019 році.

З метою запобігання виникненню та розповсюдженню лісових пожеж проводиться комплекс профілактичних і протипожежних заходів. Зокрема, функціонує лісова пожежна станція, обладнано вісім пунктів зосередження протипожежного інвентарю, створено та утримується протипожежна інфраструктура. Значну увагу приділено інформаційно-просвітницькій роботі серед населення: проведено дев'ять виставок із пожежної безпеки, встановлено два протипожежні панно, десять місць відпочинку і паління, а також 54 попереджувальні аншлаги. Для обмеження доступу транспорту у пожежонебезпечний період встановлено 50 шлагбаумів.

У структурі лісогосподарських заходів важливе місце займає створення і догляд за мінералізованими смугами, які відіграють ключову роль у стримуванні поширення пожеж. За звітний період було створено понад 10 км таких смуг, що становить 201% від запланованого обсягу. Догляд за ними виконувався із перевиконанням плану – на 133%. Аналогічно, створення і утримання протипожежних розривів виконано на 100–200%. Проведено ремонт доріг протипожежного призначення протяжністю 30,1 км, що на 50% перевищує плановий показник, а також здійснено ремонт пожежних веж і підтримання штучних водойм. Ці заходи свідчать про системну роботу з підвищення рівня пожежної безпеки лісового фонду [15].

Протягом останнього десятиріччя спостерігалася виразна динаміка зміни кількості лісових пожеж. Найбільше їх зафіксовано у 2014–2016 роках, з критичним максимумом у 2015 році. Цей період характеризувався високими температурами, низькою вологістю повітря та значною кількістю антропогенних займання, що співпало з піковими показниками пожежності на території всієї України, зокрема у Чорнобильській зоні відчуження. За супутниковими спостереженнями системи MODIS чітко простежувалися значні шлейфи диму, що підтверджує масштаби стихії.

Другий піковий період припав на 2020 рік, коли на території України знову було зафіксовано значне підвищення кількості пожеж, зокрема у північних та східних областях. Після цього року спостерігається тенденція до поступового зниження кількості випадків займання, що пояснюється як посиленням контролю з боку лісових господарств, так і покращенням матеріально-технічного забезпечення підрозділів охорони лісу.

Аналіз розподілу пожеж за типами земельного покриття показує, що основна їхня частина припадає на лісові угіддя, хоча певна кількість займання спостерігається також на сільськогосподарських землях, природних луках і водно-болотних угіддях. Для посушливих років пожежі на болотах стають типовим явищем, що створює додаткову екологічну небезпеку через значне задимлення та викиди продуктів горіння в атмосферу.

Протягом десятирічного періоду (2015–2025 рр.) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва зафіксовано 207 випадків спрацювання системи MODIS, що свідчить про активну роботу системи супутникового моніторингу виявлення пожеж. Сезонна динаміка також має дві характерні фази підвищеної активності: весняну (березень–квітень) та літньо-осінню (серпень–вересень). Перший пік пов'язаний із господарською діяльністю населення, коли здійснюється спалювання рослинних решток після зими. Другий пік зумовлений завершенням польових робіт і спалюванням стерні. Обидва періоди супроводжуються низькою вологістю горючих матеріалів і частими поривами вітру, що створює умови для швидкого розповсюдження вогню [12].

Отже, історія лісових пожеж на території Сарненського надлісництва демонструє циклічний характер їх виникнення, тісно пов'язаний із кліматичними умовами, господарською діяльністю людини та станом лісової охорони. Ефективна реалізація комплексу протипожежних заходів, удосконалення моніторингу з використанням супутникових систем спостереження та підвищення свідомості населення залишаються ключовими чинниками зменшення масштабів лісових пожеж у майбутньому.

## 2.3. Характеристика даних ДЗЗ використаних у роботі

### 2.3.1. Дані термальних аномалій MODIS і VIIRS

Основою для вивчення просторово-часової динаміки пожеж у межах досліджуваної території є супутникові дані про термальні аномалії, отримані з сервісу NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Цей сервіс призначений для оперативного моніторингу пожеж на поверхні Землі та ґрунтується на даних дистанційного зондування з супутників серії Terra і Aqua (сенсори MODIS), а також Suomi NPP та NOAA-20 (сенсори VIIRS). Дані доступні у форматі точкових теплових виявлень, що дозволяють ідентифікувати активні осередки горіння або інші джерела теплової енергії.



Рис. 2.2. Інтерфейс сервісу NASA FIRMS

Сенсори MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) мають просторову роздільну здатність близько 1 км у каналах, що використовуються для виявлення пожеж. Таким чином, кожен червоний квадрат на карті FIRMS відповідає приблизно 1 км<sup>2</sup> поверхні, в межах якого зафіксовано підвищену теплову активність. На відміну від них, сенсори VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) забезпечують вищу деталізацію – близько 375 м, що забезпечує точніше визначення контурів термічних аномалій й оцінку їх просторових особливостей. Обидві системи використовують алгоритми аналізу інфрачервоного випромінювання для виявлення ділянок із температурою, що суттєво перевищує навколишнє середовище [27].

Важливо зазначити, що термальні аномалії не завжди однозначно свідчать про пожежу. Джерелом високої температури можуть бути гарячий дим, промислові об'єкти, сільськогосподарські підпалювання, спалювання стерні або інші процеси. При цьому супутник не фіксує точну площу вогню – лише факт існування теплового об'єкта всередині пікселя. Тобто реальна площа горіння може бути як значно меншою, так і більшою, ніж відображений квадрат.

У процесі інтерпретації також враховується рівень достовірності виявлення (Fire Confidence), який подається у вигляді атрибуту до кожної точки. Високі значення достовірності означають, що алгоритм має достатньо підстав вважати теплову аномалію результатом саме пожежі. Дані MODIS та VIIRS проходять радіометричні корекції, однак залишаються певні фактори похибки, пов'язані з кутом зйомки, атмосферними умовами, наявністю щільного диму або хмарності, що можуть як приглушувати, так і спотворювати тепловий сигнал.

Супутниковий моніторинг пожеж особливо ефективний для оперативного виявлення нових осередків займання, що дозволяє здійснювати оцінку небезпеки на великих територіях у реальному часі. Проте при аналізі локальних природних умов або визначенні меж уражених площ необхідно комбінувати ці дані з матеріалами більш високої просторової роздільної здатності, наприклад Sentinel-2, Landsat або аерофотозйомкою. Це обумовлено тим, що супутникові

сенсори MODIS і VIIRS не завжди точно ідентифікують дрібні пожежі й можуть не враховувати їх у мозаїці знімка через просторові обмеження.

Отже, дані FIRMS є надійним і оперативним джерелом інформації для аналізу осередків горіння й моніторингу пожежної активності у межах досліджуваної території, однак потребують критичного підходу при інтерпретації результатів. У цій роботі вони використовуються як основа для побудови карти теплових аномалій, виявлення періодів із найбільшою інтенсивністю горіння та оцінки впливу пожеж на природні комплекси. Джерело даних: NASA FIRMS – Fire Information for Resource Management System.

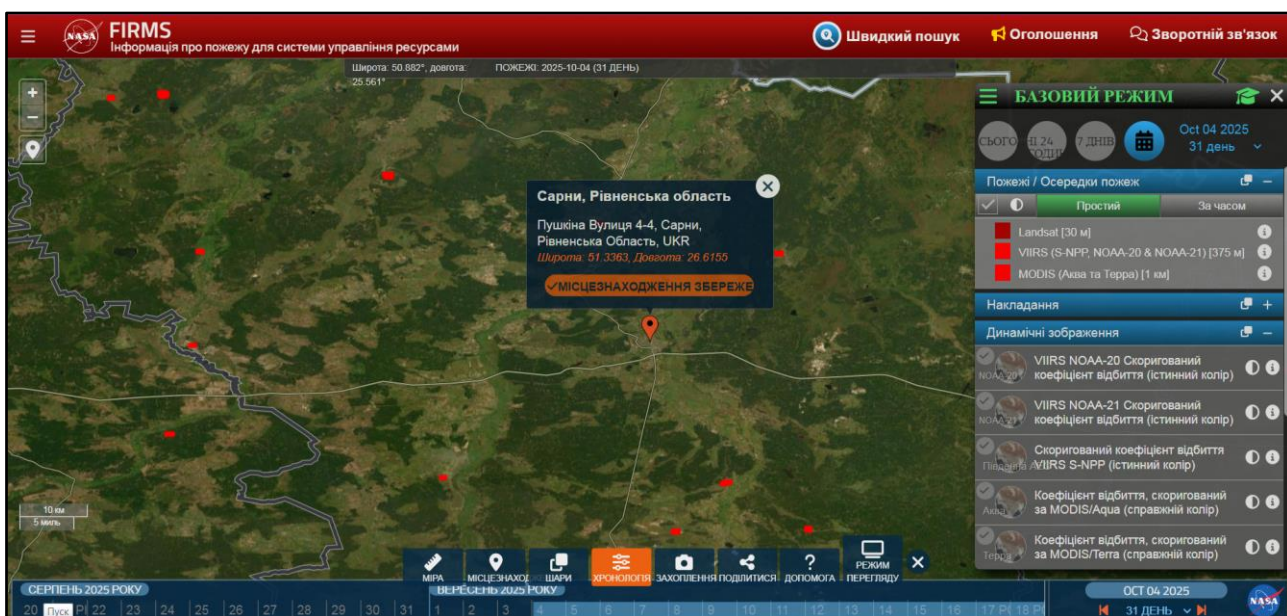


Рис. 2.3. Визначення територій Сарненського надлісництва в сервісі NASA FIRMS

Для здійснення детального аналізу пожежної активності в межах досліджуваної території було застосовано супутникові дані дистанційного зондування Землі, отримані з офіційного сервісу NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System). Цей інструмент дає змогу оперативно і наочно відстежувати осередки теплових аномалій, що відповідають фактам виникнення пожеж або інших джерел підвищеної температури на земній поверхні [52].

За допомогою системи просторового пошуку за координатами було визначено точне розташування об'єкта дослідження – Сарненське надлісництво (м. Сарни та навколишніх територій Рівненської області). Для цієї ділянки було проведено аналіз супутникових спостережень із метою визначення щомісячної наявності та кількості пожеж протягом останніх років, такий підхід забезпечує можливість простежити динаміку змін пожежної активності, виявити сезонні закономірності, а також визначити територіальні зони найбільшого ризику займання.

