

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та охоронних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ЛІСОВИХ МАСИВІВ
НА БАЗІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

**ENSURING FIRE SAFETY OF FOREST AREAS BASED ON A
GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM**

спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІСТОЗ-41
СУШИК Вадим Володимирович

(підпис)

Керівник:
д.г.н., професор
Пугач Сергій Олександрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« » 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
ТЕРЛЕЦЬКИЙ Тарас Володимирович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: *комп'ютерних та інформаційних технологій*

Кафедра: *комп'ютерної інженерії та безпеки*

Ступінь вищої освіти: *бакалавр*

Галузь знань: *12 Інформаційні технології*

Спеціальність: *126 Інформаційні системи та технології*

Освітня програма: *«Інформаційні системи та технології охорони і безпеки»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІБ

к.т.н., доцент Терлецький Т. В.

« » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

СУШИКУ Вадиму Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на базі геоінформаційної системи*

Керівник роботи: *д.г.н., професор Пугач Сергій Олександрович*

затвердені наказом закладу вищої освіти від «16» грудня 2025 р. № 529/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: *«30» травня 2026 р.*

3. Вихідні дані до роботи: *Космознімки з супутника Sentinel-2 східної частини*

Чорнобильського заповідника від 26.03.2020 р., 10.04.2020 р., 24.06.2020 р. Шкала USGS для рівнів інтенсивності вигорання рослинності dNBR.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити): _____

Анотація. Вступ. Розділ 1. Аналітичний огляд стану предметної області (поняття про

«ліс», «лісовкриті площі» та «пожежна безпека лісових масивів»); основні причини

виникнення лісових пожеж; класифікація лісових пожеж та їх наслідки; сучасні методи

моніторингу та прогнозування лісових пожеж; формулювання вимог та завдань). Розділ 2.

Обґрунтування вибору засобів та методів реалізації (геоінформаційні системи: структура,

функції та принципи роботи; FIRMS як первинне джерело даних про пожежі; виявлення та

аналіз пожеж за космознімками у сервісі Copernicus Browser; оцінка наслідків пожежі за

допомогою індексу dNBR у середовищі QGIS). Розділ 3. Практична реалізація (створення

цифрових карт пожежі; візуалізація результатів дослідження; створення web-карти

пожежі; оцінка ефективності розробленої системи та перспективи її впровадження).

Загальні висновки та рекомендації. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: *Презентація на слайдах*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 Аналітичний огляд стану предметної області	<i>Пугач С. О.</i>		
Розділ 2 Обґрунтування вибору засобів та методів реалізації	<i>Пугач С. О.</i>		
Розділ 3 Практична реалізація	<i>Пугач С. О.</i>		
Загальні висновки та рекомендації	<i>Пугач С. О.</i>		
Нормоконтроль	<i>Кайдик О. Л.</i>		
Гарант ОП	<i>Терлецький Т. В.</i>		
Показник запозичень тексту			
Академічна доброчесність	<i>Кайдик О. Л.</i>		

7. Дата видачі завдання: «16» грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Обґрунтування теми	До 12.12.2025 р.	
2.	Огляд літератури із досліджуваної проблеми	До 12.12.2025 р.	
3.	Розділ 1 Аналітичний огляд стану предметної області	До 28.02.2026 р.	
4.	Розділ 2 Обґрунтування вибору засобів та методів реалізації	До 31.03.2026 р.	
5.	Розділ 3 Практична реалізація	До 30.04.2026 р.	
6.	Загальні висновки та рекомендації	До 16.05.2026 р.	
7.	Формування списку використаних джерел	До 20.05.2026 р.	
8.	Формування додатків.	До 20.05.2026 р.	
9.	Формування презентації за темою кваліфікаційної роботи	До 20.05.2026 р.	
10.	Нормоконтроль	До 21.05.2026 р.	
11.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	До 22.05.2026 р.	
12.	Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту	До 02.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ (Сушик В. В.)

(підпис)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (Пугач С. О.)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Сушик В. В. Забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на базі геоінформаційної системи. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків та рекомендацій, списку використаних джерел та додатків.

У кваліфікаційній роботі досліджено особливості забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на основі використання геоінформаційних систем. Проведено аналіз теоретичних аспектів класифікації лісових пожеж та їх виникнення, розглянуто сучасні методи їх моніторингу та прогнозування. Обґрунтовано використання геоінформаційних технологій, супутникових даних та сервісів дистанційного зондування Землі для виявлення й аналізу пожеж. Використано дані FIRMS, можливості Copernicus Browser та середовище QGIS для оцінки наслідків пожеж за різницею нормалізованого коефіцієнту вигорання dNBR. Розроблено цифрові та web-карти пожеж, виконано моделювання ризиків їх виникнення і поширення, а також оцінено ефективність запропонованої системи.

Ключові слова: лісові пожежі, пожежна безпека, геоінформаційні системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), QGIS, FIRMS, Copernicus Browser, різниця нормалізованого коефіцієнту вигорання (dNBR), web-карта.

ANNOTATION

Sushyk V. Ensuring fire safety of forest areas based on a geographic information system. Manuscript.

Bachelor's qualification work EP «Security and safety information system and technologies». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

This bachelor's thesis comprises an introduction, three sections, general conclusions and recommendations, a list of references, and appendices.

The qualification work investigated the features of ensuring fire safety in forest areas based on the use of geographic information systems (GIS). The theoretical aspects of the occurrence and classification of forest fires were analyzed, modern methods of their monitoring and forecasting were considered. The use of geographic information technologies, satellite data and remote sensing services for detecting and analyzing fires was substantiated. FIRMS data, Copernicus Browser capabilities and the QGIS environment were used to assess the consequences of fires using the normalized burnout ratio dNBR. Digital and web-maps of fires were developed, modeling of the risks of their occurrence and spread was performed, and the effectiveness of the proposed system was assessed.

Keywords: forest fires, fire safety, geographic information systems (GIS), remote sensing (RS), QGIS, FIRMS, Copernicus Browser, Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR), web-map.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	8
1.1 Поняття про «ліс», «лісовкриті площі» та «пожежна безпека лісових масивів»	8
1.2 Основні причини виникнення лісових пожеж	10
1.3 Класифікація лісових пожеж та їх наслідки	12
1.4 Сучасні методи моніторингу та прогнозування лісових пожеж	16
1.5 Постановка завдань на кваліфікаційну роботу бакалавра	19
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ	21
2.1 Геоінформаційні системи: структура, функції та принципи роботи	21
2.2 FIRMS як первинне джерело даних про пожежі	23
2.3 Виявлення та аналіз пожеж за космознімками у сервісі Copernicus Browser	27
2.4 Оцінка наслідків пожежі за допомогою індексу dNBR у середовищі QGIS	31
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ	36
3.1 Створення цифрових карт пожежі	36
3.2 Візуалізація результатів дослідження. Створення web-карти пожежі	40
3.3 Оцінка ефективності розробленої системи та перспективи її впровадження	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

ВСТУП

У сучасних умовах проблема забезпечення пожежної безпеки лісових масивів набуває особливої актуальності. Традиційні методи спостереження та контролю за пожежною ситуацією часто не забезпечують достатньої оперативності отримання інформації та своєчасного реагування на загрози.

У зв'язку з цим особливого значення набуває застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють здійснювати комплексний моніторинг територій, аналізувати просторові закономірності виникнення пожеж, моделювати ризики та підтримувати прийняття управлінських рішень. Інтеграція ГІС із даними дистанційного зондування Землі, сервісами моніторингу та методами просторового аналізу створює умови для переходу від реагування на вже виниклі пожежі до їх прогнозування та попередження.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи визначається необхідністю вдосконалення існуючих підходів до забезпечення пожежної безпеки лісових масивів шляхом використання сучасних ГІС, які дозволяють підвищити оперативність виявлення пожеж, точність оцінювання їх наслідків та ефективність прогнозування ризиків виникнення й поширення вогню.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення пожежної безпеки лісових масивів.

Предмет дослідження – засоби та інструменти геоінформаційних систем для моніторингу, аналізу, картографування та прогнозування лісових пожеж.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження підходів до забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на основі використання геоінформаційної системи шляхом інтеграції супутникових даних, просторового аналізу, створення цифрових карт пожеж та моделювання ризиків їх виникнення і поширення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Поняття про «ліс», «лісовкриті площі» та «пожежна безпека лісових масивів»

Ліси є важливою складовою навколишнього природного середовища, яка виконує ряд екологічних, економічних та соціальних функцій. Ліси забезпечують збереження біорізноманіття, регулювання водного режиму територій, очищення атмосферного повітря та формування сприятливих умов для життєдіяльності людини. У сучасних умовах проблема збереження лісових ресурсів набуває особливої актуальності через збільшення кількості лісових пожеж, зміну клімату та посилення антропогенного впливу.

Відповідно до Лісового кодексу України, лісами вважаються певні типи природних комплексів, у яких поєднуються деревна та чагарникова рослинність із відповідними ґрунтами, трав'яним покривом, тваринним світом та іншими компонентами природного середовища, що взаємопов'язані у своєму розвитку, впливають один на одного і на навколишнє природне середовище [29]. Ліс є не лише сукупністю деревних насаджень, а цілісною екосистемою, яка формується під впливом природних та антропогенних чинників.

Важливим поняттям у лісівництві та лісовому господарстві є лісовкриті площі. Під цим терміном розуміють земельні ділянки, вкриті лісовою рослинністю, зокрема деревами та чагарниками, які утворюють лісові насадження певної густоти й віку. До лісовкритих площ належать природні ліси, штучні лісові насадження, молодняки, а також території, що перебувають у процесі природного поновлення. Такі площі є основним об'єктом моніторингу у системах управління лісовими ресурсами та оцінювання пожежної небезпеки [33].

Терміни «ліс» і «лісовкрита площа» є близькими, але не тотожними поняттями. Вони відрізняються за своїм змістом та сферою використання. Ліс – це природний комплекс або екосистема, тобто ліс розглядається як цілісна

природна система, що виконує екологічні, кліматичні, захисні та господарські функції. Лісовкрита площа – це земельна ділянка, яка фактично вкрита лісовою рослинністю (деревами або чагарниками) певної густоти та віку. Це більш вузьке та переважно статистичне або господарське поняття, яке використовується: у лісовпорядкуванні, кадастровому обліку, ГІС-аналізі, моніторингу стану лісів.

Стан лісовкритих площ значною мірою впливає на ймовірність виникнення та швидкість поширення пожеж. Найбільш небезпечними вважаються хвойні ліси, ділянки із сухою рослинністю, великою кількістю лісових залишків та території зі складними погодними умовами, зокрема високою температурою повітря, низькою вологістю й сильним вітром [25].

Пожежна безпека лісових масивів – це система організаційних, технічних, інформаційних та профілактичних заходів, спрямованих на запобігання виникненню лісових пожеж, своєчасне виявлення осередків займання, локалізацію та ліквідацію пожеж, а також мінімізацію їх наслідків. Основною метою забезпечення пожежної безпеки є збереження лісових екосистем, захист населення та об'єктів інфраструктури від негативного впливу пожеж [22].

Сучасна система забезпечення пожежної безпеки лісових масивів ґрунтується усе частіше починає базуватися на використанні інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі та супутникового моніторингу. Застосування ГІС дозволяє здійснювати просторовий аналіз лісових територій, визначати ділянки підвищеного ризику виникнення пожеж, створювати тематичні карти пожежної небезпеки та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. Все це призводить до значної економії коштів, оскільки дистанційні методи не потребують безпосередньої присутності людини [30].

Таким чином, поняття «ліс», «лісовкриті площі» та «пожежна безпека лісових масивів» є взаємопов'язаними складовими системи охорони лісових ресурсів. Ефективне забезпечення пожежної безпеки потребує комплексного

підходу, який поєднує сучасні інформаційні технології, методи моніторингу та засоби прогнозування розвитку пожежних процесів.

1.2 Основні причини виникнення лісових пожеж

Лісові пожежі є одним із найнебезпечніших природних явищ, що завдають значної шкоди навколишньому середовищу, економіці та населенню. Вони призводять до знищення лісових екосистем, погіршення стану атмосферного повітря, втрати біорізноманіття та порушення природних екосистем великих територій в цілому. У сучасних умовах кількість та масштаби лісових пожеж постійно зростають, що пов'язано як із природними чинниками, так і з активною діяльністю людини.

Існує ряд класифікацій причин виникнення пожеж [20; 22; 28]. Складемо узагальнену схему причин виникнення пожеж (рис. 1.1). За причинами виникнення лісові пожежі поділяють на дві групи: природні та антропогенні.

До природних причин належать явища, що виникають без безпосереднього впливу людини. Найпоширенішою природною причиною є удари блискавки під час грозових явищ. Особливо небезпечними є так звані «сухі грози», коли блискавка супроводжується незначною кількістю опадів або їх повною відсутністю. У результаті займання сухої рослинності вогонь швидко поширюється лісовими територіями. До природних чинників також належать тривалі посухи, високі температури повітря, низька вологість, сильні вітри та накопичення великої кількості сухої рослинності й лісових залишків. Такі умови створюють високий рівень пожежної небезпеки та сприяють швидкому поширенню вогню.

Також важливим чинником виникнення та поширення лісових пожеж є кліматичні зміни. Підвищення середньорічної температури повітря, збільшення тривалості посушливих періодів та зменшення кількості опадів сприяють висушуванню рослинного покриву й підвищують ризик займання. У зв'язку з цим проблема пожежної безпеки лісів набуває глобального характеру.

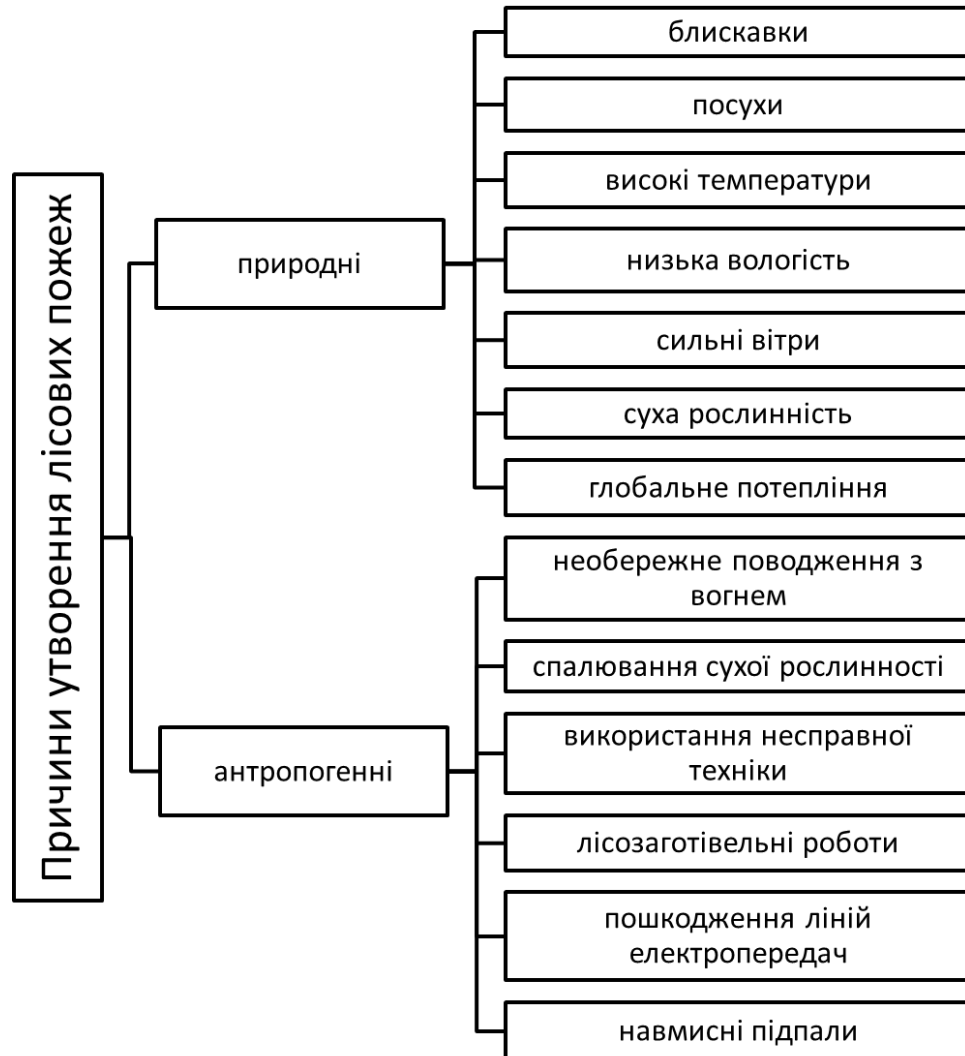


Рисунок 1.1 – Класифікація причин виникнення пожеж [20; 22; 28]

Великий вплив на швидкість поширення пожеж мають природно-географічні особливості території. Значну роль відіграють рельєф місцевості, тип лісових насаджень, густина рослинності та наявність горючих матеріалів. Наприклад, хвойні ліси є більш пожежонебезпечними через високу смолистість деревини та значну кількість сухої підстилки. На територіях зі складним пересіченим рельєфом вогонь може поширюватися значно швидше, особливо за наявності сильного вітру.

Однак більшість лісових пожеж виникає внаслідок антропогенного впливу. За статистичними даними [23], людський фактор є причиною переважної кількості загорянь у лісах. Однією з основних причин є необережне

поводження з вогнем під час перебування людей у лісових масивах. До таких дій належать розпалювання багать у заборонених місцях, залишення непогашених вогнищ, кидання недопалків або сірників, спалювання сухої рослинності поблизу лісу.

Значну небезпеку становить також господарська діяльність людини. Використання несправної техніки, проведення лісозаготівельних робіт, експлуатація транспортних засобів у лісових масивах та пошкодження ліній електропередач можуть спричинити займання сухої рослинності. У деяких випадках пожежі виникають через навмисні підпали, що є особливо небезпечним видом порушення природоохоронного законодавства.

Для ефективного запобігання виникненню лісових пожеж важливе значення мають системи моніторингу та прогнозування пожежної небезпеки. Сучасні геоінформаційні системи дозволяють здійснювати аналіз просторових даних, визначати найбільш небезпечні ділянки лісових масивів та оперативно реагувати на осередки займання. Використання супутникових знімків та цифрових карт значно підвищує ефективність контролю за станом лісових територій.

Отже, виникнення лісових пожеж є результатом взаємодії природних та антропогенних чинників. Найбільшу небезпеку становить людська діяльність, яка у поєднанні з несприятливими кліматичними умовами сприяє збільшенню кількості та масштабів пожеж. Тому забезпечення пожежної безпеки лісових масивів потребує комплексного підходу, що включає профілактичні заходи, сучасні інформаційні технології та ефективні системи моніторингу.

1.3 Класифікація лісових пожеж та їх наслідки

Лісові пожежі належать до небезпечних природних явищ, які завдають значної шкоди навколишньому середовищу, економіці та населенню. Їх виникнення та поширення залежать від природних умов, типу рослинності, кліматичних особливостей території та діяльності людини. Для ефективної

організації системи моніторингу, прогнозування та ліквідації пожеж важливе значення має їх класифікація. Існує багато різноманітних класифікацій лісових пожеж [20; 22; 28]. Спробуємо зробити узагальнену класифікацію лісових пожеж (рис. 1.2).