На екрані веб-інтерфейсу FIRMS термальні аномалії відображаються у вигляді червоних квадратів, кожен із яких позначає осередок виявленої теплової активності. У межах досліджуваної території в різні періоди року фіксується різна кількість таких аномалій, що свідчить про варіативність інтенсивності пожежного навантаження залежно від погодних умов, стану рослинності та господарської діяльності населення. Завдяки наочності візуалізації та доступу до хронологічної шкали спостережень, FIRMS дозволяє не лише оцінити поточний стан, а й відтворити ретроспективну картину розвитку пожеж у межах кількох років [33].

Практична цінність використання даних ДЗЗ полягає у можливості поєднати оперативність супутникових спостережень з аналітичним підходом до оцінки екологічних ризиків. У рамках даної роботи це дає змогу отримати об'єктивну інформаційну основу для подальшої просторової оцінки впливу пожеж на природні комплекси та ландшафтну структуру території.

Таким чином, застосування сервісу NASA FIRMS для аналізу даних MODIS і VIIRS забезпечило високу інформативність, наочність та достовірність результатів. Це дозволило простежити тенденції змін пожежної активності в межах території дослідження, визначити періоди з максимальною кількістю термальних аномалій і створити аналітичну базу для подальшої оцінки екологічних наслідків пожежних процесів.

### 2.3.2. Дані про згарища MODIS

Для аналізу просторового розподілу згарищ та активності пожеж на території дослідження використано дані супутникової системи MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), що реалізується у межах глобальної програми моніторингу NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System), отже ці дані забезпечують ідентифікацію та картографування зон горіння на основі теплового випромінювання, зафіксованого з борту супутників Terra і Aqua.

Продукт MODIS Fire and Thermal Anomalies відображає активні осередки пожеж і теплові аномалії, спричинені як природними, так і антропогенними процесами. До таких аномалій можуть належати лісові й степові пожежі, спалахи газу, виверження вулканів, промислові факели або навіть контрольовані сільськогосподарські підпалювання. Ці дані є ключовими для дослідження просторово-часової динаміки пожеж, визначення їхніх джерел, виявлення стійких гарячих точок, а також оцінки впливу диму на атмосферу й здоров'я населення [19].

Затримка в отриманні супутникової інформації (latency) становить до 3 годин для глобальних наборів даних та 1–30 хвилин для ультраоперативних реальних даних, така система забезпечує можливість використання MODIS не лише для ретроспективного аналізу, а й для оперативного реагування на надзвичайні ситуації.

Дані MODIS формуються окремо з двох супутників – Terra (продукт MOD14) та Aqua (продукт MYD14), а також у комбінованому вигляді MCD14. Просторова роздільна здатність зображень становить 1 км, а часова – одна доба, що дозволяє відстежувати розвиток пожеж у динаміці. Орбіта супутника Terra проходить через екватор у ранковий час (з півночі на південь), тоді як Aqua – вдень (з півдня на північ), що дає змогу отримувати дані двічі на добу для однієї території. На картах FIRMS згарища та теплові аномалії MODIS відображаються червоними квадратами, що відповідають центру пікселя розміром 1×1 км. У

межах цього пікселя може бути зафіксовано одну або кілька пожеж, тому координати позначають лише приблизне положення осередку. Алгоритм виявлення використовує інфрачервоні канали 21/22 та 31, що дають змогу виміряти температуру яскравості в Кельвінах та оцінити потужність випромінювання вогню (Fire Radiative Power, FRP) у мегаватах [29].

Таблиця 2.1

### Основні атрибути продукту MODIS

Атрибут	Короткий опис	Деталізований зміст
Latitude	Географічна широта	Визначає координату центру пікселя в межах 1 км; може не збігатися з фактичним місцем пожежі.
Longitude	Географічна довгота	Визначає координату центру пікселя в межах 1 км; може не збігатися з фактичним місцем пожежі.
Brightness	Температура яскравості (канал 21/22)	Вимірюється у Кельвінах, характеризує інтенсивність теплового випромінювання вогнища.
Scan	Розмір пікселя вздовж сканування	Відображає реальний розмір пікселя у напрямку сканування (збільшується ближче до країв орбіти).
Track	Розмір пікселя вздовж треку	Відображає реальний розмір пікселя у напрямку треку.
Acq_Date	Дата спостереження	Дата супутникового знімання у форматі UTC.
Acq_Time	Час спостереження	Час проходження супутника над територією, зазначений у годинах UTC.
Satellite	Назва супутника	Джерело даних: Aqua (A) або Terra (T).
Confidence	Рівень достовірності виявлення	Визначається у %, класифікується як низький (0–30%), номінальний (30–80%) або високий (80–100%).

## Продовження таблиці 2.1

Атрибут	Короткий опис	Деталізований зміст
FRP (Fire Radiative Power)	Потужність випромінювання вогню	Інтегрована енергія випромінювання у мегаватах (МВт), пропорційна інтенсивності горіння.
Type	Тип джерела теплової аномалії	0 – пожежа рослинності; 1 – вулканічна активність; 2 – інше джерело; 3 – морські спалахи.
Day/Night	Час доби спостереження	D – денне спостереження, N – нічне спостереження.
Brightness_31	Температура яскравості (канал 31)	Температура вогняного пікселя у Кельвінах, використовується для уточнення інтенсивності.
Version	Версія обробки даних	Вказує тип обробки: URT – ультрареальний час; RT – реальний; NRT – майже реальний; без суфікса – стандартна обробка.
Delay (затримка)	Час отримання даних	До 3 годин для глобальних продуктів; 1–30 хв для США та Канади (у режимі URT або RT).

Окрім виявлення активних осередків пожеж, супутникові дані MODIS використовуються для побудови продукту MCD64A1 – глобальної карти випалених територій, що дозволяє оцінити площі згарищ за певний період. Такий підхід базується на аналізі спектральних індексів і зниження відбивної здатності рослинного покриву після проходження вогню.

Таким чином, продукт MODIS Fire and Thermal Anomalies забезпечує цінну інформацію для ідентифікації, моніторингу й кількісного аналізу пожежної активності. Його дані є оперативними, стандартизованими та глобально узгодженими, що робить їх особливо корисними для екологічних, географічних і просторово-аналітичних досліджень [19].

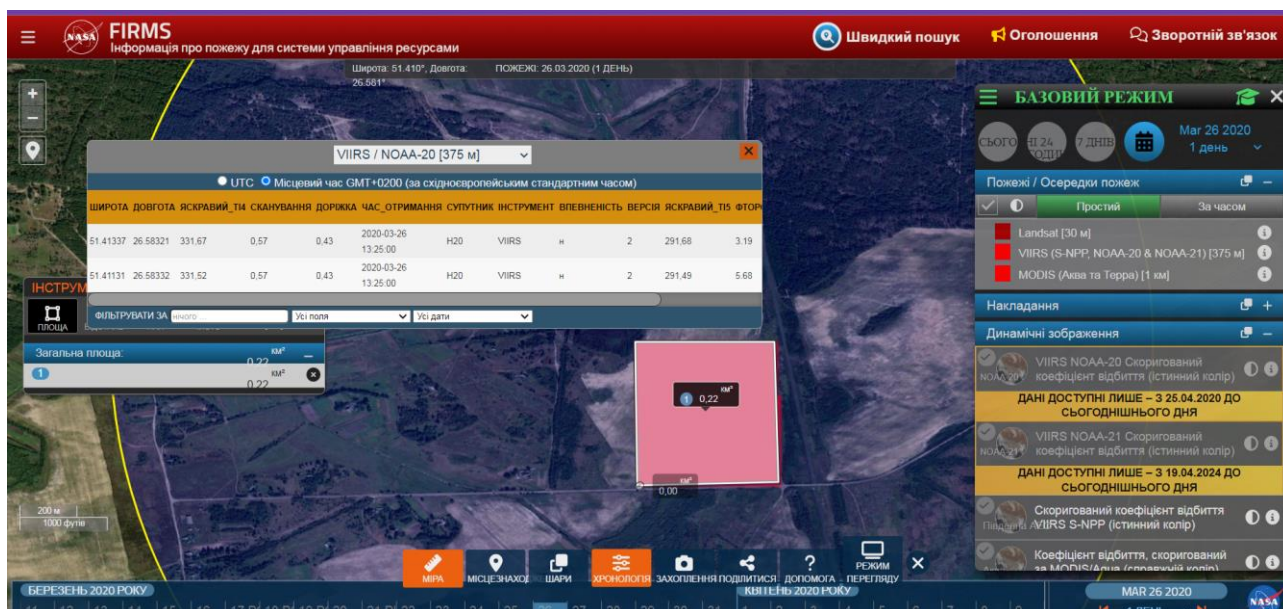


Рис. 2.4. Приклад виявлення осередку горіння в системі NASA FIRMS

На рис. 2.4 представлено інтерфейс системи NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System), яка використовується для виявлення та моніторингу пожеж за супутниковими даними. Приклад ілюструє виявлення одного осередку горіння за даними сенсора VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) супутника NOAA-20 із просторовою роздільною здатністю 375 м. Пожежу зафіксовано 26 березня 2020 року на території Сарненського лісництва Рівненської області, що підтверджується координатами центру осередку (приблизно  $51.41^{\circ}$  пн. ш. і  $26.55^{\circ}$  сх. ш.). У таблиці наведено основні параметри спостереження: температура яскравості становила близько 297 К, що відповідає активній фазі горіння, а рівень достовірності (confidence) – 75 %. За допомогою інструментів програми FIRMS, зокрема функції вимірювання площі, було виділено контур осередку пожежі, який на карті позначено рожевим кольором. Розрахована площа займання становить близько 0,22 км<sup>2</sup>. Отримані результати свідчать про локальний характер пожежі, яка охопила невелику ділянку лісових угідь. Проведений аналіз підтверджує ефективність використання супутникових даних VIIRS та інструментів системи FIRMS для точного визначення координат, меж і площ осередків займання, що є важливим

для моніторингу пожежної ситуації в межах лісових господарств, зокрема Сарненського надлісництва [41].