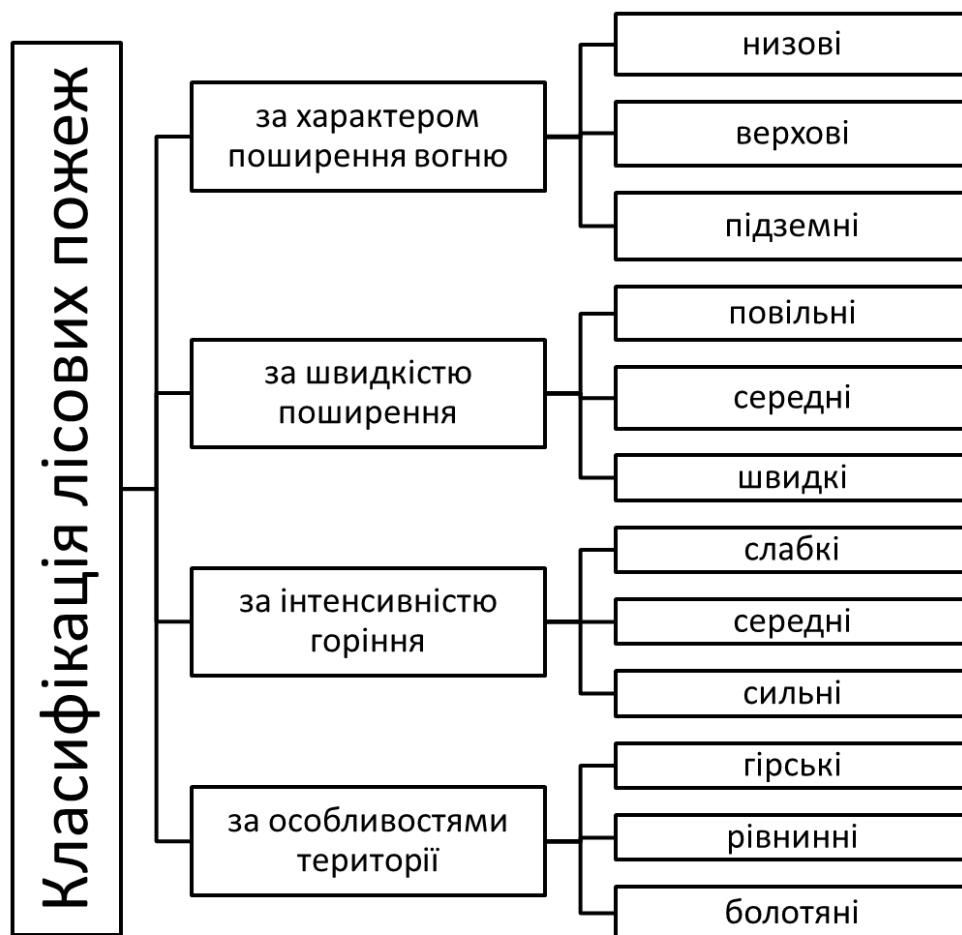


Рисунок 1.2 – Класифікація лісових пожеж [20; 22; 28]

Лісові пожежі класифікують за наступними ознаками: характер поширення вогню, швидкістю розвитку, інтенсивність горіння, особливості території.

Найбільш поширеним є поділ пожеж за характером поширення вогню на низові, верхові та підземні.

Низові пожежі виникають у нижньому ярусі лісу та охоплюють лісову підстилку, суху траву, мох, опале листя, чагарники та молоді дерева. Вогонь поширюється по поверхні ґрунту, переважно не зачіпаючи крон дерев. Такі

пожежі є найпоширенішими та становлять більшість випадків загорянь у лісах. Швидкість їх поширення залежить від сили вітру, вологості рослинності та рельєфу місцевості. Незважаючи на порівняно невисоку інтенсивність, низові пожежі можуть переходити у більш небезпечні форми.

Верхові пожежі характеризуються поширенням вогню по кронах дерев. Найчастіше вони виникають у хвойних лісах за наявності сильного вітру та сухої погоди. Такі пожежі поширюються дуже швидко й мають високу температуру горіння, що значно ускладнює їх локалізацію та ліквідацію. Верхові пожежі є особливо небезпечними через масштабне знищення лісових масивів, тваринного світу та значні економічні збитки.

Підземні або торф'яні пожежі виникають у шарах торфу та органічних відкладів. Вони характеризуються повільним, але тривалим тлінням без відкритого полум'я. Такі пожежі можуть поширюватися на значні площі та тривати протягом тривалого часу. Основною небезпекою торф'яних пожеж є складність їх виявлення та гасіння, а також значне задимлення території.

За швидкістю поширення пожежі поділяють на повільні, середні та швидкі. Повільні пожежі характеризуються повільним поширенням вогню та незначною висотою полум'я. Вони зазвичай виникають за умов підвищеної вологості або слабого вітру. Середні пожежі мають вищу швидкість поширення та здатні охоплювати значні території протягом короткого часу. Швидкоплинні або сильні пожежі розвиваються дуже інтенсивно, особливо під впливом сильного вітру та посушливих погодних умов. Такі пожежі можуть змінювати напрямок поширення та становлять значну небезпеку для населення і рятувальних служб.

За інтенсивністю горіння розрізняють слабкі, середні та сильні пожежі. Інтенсивність визначається кількістю теплової енергії, яка виділяється під час горіння. Слабкі пожежі мають невисоку температуру та незначну висоту полум'я, тому часто не призводять до повного знищення деревостану. Середні пожежі викликають суттєве пошкодження рослинності та можуть переходити у верхові. Сильні пожежі супроводжуються високою температурою горіння,

потужним тепловим випромінюванням і швидким поширенням вогню. Вони спричиняють повне знищення рослинного покриву та значні екологічні й економічні збитки.

За особливостями території лісові пожежі класифікують залежно від природно-географічних умов місцевості. Виділяють пожежі рівнинних, гірських, болотистих та торф'яних територій. На рівнинних ділянках пожежі зазвичай поширюються рівномірно та залежать переважно від сили вітру й типу рослинності. У гірських районах поширення вогню ускладнюється особливостями рельєфу, а швидкість руху пожежі значно зростає на схилах. На болотистих і торф'яних територіях основну небезпеку становлять підземні пожежі, які можуть тривати протягом тривалого часу та повторно виникати навіть після локалізації.

Окремо також виділяють класифікацію за причинами виникнення. Лісові пожежі можуть бути природними та антропогенними (пункт 1.2).

Лісові пожежі мають значні екологічні, економічні та соціальні наслідки. До екологічних наслідків належить знищення рослинного та тваринного світу, погіршення стану ґрунтів, порушення природних екосистем і зменшення біорізноманіття. Під час горіння в атмосферу потрапляє велика кількість диму, вуглекислого газу та токсичних речовин, що негативно впливає на якість повітря та кліматичні процеси.

Економічні наслідки пов'язані зі знищенням лісових ресурсів, пошкодженням інфраструктури, витратами на ліквідацію пожеж та відновлення територій. Значних збитків зазнають лісові господарства, транспортна інфраструктура та енергетичні системи. Крім того, пожежі можуть призводити до втрати рекреаційної та туристичної цінності територій.

Соціальні наслідки проявляються у загрозі життю та здоров'ю населення, погіршенні санітарно-екологічних умов проживання, необхідності евакуації людей із небезпечних районів. Задимлення територій може спричинити респіраторні захворювання та погіршення загального стану здоров'я населення.

Таким чином, класифікація лісових пожеж дає можливість визначати особливості їх розвитку та обирати ефективні методи боротьби з ними. Наслідки лісових пожеж мають комплексний характер і становлять серйозну загрозу для навколишнього середовища, економіки та населення, що обумовлює необхідність застосування сучасних технологій моніторингу та забезпечення пожежної безпеки лісових масивів.

1.4 Сучасні методи моніторингу та прогнозування лісових пожеж

У сучасних умовах проблема лісових пожеж набуває особливої актуальності через зміну клімату, підвищення температури повітря та збільшення антропогенного навантаження на природні екосистеми. Ефективне запобігання виникненню та поширенню пожеж потребує використання сучасних методів моніторингу й прогнозування, які дозволяють своєчасно виявляти осередки займання, оцінювати рівень пожежної небезпеки та приймати оперативні управлінські рішення.

Моніторинг лісових пожеж являє собою систему постійного спостереження за станом лісових територій, спрямовану на виявлення потенційно небезпечних ділянок та контроль розвитку пожежних процесів. Основною метою моніторингу є отримання актуальної інформації про стан рослинності, погодні умови, наявність осередків займання та масштаби поширення пожеж [27].

Традиційні методи моніторингу та прогнозування лісових пожеж базуються переважно на наземному спостереженні, патрулюванні лісових територій та аналізі метеорологічних показників. Для виявлення осередків займання використовуються пожежно-спостережні вежі, лісова охорона та авіаційне патрулювання. Значну увагу приділяють контролю температури повітря, вологості, кількості опадів і швидкості вітру, оскільки саме ці фактори впливають на рівень пожежної небезпеки. Прогнозування пожеж здійснюється шляхом оцінювання стану рослинності, ступеня висушення лісової підстилки та

аналізу сезонних кліматичних умов. Хоча традиційні методи залишаються важливою складовою системи пожежної безпеки, вони мають певні обмеження, зокрема значні витрати часу, залежність від людського фактора та недостатню оперативність отримання інформації про пожежі у важкодоступних районах [28].

Одним із найважливіших сучасних методів моніторингу є дистанційне зондування Землі. Цей метод базується на використанні супутникових знімків та аерофотозйомки для отримання інформації про стан лісових масивів. Супутникові системи дозволяють оперативно виявляти температурні аномалії, задимлення та осередки займання навіть у важкодоступних районах. Для моніторингу пожеж широко використовуються дані супутників серій Landsat, Sentinel та NOAA [16].

Важливою перевагою дистанційного зондування є можливість регулярного оновлення даних та охоплення значних територій. Використання мультиспектральних і теплових каналів дає змогу визначати ступінь сухості рослинності, оцінювати рівень пожежної небезпеки та прогнозувати можливі напрямки поширення вогню.

Суттєву роль у системах моніторингу відіграють геоінформаційні системи (ГІС). ГІС забезпечують збирання, зберігання, обробку, аналіз та візуалізацію просторових даних про лісові території. За допомогою ГІС можна створювати тематичні карти пожежної небезпеки, аналізувати розташування потенційно небезпечних ділянок та моделювати розвиток пожежних процесів.

Одним із головних завдань ГІС є інтеграція різнорідних даних, зокрема супутникових знімків, метеорологічної інформації, цифрових моделей рельєфу та статистичних показників. Це дозволяє комплексно оцінювати пожежну ситуацію та оперативно реагувати на загрози. Використання просторового аналізу дає можливість визначати території з найбільшим ризиком виникнення пожеж, враховуючи тип рослинності, густоту лісових насаджень, рельєф місцевості та кліматичні умови [1].

Для прогнозування лісових пожеж широко застосовуються математичні та комп'ютерні моделі. Вони дозволяють оцінювати ймовірність виникнення пожеж і прогнозувати швидкість та напрямок поширення вогню. У процесі моделювання враховуються такі фактори, як температура повітря, вологість, швидкість вітру, рельєф території та тип лісових насаджень [10].

Одним із найбільш поширених підходів є використання індексів пожежної небезпеки. Такі індекси базуються на аналізі метеорологічних даних і стану рослинного покриву. Вони дозволяють оцінювати рівень ризику виникнення пожеж у конкретний період часу. Високі значення індексів свідчать про підвищену ймовірність займання та необхідність посилення контролю за станом лісових територій.

Сучасні технології також передбачають використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу лісових пожеж. Дрони оснащуються тепловізорами, камерами високої роздільної здатності та GPS-модулями, що дозволяє оперативно отримувати детальну інформацію про стан лісових масивів. Використання БПЛА особливо ефективно для обстеження важкодоступних територій та контролю локалізації пожеж.

Важливим напрямом розвитку систем моніторингу є впровадження автоматизованих систем раннього виявлення пожеж. Такі системи можуть включати мережі відеоспостереження, теплові датчики, сенсори диму та метеостанції. Інформація з датчиків у режимі реального часу передається до центрів управління, де здійснюється аналіз ситуації та приймаються рішення щодо реагування на надзвичайні події [10].

Сучасні методи прогнозування дедалі частіше базуються на технологіях штучного інтелекту та машинного навчання. Алгоритми аналізують великі обсяги даних про попередні пожежі, погодні умови та характеристики територій, що дозволяє підвищити точність прогнозування ризиків виникнення пожеж.

Таким чином, сучасні методи моніторингу та прогнозування лісових пожеж ґрунтуються на комплексному використанні дистанційного зондування

Землі, геоінформаційних систем, математичного моделювання, безпілотних технологій та автоматизованих систем спостереження. Їх застосування забезпечує своєчасне виявлення пожежної небезпеки, підвищує ефективність реагування на надзвичайні ситуації та сприяє збереженню лісових екосистем.

1.5 Постановка завдань на кваліфікаційну роботу бакалавра

Ефективність забезпечення пожежної безпеки лісових масивів у сучасних умовах значною мірою залежить від своєчасного виявлення осередків займання, оперативного отримання просторової інформації про розвиток пожежної ситуації та можливості прогнозування ризиків виникнення і поширення пожеж. Зростання частоти екстремальних погодних явищ, збільшення антропогенного навантаження на природні екосистеми та обмеженість традиційних методів моніторингу обумовлюють необхідність застосування сучасних інформаційних технологій для підтримки процесів управління пожежною безпекою.

Вирішення задач моніторингу та аналізу лісових пожеж потребує комплексного підходу, заснованого на інтеграції геоінформаційних систем, технологій дистанційного зондування Землі, супутникових сервісів оперативного виявлення пожеж та методів просторового аналізу. Використання таких технологічних рішень дозволяє автоматизувати процеси збору та обробки даних, підвищити точність оцінювання наслідків пожеж та створити інформаційну основу для прогнозування пожежної небезпеки й підтримки прийняття управлінських рішень.

Для досягнення поставленої мети та розв'язання визначеної інженерно-прикладної задачі необхідно виконати такі завдання:

- 1) провести аналіз предметної області забезпечення пожежної безпеки лісових масивів, дослідити понятійний апарат, основні причини виникнення лісових пожеж, їх класифікацію та наслідки для природних екосистем.

2) дослідити сучасні підходи та технології моніторингу і прогнозування лісових пожеж, визначити можливості використання геоінформаційних систем у задачах просторового аналізу та підтримки прийняття рішень.

3) обґрунтувати вибір програмних засобів та джерел просторових даних для реалізації системи моніторингу пожеж, проаналізувати функціональні можливості ГІС-платформ, супутникових сервісів та інструментів дистанційного зондування Землі;

4) здійснити завантаження та обробку супутникових даних про осередки займання із використанням сервісу FIRMS та виконати аналіз лісових пожеж за космознімками.

5) оцінити наслідки пожеж шляхом застосування спектрального індексу dNBR у середовищі ГІС та визначити ступінь пошкодження лісових територій за результатами дистанційного аналізу.

6) розробити цифрові карти пожеж та реалізувати візуалізацію результатів дослідження у вигляді інтерактивної web-карти для забезпечення доступу до результатів просторового аналізу;

Реалізація поставлених завдань дозволить сформувати комплексний підхід до забезпечення пожежної безпеки лісових масивів із використанням сучасних геоінформаційних технологій, підвищити ефективність моніторингу пожежної ситуації та створити основу для розвитку інтелектуальних систем управління природними ризиками.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ

2.1 Геоінформаційні системи: структура, функції та принципи роботи

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій важливе місце у сфері аналізу та управління просторовими даними займають геоінформаційні системи (ГІС). Вони широко застосовуються у природокористуванні, екологічному моніторингу, лісовому господарстві, системах цивільного захисту та забезпеченні пожежної безпеки. Використання ГІС дозволяє ефективно обробляти великі обсяги просторової інформації, здійснювати аналіз територій та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Геоінформаційна система являє собою комплекс апаратних засобів, програмного забезпечення, просторових даних та методів їх обробки, призначений для збирання, зберігання, аналізу, моделювання та візуалізації географічної інформації. Основною особливістю ГІС є можливість роботи з просторово прив'язаними даними, тобто інформацією, яка має координатне положення на місцевості [24].

Сучасні геоінформаційні системи мають складну структуру, що включає декілька взаємопов'язаних компонентів. Основними складовими ГІС є апаратне забезпечення, програмне забезпечення, бази геоданих, методи обробки інформації та користувачі системи [21].

Основними функціями геоінформаційних систем є введення даних, їх зберігання, обробка, аналіз та візуалізація результатів. Введення даних здійснюється за допомогою цифрових карт, GPS-вимірювань, супутникових знімків та результатів польових досліджень. Зберігання інформації реалізується у вигляді електронних баз даних. Обробка та аналіз дозволяють виконувати просторові операції, оцінювати стан територій та виявляти закономірності розвитку природних процесів.

Однією з ключових функцій ГІС є просторовий аналіз. Він дає можливість визначати взаємозв'язки між об'єктами, оцінювати зміни територій

та прогнозувати розвиток небезпечних явищ. У сфері забезпечення пожежної безпеки просторовий аналіз використовується для визначення пожежонебезпечних зон, оцінювання ризиків виникнення пожеж та моделювання шляхів поширення вогню [27].

Важливою функцією ГІС є картографічна візуалізація даних. Результати аналізу можуть відображатися у вигляді цифрових карт, схем, діаграм та тривимірних моделей. Це значно полегшує сприйняття інформації та підвищує ефективність прийняття управлінських рішень.

Принцип роботи геоінформаційних систем базується на інтеграції просторових та атрибутивних даних у єдиному інформаційному середовищі. На першому етапі здійснюється збір та введення даних із різних джерел. Далі виконується їх обробка, систематизація та збереження у базах геоданих. Після цього проводиться просторовий аналіз та моделювання процесів, а результати подаються у вигляді картографічних матеріалів або аналітичних звітів [26].

У системах моніторингу лісових пожеж ГІС забезпечують оперативне отримання інформації про стан лісових територій, визначення потенційно небезпечних ділянок та прогнозування поширення пожеж. Інтеграція ГІС із технологіями дистанційного зондування Землі, метеорологічними даними та системами GPS-моніторингу значно підвищує ефективність контролю за пожежною ситуацією [4].

Таким чином, геоінформаційні системи є важливим інструментом аналізу та управління просторовими даними. Їх використання у сфері пожежної безпеки лісових масивів дозволяє автоматизувати процеси моніторингу, підвищити точність прогнозування та забезпечити оперативне реагування на надзвичайні ситуації.

Здійснимо аналіз конкретної пожежі за допомогою ГІС на прикладі пожежі у Чорнобильській зоні відчуження у квітні 2020 р. Усім відомий й широко описаний ареал горіння поблизу м. Прип'ять та 4 реактора ЧАЕС, проте найбільші пожежі були у західній частині Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника поблизу с. Рагівка 3-13 квітня 2020 р.

2.2 FIRMS як первинне джерело даних про пожежі

У сучасних системах моніторингу лісових пожеж важливе значення мають оперативні джерела просторових даних, які забезпечують своєчасне виявлення осередків займання та контроль за розвитком пожежної ситуації. Однією з найбільш поширених міжнародних систем моніторингу пожеж є FIRMS, яка використовується для отримання актуальної інформації про теплові аномалії та активні пожежі у різних регіонах світу.

Система FIRMS (Fire Information for Resource Management System) [8] була розроблена NASA у співпраці з University of Maryland з метою забезпечення оперативного доступу до супутникових даних про пожежі. Основним призначенням системи є підтримка моніторингу природних пожеж, оцінювання рівня пожежної небезпеки та надання інформації для служб реагування й наукових досліджень.

Дані супутникових сенсорів дозволяють фіксувати теплові аномалії, що можуть свідчити про наявність активних осередків горіння. Інформація оновлюється декілька разів на добу, що забезпечує оперативність отримання даних та можливість швидкого реагування на надзвичайні ситуації. Дані для FIRMS збираються за допомогою датчиків MODIS (супутники Terra та Aqua) та VIIRS (супутники Suomi NPP, NOAA-20 та NOAA-21). Просторова роздільна здатність MODIS становить 1×1 км та 375×375 м для VIIRS. Це встановлює нижню межу точності локалізації пожеж [31].

Для сервісу характерний простий user-friendly інтерфейс, що дає можливість вибрати дані супутника (MODIS, VIIRS, Sentinel-2), територію, період часу (від років до годин), оформлення карти (базову карту, градусну сітку, надписи населених пунктів, кордони тощо), завантажувати дані (рис. 2.1). Окрім того FIRMS володіє окремою функцією для аналізу пожеж у природоохоронних зонах та аналізу вигорілих територій [31].

Однією з головних переваг FIRMS є глобальне охоплення території спостереження. Система дозволяє отримувати дані про пожежі практично в

реальному часі незалежно від географічного розташування території. Це особливо важливо для моніторингу великих лісових масивів та важкодоступних районів, де традиційні методи спостереження є малоефективними.