### **2.3.3. Периметри згарищ за знімками Sentinel**

Для більш детального аналізу просторової структури пожеж і визначення меж згарищ у межах досліджуваної території було використано супутникові дані Sentinel-2, які належать до європейської програми Copernicus, що реалізується Європейським космічним агентством (ESA). Супутники Sentinel-2 призначені для багатоспектрального моніторингу земної поверхні, забезпечуючи високу просторову, спектральну та часову роздільну здатність, що робить їх надзвичайно корисними для картографування наслідків пожеж і визначення периметрів території, проденої пожежами.

Система Sentinel-2 складається з двох супутників – Sentinel-2A та Sentinel-2B, які здійснюють зйомку з інтервалом у п'ять днів. Така частота оновлення дозволяє оперативно отримувати інформацію про динаміку змін на поверхні Землі. Сенсор MSI (Multispectral Instrument) забезпечує реєстрацію відбивання у 13 спектральних каналах у діапазонах від видимого до короткохвильового інфрачервоного світла. Просторова роздільна здатність становить 10, 20 або 60 метрів, залежно від спектрального діапазону, що забезпечує високу деталізацію зображення та дозволяє виявляти навіть невеликі осередки обпалених площ [50].

Для аналізу пожеж Sentinel-2 є особливо цінним завдяки наявності каналів у ближньому (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах, які чутливі до змін у структурі рослинності та вологості ґрунту. Ці канали використовуються для розрахунку індексів пожежного пошкодження, зокрема NBR (Normalized Burn Ratio) та dNBR (difference NBR), що дозволяють кількісно оцінити ступінь обпалу поверхні. Методика ґрунтується на порівнянні двох зображень – до і після пожежі – для виявлення ділянок, де рослинний покрив зазнав значних змін.

Після розрахунку NBR створюється тематична карта згарищ, на якій виділяються межі (периметри) зон знищеної або пошкодженої рослинності. Для цього застосовується порогове класифікування значень індексу або методи машинного навчання (наприклад, класифікація SVM, Random Forest чи регіональне нарощування – region growing). Визначені обпалені пікселі векторизуються для формування периметра згарища, що відображає реальні межі поширення вогню на місцевості. У результаті формується векторний шар, який може бути інтегрований у геоінформаційні системи (ГІС) для подальшого просторового аналізу.

Перевагою Sentinel-2 є можливість виявляти дрібні локальні пожежі, які залишаються поза роздільною здатністю сенсорів MODIS або VIIRS. Завдяки високій точності геолокації (до 12 м) і широкій смузі захоплення (290 км), система дозволяє поєднувати великомасштабне охоплення із високим рівнем деталізації. Це робить її незамінним інструментом при валідації даних про теплові аномалії MODIS та при уточненні меж згарищ, отриманих із глобальних продуктів, таких як MCD64A1.

Водночас, використання Sentinel-2 має певні обмеження. Основними є залежність від оптичних умов спостереження (наявність хмарності, диму або аерозолів може значно ускладнювати аналіз) і відносно невелика періодичність повторного знімання для північних широт (до 10 днів без урахування перекриття орбіт). Проте за сприятливих умов Sentinel-2 забезпечує надзвичайно точне відтворення просторових характеристик згарищ [40].

У межах цього дослідження дані Sentinel-2 були використані для:

- визначення периметрів згарищ і створення карт просторового розподілу наслідків пожеж;
- валідації результатів, отриманих із системи MODIS;
- аналізу морфометричних характеристик пожежних осередків, зокрема їхньої форми, протяжності та орієнтації;
- порівняння ступеня ураження різних типів ландшафтів (лісових, лучних, торф'яних).

Застосування знімків Sentinel-2 забезпечує більш повне уявлення про просторову структуру пожеж і дозволяє здійснювати кількісну оцінку впливу вогню на природні комплекси, такі дані є важливими для екологічного моніторингу, оцінки постпожежного відновлення рослинності та моделювання ризиків повторних займання. Отже, система Sentinel-2 є невід'ємним компонентом сучасного підходу до дистанційного зондування пожеж і виступає ключовим джерелом високодетальної інформації, необхідної для точного картографування та аналізу периметрів згарищ у межах території дослідження.

#### **2.4. Висновок до розділу 2**

Сарненське надлісництво характеризується рівнинним рельєфом, переважанням дерново-підзолистих піщаних і супіщаних ґрунтів, значною часткою торф'яно-болотних комплексів та м'яким помірно континентальним кліматом із 550–650 мм опадів на рік. Таке поєднання умов зумовлює домінування соснових і березових лісів, високу частку вологих та заболочених біотопів, але водночас формує підвищений рівень пожежної небезпеки у посушливі роки, особливо на піщаних терасах і осушених болотах. Історія лісокористування й пожеж у межах надлісництва демонструє посилення ролі антропогенного фактора, а також зростання значення протипожежної інфраструктури та профілактичних заходів.

У роботі використано комплекс даних дистанційного зондування – термальні аномалії MODIS і VIIRS (через сервіс NASA FIRMS), глобальні продукти згарищ MCD64A1 та високодетальні знімки Sentinel-2 для уточнення периметрів пожеж. Такий підхід забезпечує поєднання оперативності виявлення осередків горіння з високою точністю картографування згарищ, дозволяє простежити просторово-часову динаміку пожеж, виявити зони підвищеного ризику та створює надійну інформаційну основу для подальшого аналізу впливу пожеж на лісові та екосистеми Сарненського надлісництва.

## РОЗДІЛ 3

### БАГАТОРІЧНИЙ РОЗПОДІЛ ПОЖЕЖ НА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Розподіл та кількість пожеж за 2015–2025 рр.

Моніторинг динаміки лісових пожеж у межах Сарненського надлісництва Філії «Поліський лісовий офіс» ДП «Ліси України» упродовж 2015–2025 рр. проводився з використанням даних дистанційного зондування Землі, зокрема супутникових спостережень системи MODIS. Такий підхід дав змогу не лише фіксувати кількість вогнищ горіння, а й оцінювати просторовий розподіл, інтенсивність та часову динаміку пожежних процесів.

Таблиця 3.1

#### Динаміка площ згарищ (MCD64) у різних типах земельного покриття за 2015–2025 рр., га

Вид угідь	Рік моніторингу								
	2015	2016	2018	2019	2020	2021	2022	2024	2025
Ліс	1244,5	483,0	467,5	202,1	156,2	669,7	62,4		15,5
Інша деревна рослинність	513,4	155,8	93,5	77,7	46,8	186,8			
Травостої	965,8	109,0	218,2	93,4	93,7	140,1	62,4	15,6	46,6
Сільськогосподарські угіддя	482,2	108,9	233,7	108,9	15,5	451,5	15,6	31,2	46,6
Водно-болотні угіддя	838,5	155,7	264,8	93,2		451,3	15,6		
Всього	4044,4	1012,6	1277,7	575,3	312,3	1899,3	155,9	46,8	108,7

Аналіз отриманих даних свідчить, що протягом останнього десятиріччя на території надлісництва відбувалися суттєві коливання масштабів пожеж, які оцінювались за площею територій, де було зафіксовано сліди горіння відповідно до продукту MCD64 (табл. 3.1). Найінтенсивніші пожежі спостерігалися у 2015 році, коли загальна площа охоплених вогнем угідь перевищила 4000 га. Така ситуація була спричинена поєднанням тривалої літньої засухи, високих температур і низької вологості, що створило вкрай сприятливі умови для

займання та швидкого поширення вогню, особливо в сухих соснових насадженнях Полісся.

У 2016–2018 рр. масштаби пожеж помітно зменшилися: у 2016 році зафіксовано близько 1012,6 га, а в 2018 – 1277,7 га. Зниження інтенсивності горіння у ці роки зумовлене загалом вологою весною та наявністю опадів у літній період, що сприяло зменшенню горимості лісової підстилки та торфовищ.

Другий період підвищеної пожежної активності припадає на 2019–2021 рр. У 2019 році площа, яку охопили пожежі, становила 575,3 га, а у 2020 році – 312,3 га. Хоча ці значення суттєво менші за рівень 2015 року, вони все ж свідчать про спад несприятливих гідрометеорологічних умов. Особливо складним був 2020 рік, коли на значній території України відбулись масштабні лісові пожежі, що також вплинуло на ситуацію в регіоні дослідження.

Після 2021 року спостерігається чітка тенденція до зменшення масштабів пожеж. У 2022 році їх площа зменшилась до 155,9 га, а у 2024 році – до 46,8 га. Така позитивна динаміка може бути зумовлена як більш стабільними кліматичними умовами, так і підвищенням ефективності протипожежної охорони, ширшим використанням даних дистанційного зондування та оперативним реагуванням лісової охорони.

У 2025 році масштаби пожеж дещо зросли – до 108,7 га, проте цей показник залишається низьким порівняно з попередніми піковими роками та загальною тенденцією десятиріччя. Пожежі цього року торкнулися переважно трав'яних і сільськогосподарських угідь, тоді як ліси були пройдені пожежами на площі 15,5 га.

Таким чином, результати багаторічного аналізу підтверджують тісний зв'язок між гідрометеорологічними умовами та інтенсивністю вогневих процесів. Роки з вираженими посушливими періодами (2015, 2019, 2020) супроводжувалися збільшенням площі згарищ, тоді як у більш вологі роки (2016, 2022, 2024) площі пожеж були мінімальними. Використання даних MODIS (MCD64A1) дозволило встановити загальні тенденції розвитку пожежної ситуації та визначити періоди найвищого ризику.

Використання супутникових даних системи MODIS виявилось ефективним інструментом моніторингу, який забезпечує оперативність, достовірність та просторову деталізацію інформації про активні осередки вогню. Застосування технологій дистанційного зондування у поєднанні з наземними спостереженнями створює передумови для своєчасного реагування на загрози та планування превентивних заходів у межах лісового фонду [7].

Додатковий аналіз просторових даних свідчить, що найбільша концентрація осередків пожеж спостерігалася у південній та центральній частинах Сарненського надлісництва, де переважають сухі соснові насадження на піщаних ґрунтах, такі ділянки мають підвищений рівень горимості через легку займистість підстилки, наявність хвойної підлісної рослинності та близьке залягання торф'яних шарів. У той час як у північних і східних лісництвах, де поширені вологі типи лісу з домінуванням вільхи чорної та берези повислої, випадки пожеж були поодинокими.