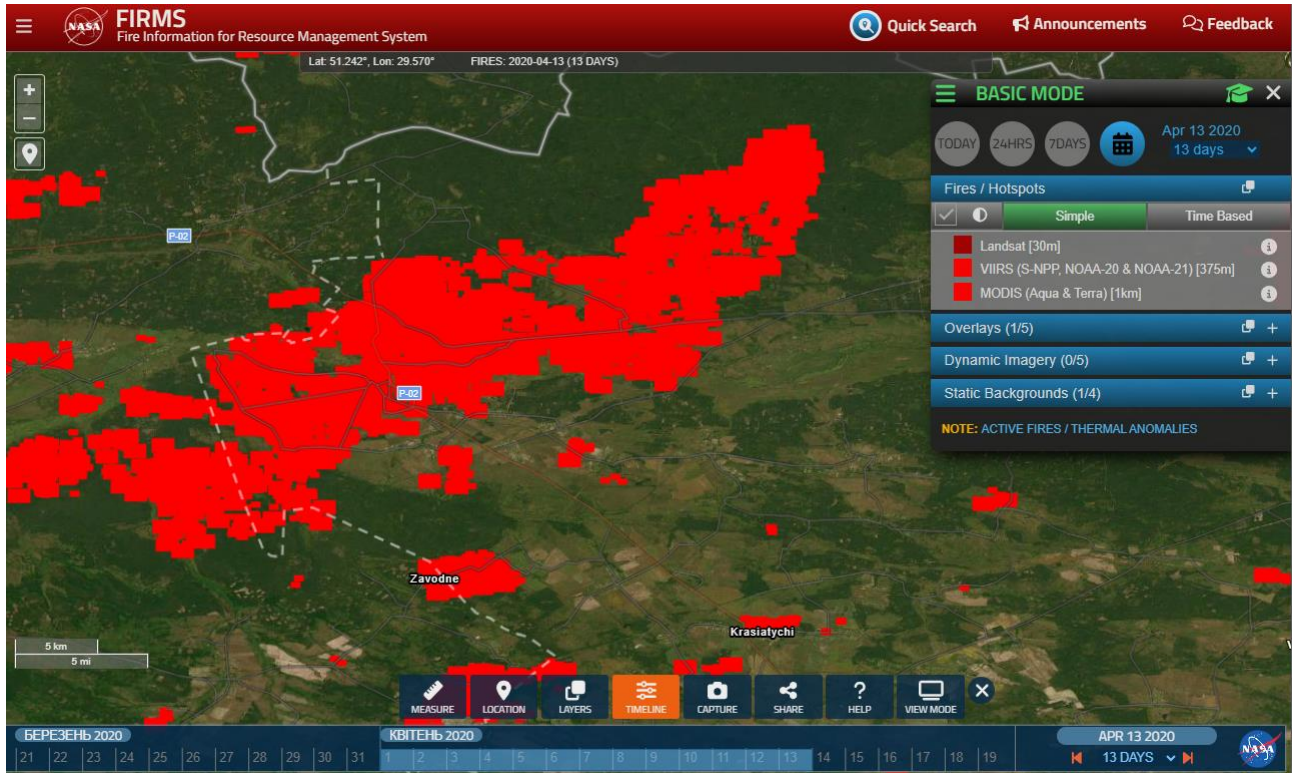


Рисунок 2.1 – Пожежа у західній частині Чорнобильської зони відчуження 3-13 квітня 2020 р. (за даними сервісу FIRMS) [8]

Система FIRMS надає користувачам широкий спектр інформації про пожежі. До основних параметрів належать координати осередків займання, дата та час фіксації пожежі, рівень теплової активності, тип супутникового сенсора та ступінь достовірності виявлення. Отримані дані можуть експортуватися у різних форматах і використовуватися у геоінформаційних системах для подальшого аналізу.

Найбільш простим прикладом використання сервісу FIRMS є моніторинг займань на певну дату (рис. 2.1). Важливе значення також має аналіз певного періоду часу (до 31 діб). Для більш тривалих періодів треба завантажувати дані, потім аналізувати їх у ГІС (наприклад QGIS). Як приклад аналізу та порівняння періодів до 31 діб, можна навести пожежі у травні 2024 р. та травні 2025 р.

(рис. 2.2). Сервіс показує, що за вказані періоди загальна чисельність пожеж суттєво не відрізняється між собою. Проте спостерігається велика пожежа поблизу с. Бірки, Камінь-Каширського району [31].

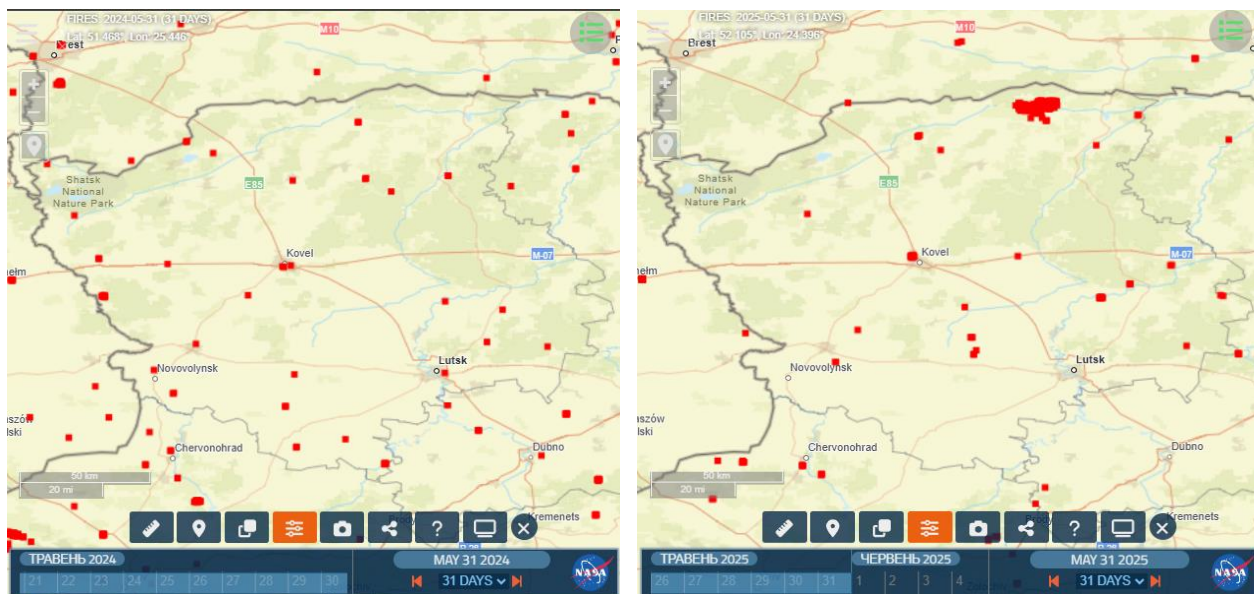


Рисунок 2.2 – Пожежі на території Волинської області 1-31 травня 2024 р. та 1-31 травня 2025 р. (за даними сервісу FIRMS) [8]

Важливою перевагою FIRMS є можливість інтеграції з геоінформаційними системами. Для цього існує плагін «Active Fire» (рис. 2.3, рис. 2.4). Дані про пожежі можуть бути використані для створення тематичних карт, аналізу просторового поширення вогню, оцінювання ризиків та прогнозування розвитку пожежної ситуації. У поєднанні з метеорологічними даними, цифровими моделями рельєфу та інформацією про типи рослинності FIRMS дозволяє здійснювати комплексний аналіз пожежної небезпеки територій.

Для моніторингу лісових пожеж в Україні система FIRMS має важливе практичне значення, особливо в умовах підвищення температури повітря та збільшення кількості посушливих періодів. Використання супутникових даних дозволяє оперативно виявляти осередки займання у лісових масивах, контролювати масштаби поширення пожеж та забезпечувати інформаційну підтримку служб ДСНС і лісового господарства.

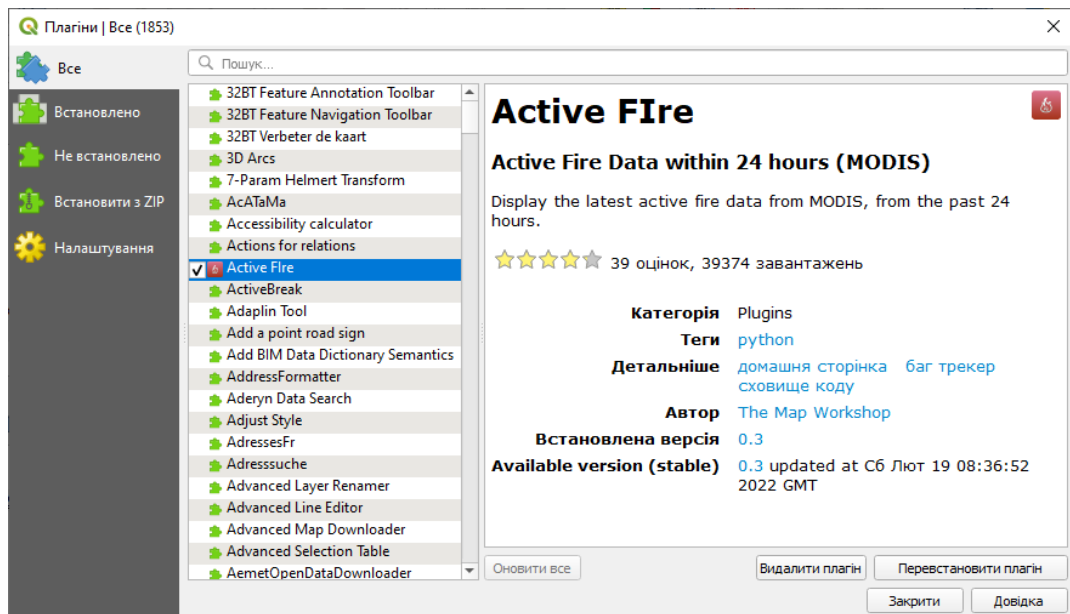


Рисунок 2.3 – Плагін QGIS «Active Fire»

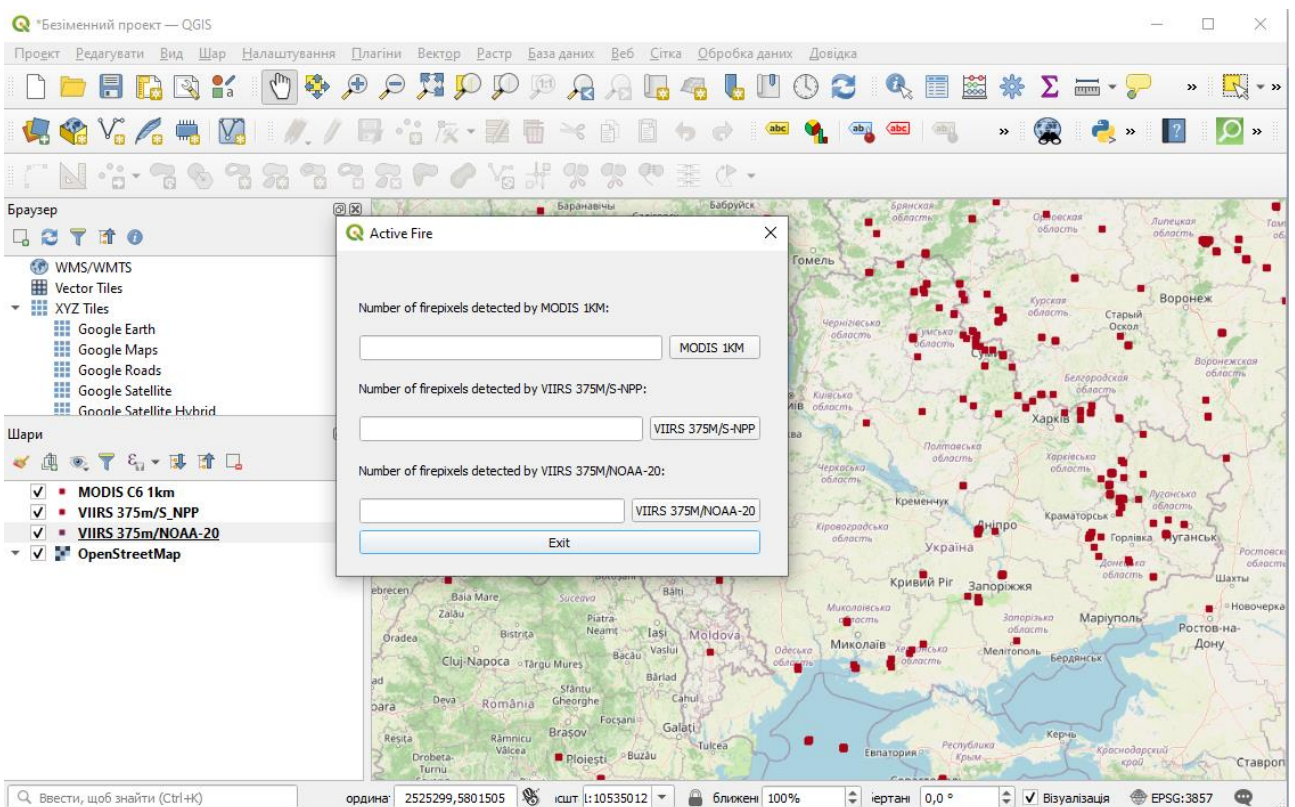


Рисунок 2.4 – Приклад роботи з плагіном «Active Fire» у середовищі QGIS

Разом із перевагами система FIRMS має певні обмеження. Точність виявлення пожеж залежить від просторової роздільної здатності супутникових знімків, погодних умов та щільності хмарності. У деяких випадках система

може не фіксувати невеликі осередки займання або формувати хибні спрацювання через високі температури поверхні (наприклад асфальту) чи промислові джерела тепла. Проте завдяки регулярному оновленню даних та високій оперативності FIRMS залишається одним із найефективніших джерел інформації про активні пожежі.

Таким чином, FIRMS є важливим інструментом сучасного супутникового моніторингу пожеж, який забезпечує оперативне отримання просторових даних про осередки займання. Інтеграція системи з геоінформаційними технологіями дозволяє підвищити ефективність аналізу пожежної небезпеки, забезпечити своєчасне реагування на пожежі та сприяти збереженню лісових екосистем.

2.3 Виявлення та аналіз пожеж за космознімками у сервісі Copernicus Browser

У сучасних умовах дистанційне зондування Землі є одним із найефективніших методів моніторингу лісових пожеж. Використання супутникових знімків дозволяє оперативно виявляти осередки займання, оцінювати масштаби поширення вогню та аналізувати наслідки пожеж на значних територіях. Одним із найбільш доступних та функціональних інструментів для роботи із супутниковими даними є сервіс Copernicus Browser [5], який забезпечує доступ до даних Європейської космічної агенції.

Copernicus Browser [6] є веб-платформою для перегляду, аналізу та завантаження супутникових знімків, отриманих із супутників місії Sentinel та інших космічних апаратів. Сервіс дозволяє працювати з багатоспектральними даними, що є особливо важливим для виявлення теплових аномалій, зон вигорання та змін рослинного покриву після пожеж. Основною перевагою Copernicus Browser є можливість оперативного доступу до актуальних космознімків порівняно високої просторової роздільної здатності.

Для виявлення пожеж у сервісі широко використовуються знімки супутників Sentinel-2, які містять багатоспектральні канали видимого,

інфрачервоного та короткохвильового інфрачервоного діапазонів. Саме інфрачервоні канали дозволяють ефективно визначати осередки займання та ділянки з підвищеною температурою поверхні. У процесі аналізу активно застосовуються спеціальні спектральні комбінації та індекси.

Одним із найбільш поширених методів аналізу є використання псевдокольорових композицій. Наприклад, комбінація короткохвильового інфрачервоного, ближнього інфрачервоного та червоного каналів дозволяє чітко виділяти вигорілі території, активні осередки пожеж та пошкоджену рослинність.

Для аналізу пожеж у Copernicus Browser можна використовувати знімки супутника Sentinel-2 у комбінації каналів B12, B8A, B4 (комполит SWIR), або B12, B8, B2 [31]. Це канали, отримані переважно в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні.

Візьмемо знімок пожежі в біля с. Рагівка (Київська область) області від 7 квітня 2020 р. (рис. 2.5). Короткохвильові та інфрачервоні канали (наприклад B12, B8, B2) дозволяють ідентифікувати на знімку ареали пожежі. Червоним та помаранчевим кольорами позначено активне полум'я, темно-сірим, коричневим та чорним – вигорілі території. Проте, слід пам'ятати, що чорним кольором у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні також відображаються водні поверхні та тіні від хмар. У нашому випадку, хмарність у південно-східній частині знімка погіршує якість знімка (рис. 2.6).

Сервіс Copernicus Browser також дозволяє здійснювати часовий аналіз супутникових знімків. Це дає можливість відстежувати динаміку розвитку пожеж, оцінювати швидкість поширення вогню та аналізувати процеси відновлення рослинності після пожежі. Порівняння знімків за різні дати дозволяє визначати площі вигорілих територій та оцінювати масштаби екологічних збитків.

Важливою перевагою сервісу є інтеграція з геоінформаційними системами. Отримані космознімки можуть експортуватися у формати, придатні для подальшого аналізу в ГІС-середовищі. Це дозволяє поєднувати супутникові

дані з іншими просторовими шарами, такими як межі лісових масивів, дорожня мережа, рельєф місцевості та метеорологічні показники.

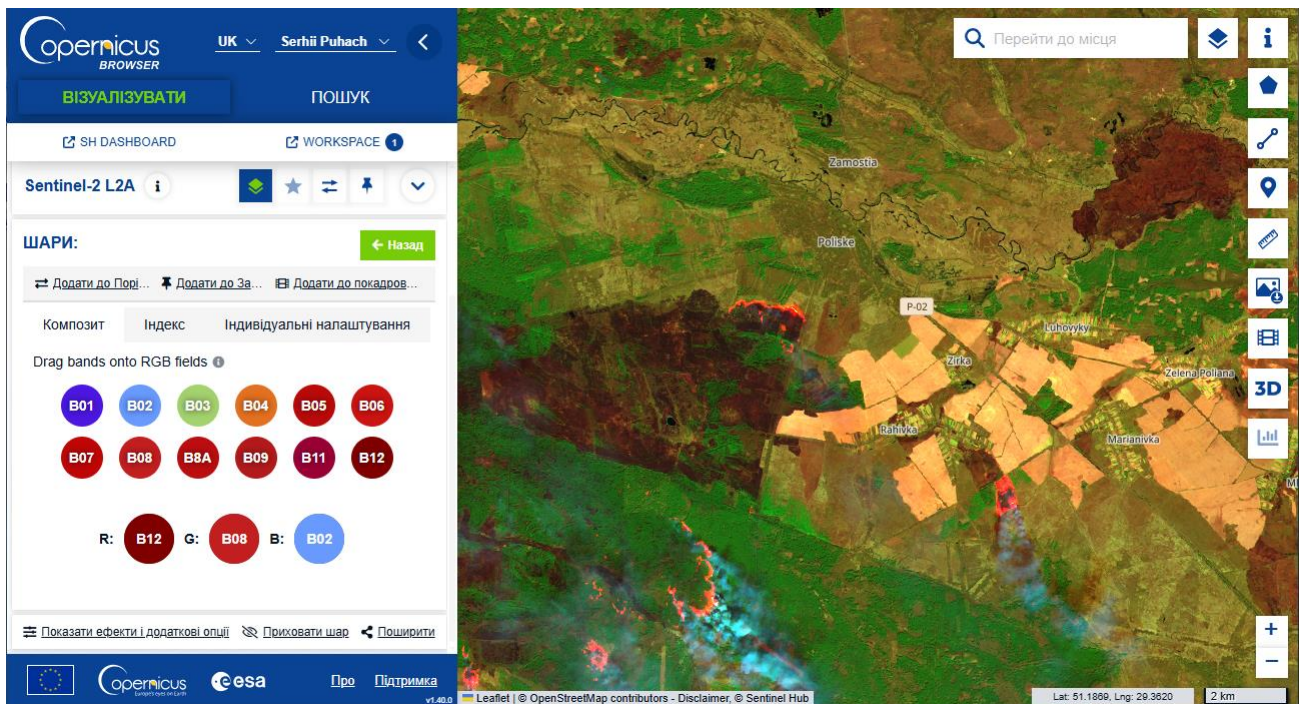


Рисунок 2.5 – Пожежа поблизу с. Рагівка Київської області, 7 квітня 2020 р.
(Sentinel-2, канали B12, B8, B2) [6]