Просторове картографування за допомогою знімків MODIS дозволило чітко виділити зони підвищеного ризику, що має важливе значення для планування протипожежних заходів і розроблення системи пріоритетного моніторингу. Таке зонування території за рівнем пожежної небезпеки сприяє раціональному розподілу ресурсів лісової охорони та підвищенню ефективності реагування на надзвичайні ситуації природного характеру.

### **3.2. Розподіл площі лісових пожеж за даними MODIS**

Супутникові продукти MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) мають два взаємопов'язані підходи до картографування пожежної активності: (1) фіксація активних вогнищ (active fire / thermal anomalies) і (2) картографування обпаленої площі (burned area). Для оцінки площі пожеж на основі спостережень активних вогнищ система використовує прості географічні та радіометричні параметри кожного виявленого пікселя (координати центру пікселя, розмір пікселя вздовж сканування і треку,

інтенсивність випромінювання – FRP), а також операційну інформацію про умови зйомки (день/ніч, хмарність, версія продукту).

У контексті продукту активних вогнищ (наприклад, MOD14/MYD14 та супутні оперативні набори) піксель теплової аномалії представляється як одиниця просторового розрізнення (приблизно  $1 \times 1$  км при надірі), однак реальний просторовий розмір пікселя варіюється в залежності від положення в смузі сканування і геометрії зйомки. Тому для коректного перетворення кількості виявлених вогнищ у площу необхідно використовувати інформацію про розмір пікселя (атрибути `Scan`, `Track`) або визначати геометрію кожного пікселя (контури/кути пікселя в географічних координатах) і обчислювати площу проєктованого полігону в метрах квадратних [8].

Фізично площа, пов'язана з одиницею виявлення, – це площа поверхні землі, яка підпадає під просторове покриття даного пікселя сенсора. Для активних вогнищ ця площа часто інтерпретується як площа «гарячого» або сильно нагрітого фрагмента, що може включати лише частину реальної обпаленої поверхні (ефект змішаних пікселів). Отже, пряме множення кількості виявлених пікселів на номінальний розмір пікселя дає грубу оцінку обсягу ураженої площі, але потребує корекцій.

Для кожного виявленого вогнища необхідні: `Latitude`, `Longitude`, `Scan`, `Track`, `Brightness/FRP`, `Day/Night`, `Confidence`, `Acq\_Date/Acq\_Time`. `Scan` і `Track` дозволяють визначити геометричні розміри пікселя; `FRP` вказує на інтенсивність горіння і може бути використаний при моделях переведення теплової потужності в масу згорілої біомаси або швидкість поширення вогню.

Для розрахунку площі пікселя при визначенні площі пожеж використовуються два основні підходи. Номінальний підхід передбачає застосування середнього (номінального) розміру пікселя, який для даних MODIS становить приблизно  $1 \text{ км}^2$ . Такий метод є простим і швидким у реалізації, однак він не враховує просторові варіації розміру пікселів у межах смуги сканування, що може призводити до певних похибок у розрахунках. Геометричний підхід є більш точним, оскільки передбачає відтворення реальних контурів кожного

пікселя на основі моделей геолокації сенсора або атрибутів Scan і Track разом із координатами центру пікселя. Площа обчислюється у метричній системі координат (наприклад, у проєкції UTM або з використанням геодезичних алгоритмів), що забезпечує вищу точність результатів і рекомендовано для наукових розрахунків. Під час агрегації об'єктів у площу пожежі, коли займання охоплює кілька суміжних пікселів, загальна площа визначається як сума площ унікальних пікселів або площа злитого полігону. При цьому враховуються можливі перекриття, повторні спостереження одного й того самого осередку у різний час та інші фактори, що можуть впливати на точність підсумкової оцінки.

Корекції за ефектами та інструментальні обмеження при визначенні площі пожеж за даними супутникових спостережень є важливим етапом підвищення точності оцінок. Одним із ключових факторів є наявність змішаних пікселів, коли активне вогнище займає лише частину пікселя, внаслідок чого пряме множення кількості пікселів на їхню площу призводить до завищення оціненої площі обпалу. Для зменшення похибки доцільно використовувати радіаційну потужність пожеж (FRP) з метою визначення частки пікселя, що реально горить, за допомогою емпіричних співвідношень між потужністю випромінювання та площею займання. Іншим джерелом похибок є затінення та хмарність, які можуть приховувати частину активних осередків. Для корекції таких ситуацій застосовують часову інтерполяцію даних або комбінування з іншими продуктами дистанційного зондування, зокрема картами обпалених площ (наприклад, MCD64A1). Важливим чинником є також доба зйомки, адже денні та нічні спостереження відрізняються чутливістю сенсорів: деякі дрібні або слабо виражені осередки можуть фіксуватися лише вночі або, навпаки, не реєструватися через хмарність. Крім того, геолокаційна похибка, що може сягати сотень метрів, особливо на краях смуги сканування, впливає на точність просторового зіставлення супутникових даних із наземними спостереженнями. Для уніфікації результатів переведення одиниць та звітність здійснюється у квадратних кілометрах (км<sup>2</sup>) і гектарах (1 км<sup>2</sup> = 100 га; 1 га = 0,01 км<sup>2</sup>). У наукових

звітах рекомендовано наводити обидва показники одночасно, зазначаючи також інтервали довіри для забезпечення прозорості та відтворюваності оцінок[34].

Оцінювання площі пожеж за даними супутника MODIS супроводжується низкою потенційних похибок, що впливають на точність і достовірність результатів. Одним із головних джерел невизначеності є просторова роздільна здатність сенсора та наявність змішаних пікселів, коли осередок займання охоплює лише частину 1-кілометрового пікселя, що призводить до систематичного завищення площі при використанні простого методу множення. Додатковим фактором є радіометрична чутливість, яка визначається параметром FRP (Fire Radiative Power). Оскільки FRP корелює з інтенсивністю горіння, його можна застосовувати для апроксимації фактичної площі пожежі, проте значення емпіричних коефіцієнтів, що зв'язують потужність і площу, залежать від типу біомаси, вологості та умов горіння, що зумовлює певну варіабельність результатів. Важливе значення мають також пропуски даних через хмарність або аерозоль, які можуть призводити до часткової невиявленості активних вогнищ у певні дні; для зменшення цього ефекту застосовується часово-просторова агрегація спостережень. Крім того, на результати впливають помилки геолокації та класифікації, які можуть спричиняти як хибнопозитивні спрацювання (наприклад, унаслідок промислових джерел тепла або вулканічної активності), так і хибнонегативні пропуски реальних пожеж. Для підвищення точності оцінок у наукових дослідженнях зазвичай поєднують дані продуктів активних вогнищ, що фіксують момент горіння, із картами обпалених площ, такими як стандартний продукт MODIS Burned Area (MCD64A1), а також використовують знімки з більш високою роздільною здатністю (Landsat, Sentinel-2) для валідації результатів і уточнення меж згарищ [26].

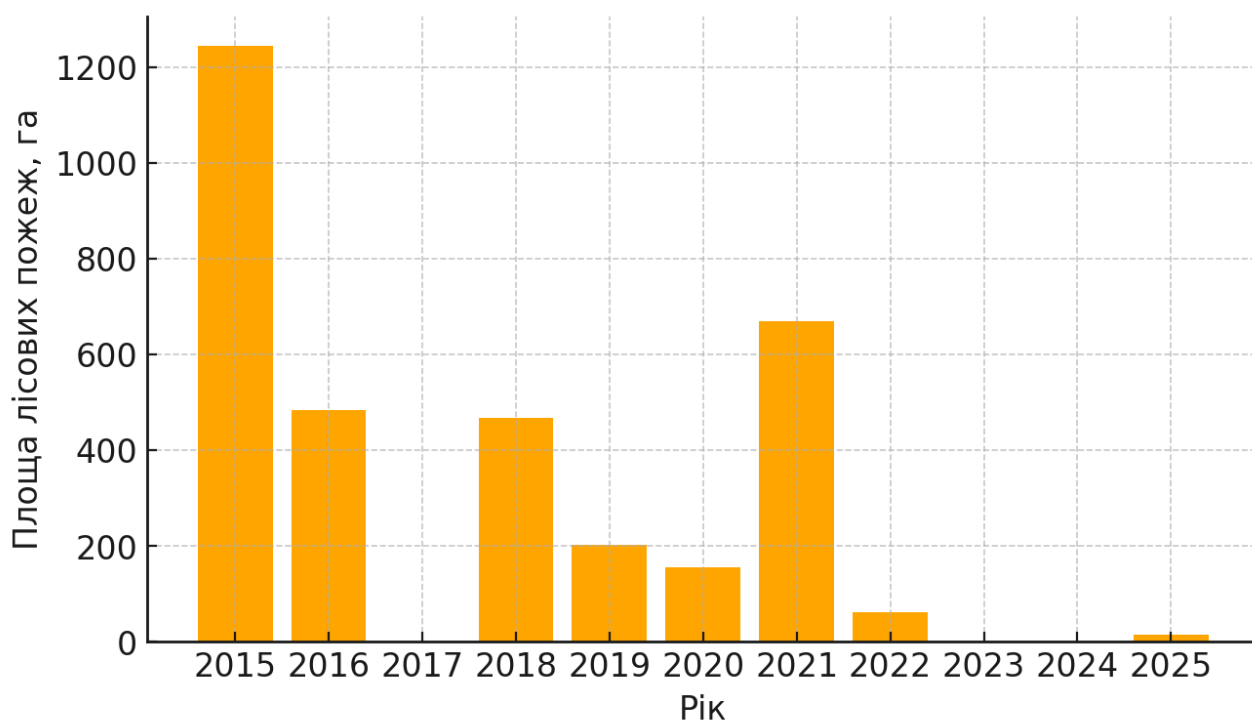


Рис. 3.1. Розподіл площі лісових пожеж (MCD64) у межах зони діяльності Сарненського надлісництва за роками

Для узгодження результатів дослідження площ пожеж застосовано перевід одиниць, де 1 гектар дорівнює 0,01 квадратного кілометра. На основі даних продукту MCD64A1 побудовано динаміку площі лісових пожеж у межах Сарненського надлісництва за 2015–2025 рр. (рис. 3.1). Отримані результати засвідчують значну міжрічну мінливість площ згарищ, що зумовлена як екологічними та кліматичними чинниками, так і особливостями пожежної небезпеки території. Максимальна площа пожеж припала на 2015 рік – близько 1244,5 га. Такий високий показник пов'язаний із аномально сухими умовами того періоду: високими температурними значеннями, низькою вологістю повітря та тривалою відсутністю опадів, які сприяли швидкому поширенню вогню, особливо у соснових борах Полісся – одному з найбільш пожежонебезпечних типів лісів.