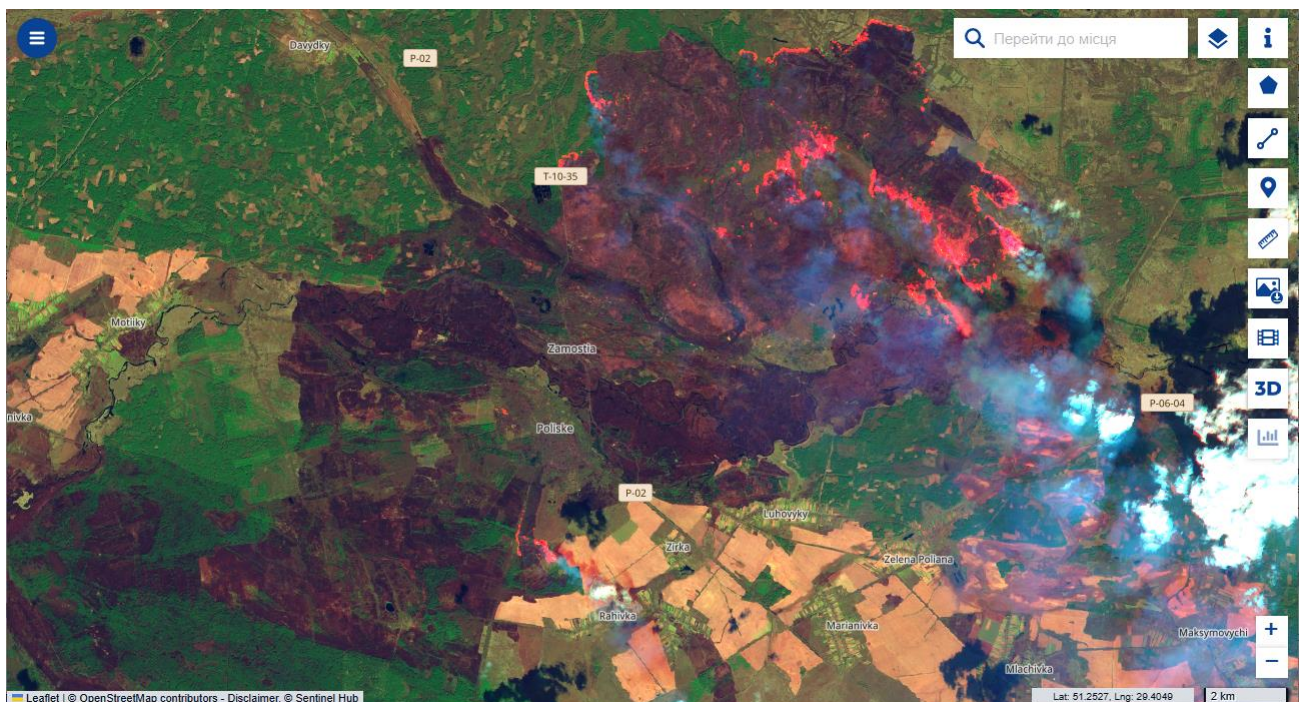


Рисунок 2.6 – Пожежа поблизу с. Рагівка Київської області, 10 квітня 2020 р.
(Sentinel-2, канали B12, B8, B2) [6]

Copernicus Browser дозволяє здійснювати прості аналітичні операції – обчислення площі пожеж та чи вигорілих територій за допомогою інструменту «Створити область інтересу». На рис. 2.7 ми можемо бачити що площа пожежі станом на 10.04.2020 р. становила 159,35 км². Проте така методика не є дуже точною й, на нашу думку, межу пожежі краще визначити у ГІС.

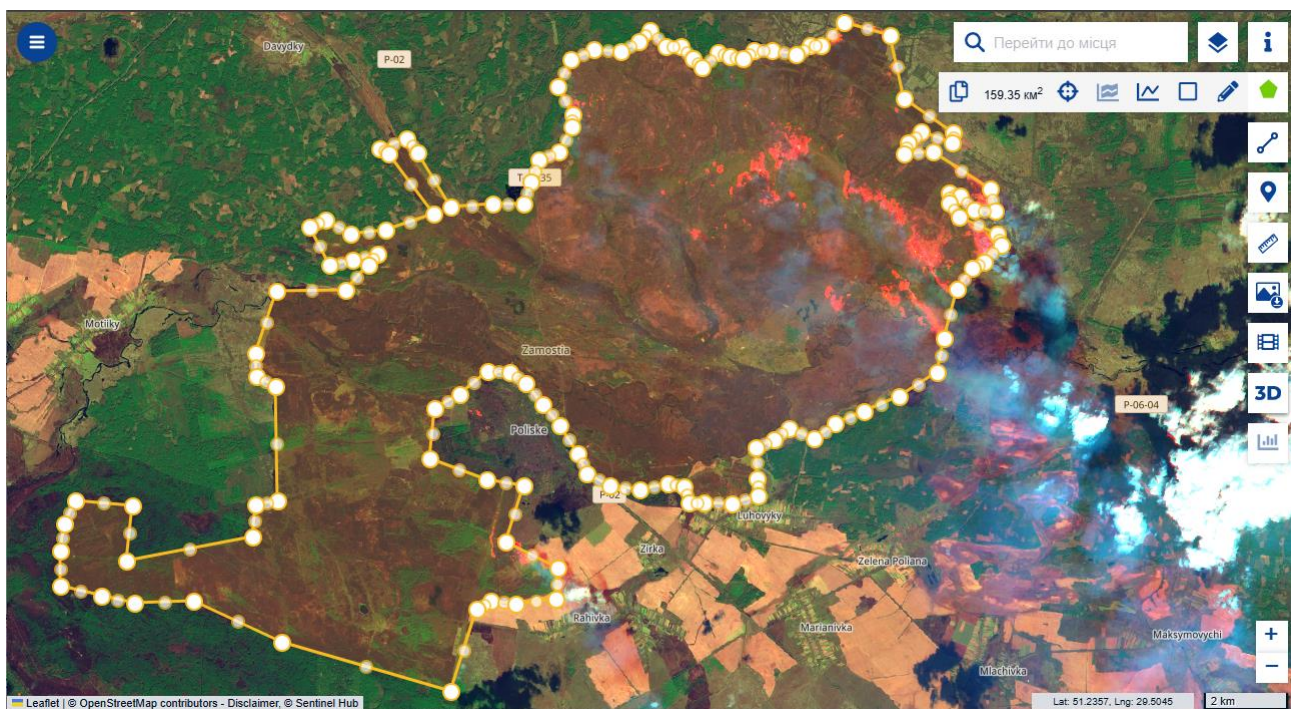


Рисунок 2.7 – Вимірювання площі пожежі та вигорілих територій у Copernicus Browser [6]

У сфері забезпечення пожежної безпеки лісових масивів Copernicus Browser має важливе практичне значення. Використання сервісу дозволяє оперативно отримувати інформацію про пожежну ситуацію, здійснювати оцінювання ризиків та підтримувати прийняття рішень під час ліквідації надзвичайних ситуацій. Особливо ефективним є поєднання даних Copernicus Browser із системами FIRMS та геоінформаційними технологіями.

Разом із перевагами використання космознімків має певні обмеження. Якість аналізу може знижуватися через хмарність, атмосферні перешкоди або недостатню періодичність оновлення знімків. Крім того, для обробки

супутникових даних необхідні відповідні навички роботи з ГІС та даними дистанційного зондування Землі.

Таким чином, сервіс Copernicus Browser є сучасним та ефективним інструментом для виявлення й аналізу лісових пожеж за космознімками. Використання багатоспектральних супутникових знімків та спектральних індексів дозволяє оперативно визначати осередки займання, оцінювати масштаби пошкодження лісових територій і забезпечувати інформаційну підтримку систем моніторингу пожежної безпеки.

2.4 Оцінка наслідків пожежі за допомогою індексу dNBR у середовищі QGIS

Важливим етапом моніторингу лісових пожеж є оцінювання наслідків впливу вогню на природні екосистеми за допомогою ГІС. У нашому випадку ми будемо використовувати QGIS – безкоштовну крос-платформену ГІС із відкритим кодом [13]. Одним із найбільш поширених інструментів аналізу є індекс dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio), який використовується для оцінювання інтенсивності вигорання територій та визначення змін стану рослинності.

Для аналізу у середовищі QGIS використовуються супутникові знімки високої та середньої просторової роздільної здатності, найчастіше отримані із супутників Sentinel-2. Важливо, щоб обидва знімки були отримані для однакової території, мали однакову систему координат та мінімальний рівень хмарності (менше 25%). Отже, нам потрібні космознімки територій, прилеглих до с. Рагівка (Київська область) до пожежі, під час пожежі (3-13 квітня 2020 р.) та після пожежі. Для аналізу ми завантажили космознімки супутника Sentinel-2 із сервісу Copernicus Browser [6]. До пожежі доступний знімок за 26 березня 2020 р. Для уточнення меж пожежі ми використовували знімки за 10 квітня 2020 р. та пізніші із частковою хмарністю. Через погодні умови (високу хмарність), періодичність зйомки (приблизно 10-15 діб) перший якісний та

придатний до аналізу знімок ми знайшли лише 24 червня 2020 р. (рис. 2.8) Це досить тривалий період часу – понад 2 місяці після пожежі, що може вплинути на загальні результати, оскільки рослинність на окремих ділянках може відновитися.