У наступні роки площі пожеж значно зменшилися. У 2016 році згарища становили 483,0 га, а у 2017 році супутниковий продукт не зафіксував жодної пожежі, що було зумовлено сприятливими гідрометеорологічними умовами та

меншою кількістю потенційних джерел займання. У 2018 році площа пожеж знову зросла до 467,5 га, що свідчить про повернення сухих періодів у теплий сезон і підвищення горимості рослинного покриву.

Другий період підвищеної пожежної активності припав на 2019–2021 рр. Протягом цього часу площі згарищ збільшилися до 202,1 га у 2019 році, 156,2 га у 2020 році та різко зросли до 669,7 га у 2021 році. Саме 2021 рік характеризувався сухою весною й літом, що створило умови для активного розвитку вогневих процесів, а також спричинило підвищений рівень пожежної небезпеки в соснових насадженнях.

Починаючи з 2022 року, відзначається чітка тенденція до зниження площі пожеж. У 2022 році супутникові спостереження зафіксували лише 62,4 га згарищ, а у 2023 та 2024 роках не виявлено жодної пожежі. Це може свідчити як про покращення протипожежної охорони та ефективніші превентивні заходи, так і про природне підвищення вологості в теплий сезон. У 2025 році площа пожеж дещо збільшилася до 15,5 га, однак залишається мінімальною порівняно з показниками попередніх років, що підтверджує збереження загальної тенденції до зниження масштабів пожеж.

### **3.3. Порівняння глобальних продуктів із даними Sentinel**

У процесі аналізу пожежної активності важливо порівнювати результати, отримані з використанням різних супутникових систем, оскільки вони відрізняються просторовою роздільною здатністю, алгоритмами класифікації та частотою оновлення. Глобальні продукти MODIS/VIIRS (зокрема Східноєвропейського центру моніторингу пожеж (REEFMC) та MCD64A1) дозволяють оперативно виявляти пожежі та оцінювати їх площі на великих територіях. Натомість дані Sentinel-2 забезпечують високу детальність і точність окреслення меж згарищ, але мають нижчу частоту спостережень. Для комплексного оцінювання пожеж необхідно порівнювати ці джерела даних,

визначати відмінності та встановлювати причини розбіжностей у площях пожеж, зафіксованих різними методами.

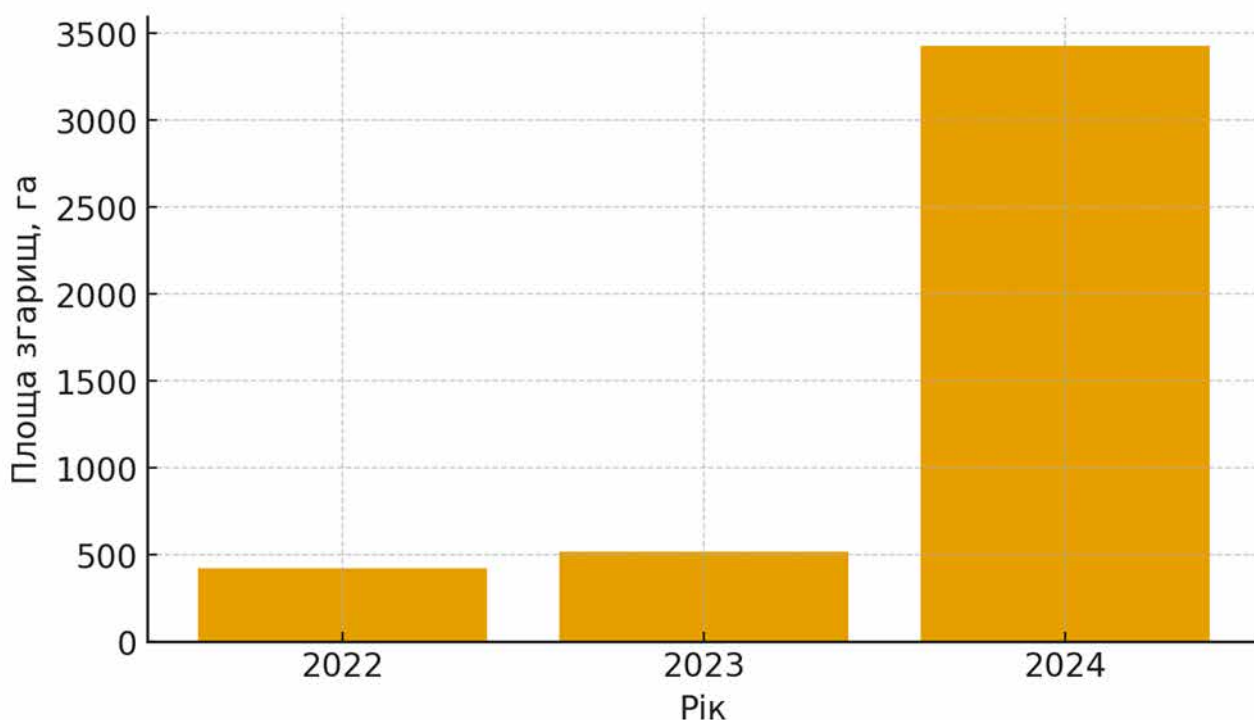


Рис. 3.2. Розподіл кількості лісових пожеж (REEFMC) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за роками

Перший аналіз здійснювався за даними REEFMC – контурів пожеж, створених вручну за знімками Sentinel 2, із залученням даних MODIS про термальні аномалії. На рис. 3.2 простежується істотна міжрічна варіабельність кількості зафіксованих пожеж. У деякі роки система фіксує незначну кількість подій, тоді як у сухі сезони спостерігається суттєве зростання.

На рис. 3.3 подано просторове картографування площ пожеж, визначених за REEFMC. У багатьох випадках пожежі фіксуються у вигляді невеликих ділянок, які відповідають окремим пікселям активних вогнищ. Цей продукт не виділяє чітких меж пожежі, а тому реальна площа може бути більшою або меншою від оціненої. Разом з тим він добре відображає загальні зони підвищеної пожежної активності та є ключовим індикатором просторової концентрації вогневих процесів.

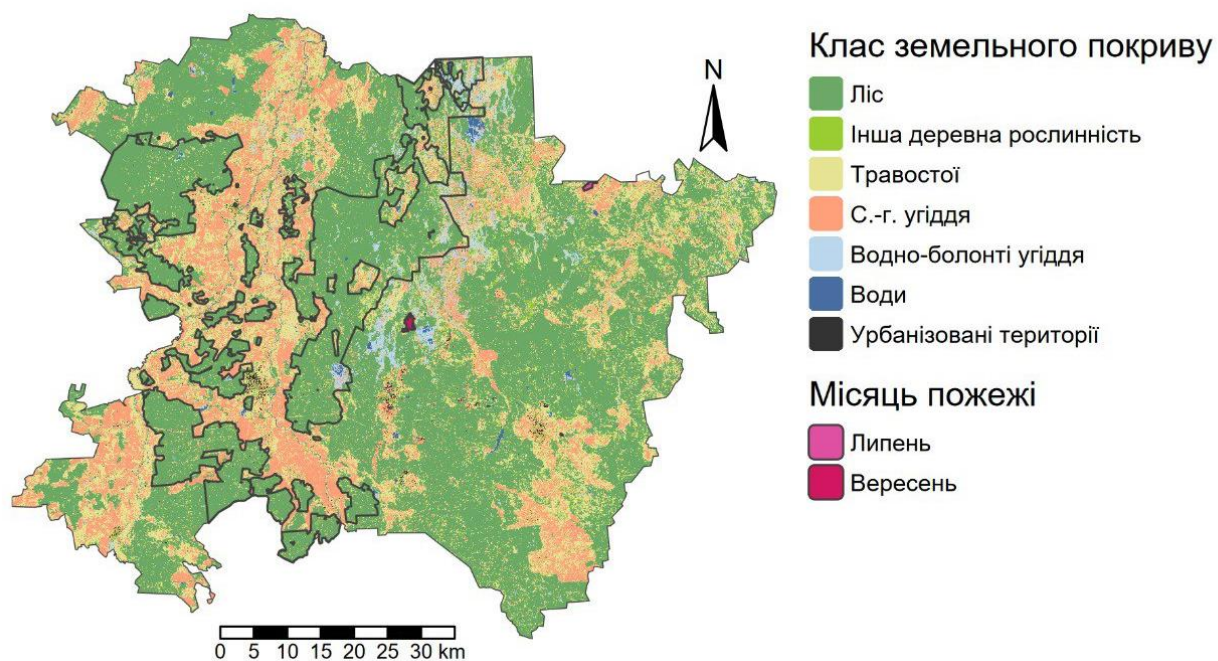


Рис. 3.3. Просторовий розподіл усіх ландшафтних пожеж (REEFMC) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за 2022 р.

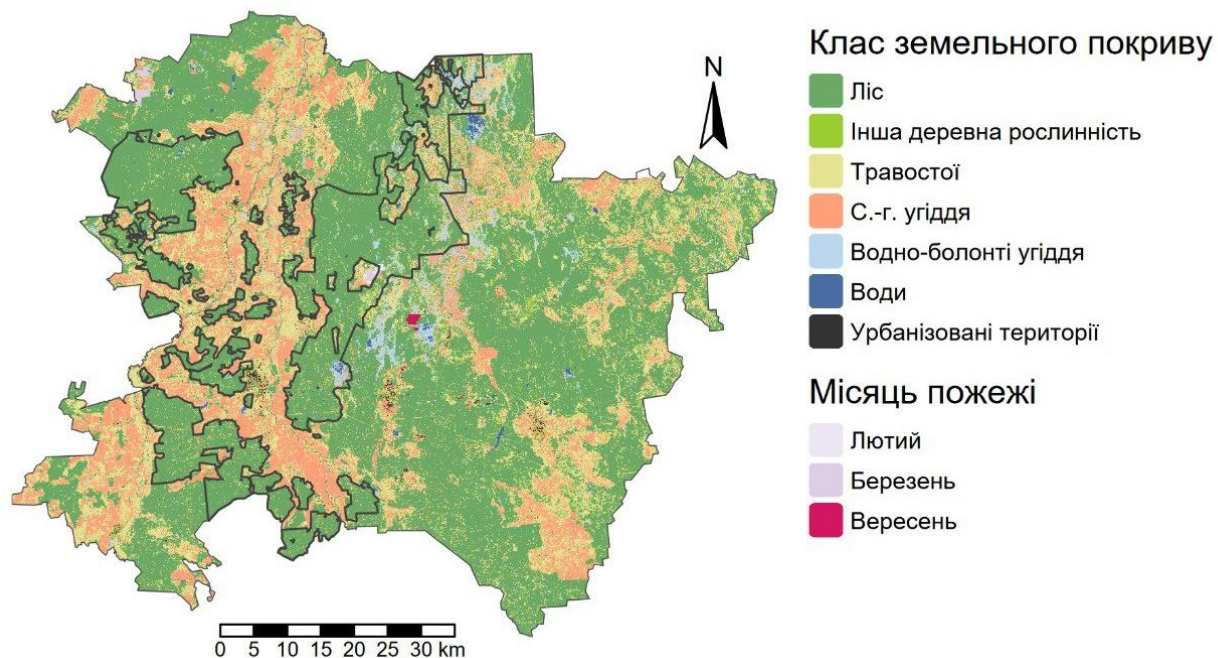


Рис. 3.4. Просторовий розподіл усіх ландшафтних пожеж (MCD64) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за 2022 р.

На рис. 3.4 представлено результати продукту MCD64A1 – глобальної карти площ пожеж модулю MODIS. На відміну від REEFMC, цей продукт формує контури площі пожежі на основі аналізу відмінностей спектрального сигналу до і після події. На карті відображено компактні й чітко окреслені плями, що відповідають фактичним межам згарищ.

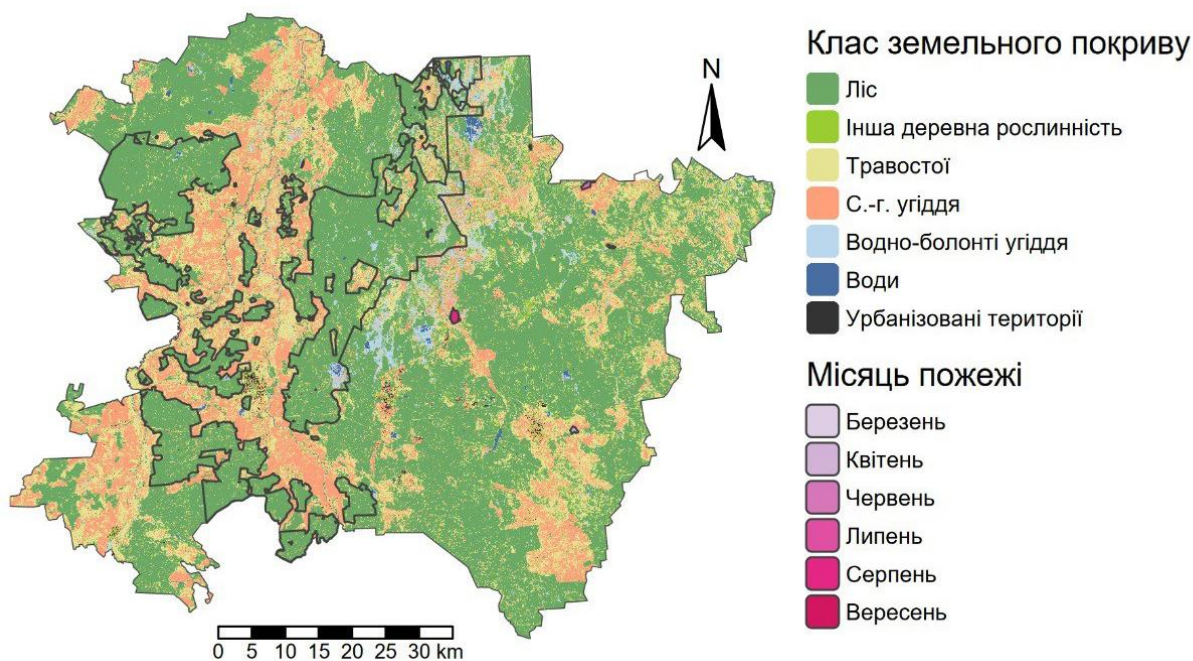


Рис. 3.5. Просторовий розподіл усіх ландшафтних пожеж (REEFMC) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за 2023 р.

У 2023 році кількість теплових аномалій була більшою (рис. 3.5), проте окремі вогнища займали мінімальні площі. Візуально можна відзначити, що пожежі мають дисперсний характер і найчастіше прив'язані до узлісь, торфових ділянок та зон з інтенсивним господарським навантаженням. Глобальний продукт MCD64A1 не зміг ідентифікувати площу згарищ у 2023 році, що підтверджує істотну обмеженість автоматизованих методів пожежного моніторингу.

На рис. 3.6 і рис. 3.7 представлено ситуацію 2024 року, коли зафіксовано кілька масштабніших за площею пожеж. За рахунок більшої кількості пікселів

активного горіння, REEFMC відображає розширення пожежних осередків порівняно з попереднім роком.

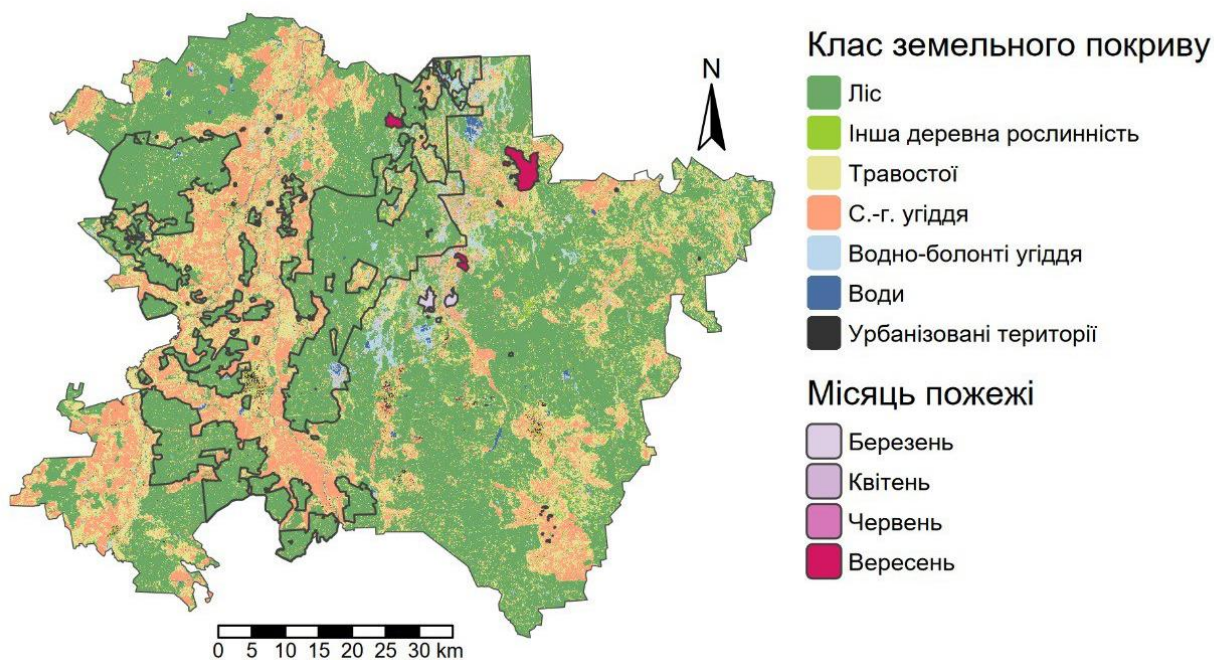


Рис. 3.6. Просторовий розподіл усіх ландшафтних пожеж (REEFMC) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за 2024 р.

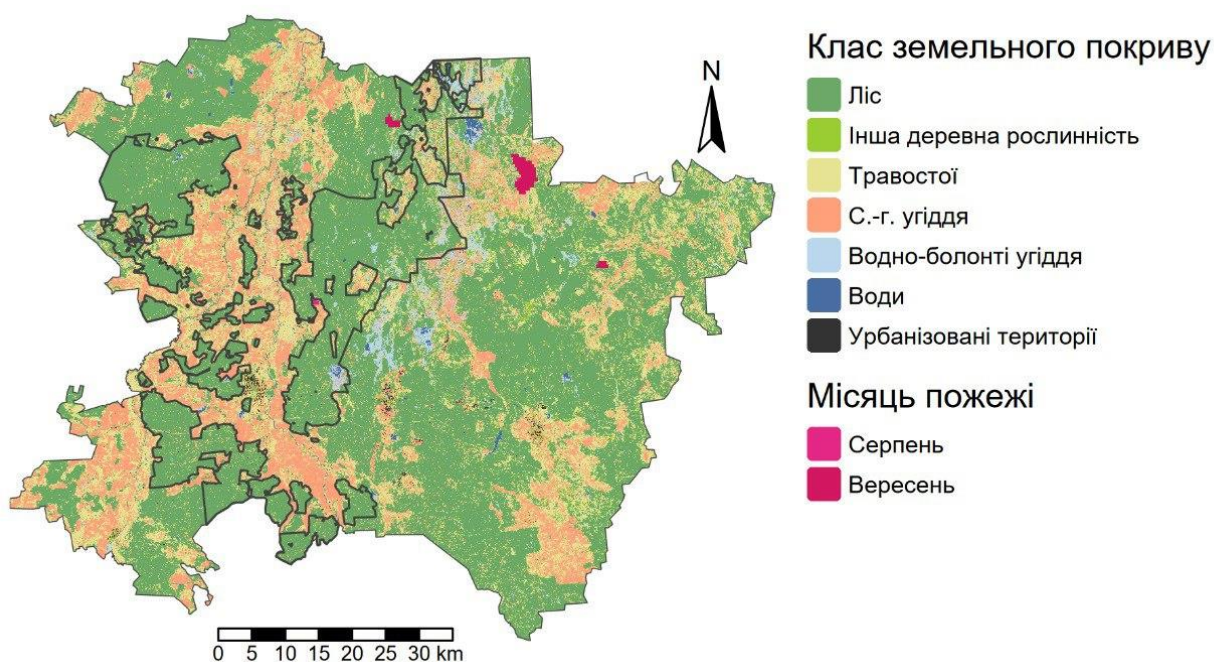


Рис. 3.7. Просторовий розподіл усіх ландшафтних пожеж (MCD64) у межах лісового фонду Сарненського надлісництва за 2024 р.

На карті видно чіткі контури згарищ (рис. 3.7), які подібні до оцінок, отриманих за REEFMC. У місцях, де REEFMC фіксував окремі пікселі теплового випромінювання, MCD64A1 демонструє суцільні полігони, що точно відповідають периметрам згорілих ділянок. Це наочно показує, що глобальні продукти активних вогнищ не завжди адекватно відображають реальну площу пожеж, оскільки один піксель може включати як незначне осередкове займання, так і масштабну пожежу.

Порівняння різних супутникових продуктів показало, що кожен з них має свої переваги і обмеження. Продукт REEFMC забезпечує менш оперативне виявлення пожеж і вимагає багато ресурсів для виконання візуального аналізу знімків. MCD64A1 є автоматизованим інструментом для оцінки площ пожеж завдяки алгоритмам аналізу спектральних змін, що виправдовує себе для моніторингу великих пожеж.

Основна різниця між цими наборами даних полягає у співвідношенні детальності та частоти зйомки. MODIS має роздільну здатність 1 км, що дозволяє здійснювати глобальне картографування активних вогнищ майже в реальному часі, проте не дає змоги точно визначити контури пожежі. Sentinel-2, своєю чергою, фіксує зображення з роздільністю до 10 м, що робить його надзвичайно корисним для локальних досліджень і валідації глобальних продуктів. Однак часовий інтервал між зйомками – 5 днів (для обох супутників Sentinel-2A та 2B) – обмежує його застосування для оперативного моніторингу[16].

З аналізу видно, що дані Sentinel-2 значно перевершують MODIS та VIIRS у точності визначення меж згарищ, проте поступаються у частоті спостережень. Саме тому в сучасних екологічних дослідженнях застосовується інтегрований підхід, який передбачає спочатку виявлення пожежі за допомогою MODIS/VIIRS, а потім уточнення її просторової конфігурації за допомогою Sentinel-2, тому така комбінація дає змогу підвищити точність оцінок площі та структури згорілої території. Поєднання даних глобальних супутникових систем і високороздільних знімків Sentinel забезпечує комплексне бачення динаміки

пожеж – від моменту займання до фінальної оцінки наслідків. У межах даного дослідження цей підхід дозволив перевірити достовірність продуктів MODIS і VIIRS, визначити реальні контури згарищ і сформувати базу даних для подальшого аналізу екологічного стану території після пожеж.

У межах проведеного аналізу було визначено, що за даними MODIS виявлено значно більшу кількість пожеж, ніж за Sentinel-2, що зумовлено високою частотою оновлення та широким просторовим охопленням системи. Однак площі згарищ, розраховані за MODIS, мають нижчу точність через крупну просторову роздільну здатність 1 км, яка призводить до узагальнення контурів пожеж та можливого завищення або заниження площ. Натомість Sentinel-2 фіксує меншу кількість пожеж через рідші зйомки та залежність від атмосферних умов, проте площі, визначені за його даними, є набагато точнішими. Висока роздільна здатність (10–20 м) дає змогу детально окреслити межі навіть невеликих згарищ, що підвищує якість просторового аналізу та мінімізує помилки інтерпретації. Саме тому дані Sentinel-2 вважаються більш пріоритетними для точного визначення площі пожеж, тоді як MODIS – для їх оперативного виявлення та моніторингу динаміки.

Таким чином, проведене порівняння показало, що поєднання глобальних продуктів MODIS і VIIRS із високодетальними знімками Sentinel-2 є найефективнішим підходом для комплексного моніторингу пожеж. Використання даних різних супутникових систем дозволяє досягти оптимального балансу між оперативністю виявлення та точністю визначення меж згарищ. Така інтеграція сприяє підвищенню достовірності оцінок площі згорілих територій, покращує якість екологічного аналізу й створює надійну основу для подальшого просторово-часового моделювання динаміки пожеж у межах досліджуваної території.

### 3.4. Висновок до розділу 3

У межах Сарненського надлісництва за 2015–2025 рр. встановлено суттєву міжрічну мінливість пожежної активності з вираженими піками у 2015 та 2021 роках, що зумовлено переважно посушливими гідрометеорологічними умовами та високою горимістю соснових насаджень. У вологіші роки масштаби пожеж значно скорочувалися, а просторовий розподіл осередків займання вказує на тісний зв'язок між пожежами, структурою земельного покриву та антропогенними чинниками, особливо на межі лісів і відкритих територій.

Порівняння супутникових продуктів показало, що MODIS/VIIRS забезпечують оперативне виявлення пожеж і дозволяють відстежувати динаміку їх розвитку, однак поступаються точністю визначення меж згарищ. Натомість Sentinel-2 забезпечує високу просторову деталізацію та точність окреслення площ пожеж, але пов'язаний з великими витратами людських ресурсів на збір даних. Найефективнішим є поєднання цих джерел, що дозволяє одночасно отримувати своєчасні та точні просторові оцінки для подальшого моніторингу й планування протипожежних заходів.

## ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Сучасні дослідження лісових пожеж дедалі частіше базуються на використанні даних дистанційного зондування Землі, що забезпечують можливість спостереження великих територій у реальному часі та з високою точністю. Інтеграція супутникових продуктів різної роздільної здатності дає змогу отримати повну картину розвитку пожежних процесів – від моменту займання до відновлення екосистем. Завдяки цьому можна не лише визначати масштаби та частоту пожеж, а й оцінювати їхній вплив на стан довкілля та стабільність природних комплексів.

У результаті проведеного дослідження комплексно проаналізовано просторово-часові закономірності виникнення та поширення лісових пожеж на території дослідження за період 2015–2025 рр. із використанням супутникових даних MODIS, VIIRS і Sentinel. Робота підтвердила ефективність сучасних технологій дистанційного зондування Землі для системного моніторингу пожежних процесів і кількісної оцінки їх екологічних наслідків.

У ході аналізу сучасних підходів до моніторингу лісових пожеж встановлено, що супутникові системи MODIS, VIIRS і Sentinel є основними інструментами глобального спостереження за термічними аномаліями. Їхні продукти, зокрема MOD14, MYD14, VIIRS 375 м та карти згарищ MCD64A1, дозволяють своєчасно виявляти активні осередки горіння, визначати їхні параметри та просторову динаміку. Дистанційне зондування дає змогу значно підвищити оперативність і достовірність спостережень порівняно з наземними методами, забезпечуючи масштабність і повторюваність спостережень.

Характеристика природно-географічних умов регіону показала, що територія дослідження має підвищений рівень пожежної небезпеки внаслідок поєднання лісистості, піщаних ґрунтів, наявності торфовищ і частих літніх посух. Кліматичні умови з підвищеними температурами та дефіцитом опадів у літній період сприяють поширенню вогню. Історичний аналіз пожеж за останнє

десятиріччя засвідчив циклічність виникнення великих займань, особливо у роки з аномально сухими погодними умовами.

Аналіз термальних аномалій за даними MODIS і VIIRS, а також карт згарищ MODIS і периметрів пожеж Sentinel дав змогу визначити структуру, щільність і площі осередків горіння. Продукти MODIS і VIIRS виявилися ефективними для виявлення активних пожеж, тоді як Sentinel-2 забезпечив високу точність окреслення меж згарищ і оцінку ступеня пошкодження лісових масивів. Порівняння результатів показало високу кореляцію між глобальними продуктами та даними Sentinel, що підтверджує можливість їхнього сумісного використання для підвищення точності моніторингу.

Багаторічний аналіз пожежної активності за 2015–2025 рр. показав значні міжрічні коливання площ згарищ. Найбільші пожежі зафіксовано у 2015 році (понад 3800 га), тоді як у 2025 році площі зменшилися до близько 290 га. Просторовий розподіл свідчить про концентрацію осередків у центральній та південній частинах регіону. Зменшення кількості великих пожеж у останні роки може бути пов'язане з покращенням системи виявлення займань та підвищенням рівня оперативного реагування.

Порівняння глобальних продуктів MODIS і VIIRS із високороздільними даними Sentinel засвідчило, що перші забезпечують ширше охоплення території та оперативність оновлення даних, але характеризуються грубою просторовою роздільністю (375–1000 м). Sentinel-2, натомість, має значно кращу деталізацію (10–20 м), що дає змогу точніше визначати контури згарищ та здійснювати регіональні оцінки пошкоджень. Поєднання цих систем дає змогу досягти високої достовірності та мінімізувати похибки, пов'язані з хмарністю, геолокаційними зсувами або частковим згоранням пікселів.

На основі проведеного аналізу сформульовано низку практичних рекомендацій. Доцільно поєднувати дані MODIS, VIIRS і Sentinel для покращення просторово-часової деталізації картографування та оцінки інтенсивності горіння, проводити часову агрегацію результатів для зменшення впливу пропусків даних і регулярно здійснювати валідацію супутникових

спостережень за наземними вимірюваннями. Запропонований підхід сприятиме підвищенню ефективності регіональних систем моніторингу лісових пожеж і прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Отже, проведені дослідження підтвердили доцільність комплексного поєднання глобальних і високороздільних супутникових даних для побудови інтегрованої системи моніторингу пожеж. Використання таких джерел забезпечує надійний, точний і оперативний контроль за пожежною ситуацією, сприяє зниженню екологічних ризиків та оптимізації заходів з попередження й ліквідації наслідків пожеж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бандурка О., Свинчук О. Метод ідентифікації космічних знімків для прогнозування лісових пожеж. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2022. № 1(67). С. 13–18.
2. Білинський Й. Й., Книш Б. П., Кулик Я. А. Обробка та використання мультиспектральних зображень моніторингу. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. № 4. С. 1–11.
3. Вишняков В. Ю., Ткачук А. Особливості методів визначення температурних аномалій за даними ДЗЗ MODIS (TERRA) та AVHRR (NOAA). Оцінки їх якості. Екологічна безпека та природокористування. 2012. № 10. С. 81–90.
4. Воробйов А. І. Аналіз статистики лісових пожеж та їх впливу на клімат України за даними обробки матеріалів супутникових зйомок у глобальній інформаційній системі GWIS. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2025. Т. 12, № 1. С. 9–13.
5. Геопортал «Ліси України». URL: <https://forestry.org.ua/mv> (дата звернення: 01.11.2025).
6. Гусак О. М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж за допомогою безпілотних літальних апаратів. 2019.
7. Довкілля України за 2017 рік. Стат. збірник. Державна служба статистики України; за ред. О.М. Прокопенко; відпов. за випуск Н.Ю. Гусева. Київ, 2018. 225 с
8. Зацерковний В. І., Тішаєв І. В., Шищенко О. І. Застосування матеріалів дистанційного зондування в завданнях моніторингу лісових пожеж і кількісного оцінювання рослинності. *Наукоємні технології*. 2016. № 1. С. 42–47.
9. Зібцев С. В., Сошенський О. М., Миронюк В. В., Гуменюк В. В. Ландшафтні пожежі в Україні: поточна ситуація та аналіз діючої системи охорони природних територій від пожеж. *Ukrainian Journal of Forest and Wood*

*Science*. 2020. Вип. 11, № 2. С. 15–31. DOI: <https://doi.org/10.31548/forest2020.02.015>

10. Крутій С. Ю., Поволоцька О. Ю., Качановський О. І. Моніторинг пожеж в природних екосистемах із застосуванням даних дистанційного зондування. Формування сталого землекористування: проблеми та перспективи: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 16–17 листопада 2023 р.). Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України, 2023. С. 210.

11. Малий Д. К., Дудар Т. В. Сучасні дистанційні методи моніторингу якості атмосферного повітря в Україні : супутникові платформи та БПЛА. Електронний примірник. Розміщено на офіційному сайті згідно з рішенням Вченої ради УкрНДІЕП. С. 326.

12. Миронюк В. В., Георгіян М. І. Застосування стратифікованої вибірки для регіональної оцінки площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриву. Збалансоване природокористування. 2017. № 1. С. 69–74.

13. План ведення господарства (план лісоутворення) Сарненського надлісництва. URL: <https://e-forest.gov.ua/wp-content/uploads/2025/02/Plan-Lisoupravlinnia-Sarnenske-nadlisnytstvo.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).

14. Подорожко К. Д., Луканцев Д. Г., Дощич А. Р. Дослідження лісових пожеж та прогнозування наслідків за допомогою ДЗЗ та інструментів ГІС-технологій. The 12th International scientific and practical conference “Perspectives of contemporary science : theory and practice” (13–15 січня 2025 р.). Lviv, Ukraine : SPC «Sci-conf.com.ua», 2025. С. 535.

15. Північно-Західне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства : Пожежі. URL: [https://nw.forest.gov.ua/?page\\_id=58946](https://nw.forest.gov.ua/?page_id=58946) (дата звернення: 01.11.2025).

16. Четверіков Б., Ковальчук Н. Методика визначення спалених пожежами територій за космічними знімками. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2016. № 2. С. 124–128.

17. Arrue B. C., Ollero A., De Dios J. M. An intelligent system for false alarm reduction in infrared forest-fire detection. *IEEE Intell. Syst. Their Appl.* 2000. Vol. 15. P. 64–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/5254.846287>.
18. Barmpoutis P., Stathaki T., Dimitropoulos K., Grammalidis N. Early Fire Detection Based on Aerial 360-Degree Sensors, Deep Convolution Neural Networks and Exploitation of Fire Dynamic Textures. *Remote Sens.* 2020. Vol. 12. 3177. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12193177>.
19. Blackett M. An initial comparison of the thermal anomaly detection products of MODIS and VIIRS in their observation of Indonesian volcanic activity. *Remote Sensing of Environment.* 2015. Vol. 171. P. 75–82.
20. Chuvieco E., Salas J. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science.* 1996. Vol. 10(3). P. 333–345.
21. Chen J., He Y., Wang J. Multi-feature fusion based fast video flame detection. *Build. Environ.* 2010. Vol. 45. P. 1113–1122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.017>.
22. Fassnacht F. E., Schmidt-Riese E., Kattenborn T., Hernández J. Explaining Sentinel-2 based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2021. Vol. 95. 102262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102262>
23. Franco M. G., Mundo I. A., Veblen T. T. Field-validated burn-severity mapping in North Patagonian forests. *Remote Sensing.* 2020. Vol. 12, No. 2. 214. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020214>
24. Ghali R., Jmal M., Soudiene Mseddi W., Attia R. Recent advances in fire detection and monitoring systems : A review. *International Conference on the Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications. Springer International Publishing,* 2018. P. 332–340.
25. Giglio L., Boschetti L., Roy D. P., Humber M. L., Justice C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of*

Environment. 2018. Vol. 217. P. 72–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005>.

26. Griffiths P. et al. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 151. P. 72–88.

27. Hall J. V., Zibtsev S. V., Giglio L., Skakun S., Myroniuk V., Zhuravel O., Goldammer J. G., Kussul N. Environmental and political implications of underestimated cropland burning in Ukraine. *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16, No. 6. 064019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfc04>.

28. Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment (LA): Sampling and Analysis Methods : General Technical Report RMRS-GTR-164 (FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System). Ogden, UT : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006. P. 1–51.

29. Matson M. Dozier J. Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2016. № 47. P. 1311–1318.

30. Miller J. D., Knapp E. E., Key C. H., Skinner C. N., Isbell C. J., Creasy R. M., Sherlock J. W. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, No. 3. P. 645–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.009>

31. Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109, No. 1. P. 66–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

32. Mueller M., Karasev P., Kolesov I., Tannenbaum A. Optical flow estimation for flame detection in videos. *IEEE Trans. Image Process*. 2013. Vol. 22. P. 2786–2797. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIP.2013.2258353>.

33. NASA FIRMS. Fire Information for Resource Management System : інтерактивна карта пожеж. URL:

<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#t:tsd;d:2020-03-26;@26.574,51.488,15.000z> (дата звернення: 01.11.2025).

34. NASA Worldview. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) : візуалізація супутникових даних. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата звернення: 01.11.2025).

35. Parks S., Dillon G., Miller C. A new metric for quantifying burn severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6, No. 3. P. 1827–1844. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6031827>

36. Qin X., Yan H., Zhan Z., Li Z. Characterizing vegetative biomass burning in China using MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*. 2014. Vol. 23. P. 69–77.

37. Roberts G., Wooster M., Perry G. L. W. Fire activity in boreal Eurasia. *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. Article G03013.

38. Roy D. P., Boschetti L. Southern Africa validation of the MODIS, L3JRC, and GlobCarbon burned-area products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. Vol. 47. P. 1032–1044.

39. Saulino L., Rita A., Migliozi A., Maffei C., Allevato E., Garonna A. P., Saracino A. Detecting burn severity across Mediterranean forest types by coupling medium-spatial resolution satellite imagery and field data. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 4. 741. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12040741>.

40. Souza Jr C. M., Roberts D. A., Cochrane M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 98(2–3). P. 329–343.

41. Soshenskyi O., Myroniuk V., Zibtsev S., Gumeniuk V., Lashchenko A. Evaluation of Field-Based Burn Indices for Assessing Forest Fire Severity in Luhansk Region, Ukraine. *Ukrainian journal of forest and wood science*, 2022. Vol. 13, No 1. Вип. 3. С. 21–34. DOI: [https://doi.org/10.31548/forest.13\(1\).2022.48-57](https://doi.org/10.31548/forest.13(1).2022.48-57).

42. Soverel N. O., Perrakis D. D. B., Coops N. C. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sensing of*

Environment. 2010. Vol. 114, No. 9. P. 1896–1909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.013>.

43. Schroeder W., Prins E., Giglio L., Csiszar I., Schmidt C., Morisette J., Morton D. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. P. 2711–2726.

44. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M., Prank M., Petukhov V., Ermakova T. Wildfire emissions in northern Eurasia. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. Vol. 9. P. 415–436.

45. Stojanova D., Keramitsoglou I., Kiranoudis C. T., Kontoes C. Regional fire detection performance analysis in Europe using VIIRS and MODIS data. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Article 3904.

46. Töreyn B.U., Cinbis R.G., Dedeoglu Y., Cetin A.E. *Opt. Eng.* 2007. Vol. 46. 067204. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2748752>.

47. Turco M., Bedia J., Di Liberto F., Fiorucci P., von Hardenberg J., Koutsias N. Wildfires in Europe: variability and drivers. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. Article 22547.

48. Veraverbeke S., Lhermitte S., Verstraeten W. W., Goossens R. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: the case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, No. 11. P. 2548–2563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.029>.

49. Veraverbeke S., Sedano F., Hook S. J., Randerson J. T., Jin Y., Rogers B. M. Mapping the daily progression of large wildland fires using MODIS active fire data. *International Journal of Wildland Fire*. 2014. Vol. 23. P. 655–667.

50. Vorobiev A. Analysis of forest fire statistics and their impact on Ukraine's climate based on satellite imagery processing in the global information system GWIS. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2025. 12(1). P. 14–19.

51. Xiong X., Angal A., Chang T., Chiang K., Lei N., Li Y., Wu A. MODIS and VIIRS calibration and characterization in support of producing long-term high-quality data products. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(19). P. 3167.

52. Yao R., Wang L., Huang X., Sun L., Chen R., Wu X., Niu Z. A robust method for filling the gaps in MODIS and VIIRS land surface temperature data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. Vol. 59(12). P. 10738–10752.
53. Ying L., Han J., Du Y., Shen Z. Forest fire characteristics in China: spatial patterns and determinants. *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 424. P. 345–354.