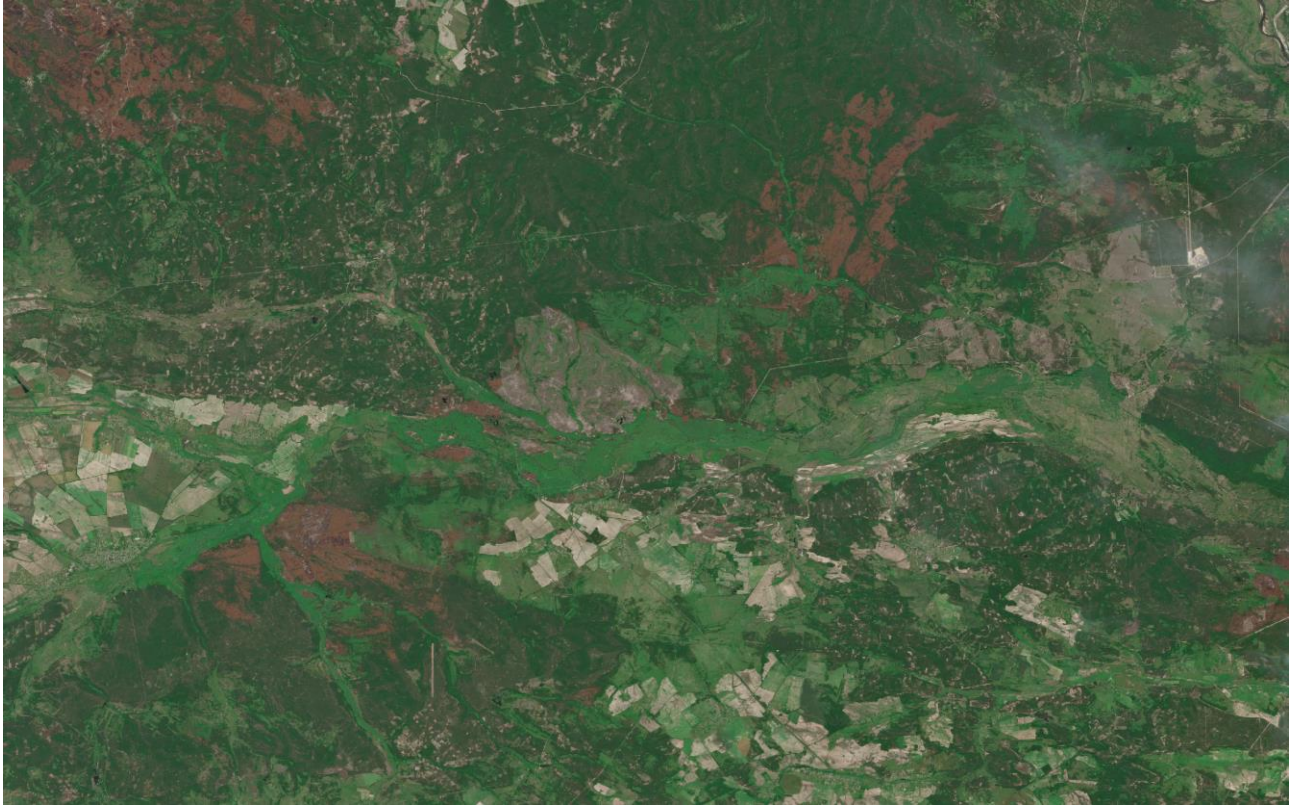


Рисунок 2.8 – Наслідки пожежі поблизу с. Рагівка Київської області (знімок Sentinel-2, 24 червня 2020 р.) [6]

Навіть через 2 з половиною місяці чітко видно бурі плями на місці колишніх вигорілих лісів. На більшості території рослинність вже відновилася (рис. 2.8).

Після завантаження здійснюється попередня обробка даних, яка включає перевірку проєкції, обрізання території дослідження та підготовку необхідних спектральних каналів.

Наступним етапом було визначення меж пожежі. Для цього ми використовували космознімки за 7.04.2020 р. та 10.04.2020 р. у комбінаціях спектральних каналів True color, False color, SWIR, а також пізніші знімки із

частковою хмарністю для окреслювання окремих частин ареалу пожежі. У результаті ми отримали загальний масив вигорання, площею 259,93 км² (рис. 2.9).

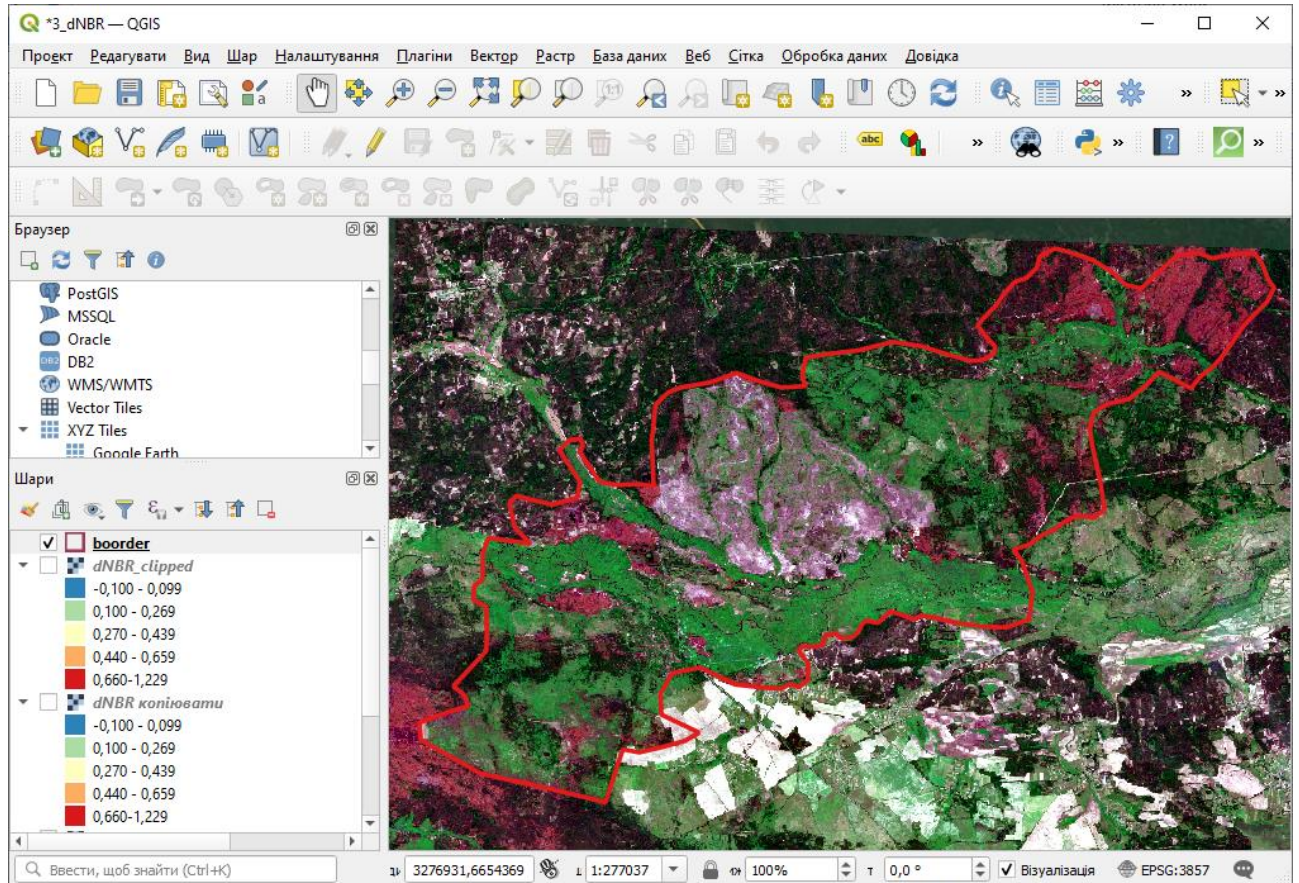


Рисунок 2.9 – Визначення меж пожежі поблизу с. Рагівка Київської області у програмі QGIS 3.16

Як вже зазначалося, для аналізу наслідків пожеж використовується базовий індекс – нормалізований коефіцієнт вигорання (Normalized Burn Ratio, NBR), який обчислюють за формулою (2.1):

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}), \quad (2.1)$$

де: NBR – нормалізований коефіцієнт вигорання;

NIR – ближній інфрачервоний діапазон (канал B08 у супутнику Sentinel-2);

SWIR – короткохвильовий інфрачервоний діапазон (канал B12) [12].

Для оцінки ступеня пошкодження рослинності застосовують індекс dNBR, що базується на порівнянні значень індексу NBR, обчисленого за супутниковими знімками до виникнення пожежі та після неї. Це дозволяє визначити ступінь пошкодження рослинності шляхом аналізу змін спектральних характеристик поверхні. Це індекс позначається дельта NBR (dNBR) й обчислюється за формулою (2.2):

$$dNBR = \text{prefireNBR} - \text{postfireNBR}, \quad (2.2)$$

де: dNBR – різниця нормалізованого коефіцієнту вигорання (NBR);

prefireNBR – NBR до пожежі;

postfireNBR – NBR після пожежі.

Отримані значення відображають ступінь зміни стану рослинності внаслідок пожежі. Чим більше значення dNBR, тим сильніше пошкодження рослинного покриву. Території з негативними значеннями dNBR свідчать про відновлення рослинності після пожежі [12].

Для обчислення dNBR у QGIS 3.16 використовуємо формулу (2.3):

$$\text{prefire}((B08-B12)/(B08+B12)) - \text{postfire}((B08-B12)/(B08+B12)). \quad (2.3)$$

Отже, відкриваємо у QGIS канали B08 та B12 супутника Sentinel-2 за 26.03.2020 р. та 24.06.2020 р. За допомогою модуля «Калькулятор растрів» визначаємо значення dNBR за формулою (2.3). У нашому випадку вона матиме наступний вигляд (ліст. 2.1) (рис. 2.10).

Важливою перевагою використання QGIS є відкритість програмного забезпечення, підтримка великої кількості форматів геоданих та можливість інтеграції з іншими інструментами дистанційного зондування. Крім того, середовище дозволяє автоматизувати обробку великих масивів супутникових даних і виконувати просторовий аналіз із високою точністю.

Лістинг 2.1 – Обчислення dNBR у «Raster Calculator» у QGIS 3.16

```
((("2020-03-26-00:00_2020-03-26-23:59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)@1"- "2020-03-26-00:00_2020-03-26-23:59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)@1"))/("2020-03-26-00:00_2020-03-26-23:59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)@1"+"2020-03-26-00:00_2020-03-26-23:59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)@1"))-((("2020-06-24-00:00_2020-06-24-23:59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)@1"- "2020-06-24-00:00_2020-06-24-23:59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)@1"))/("2020-06-24-00:00_2020-06-24-23:59_Sentinel-2_L2A_B08_(Raw)@1"+"2020-06-24-00:00_2020-06-24-23:59_Sentinel-2_L2A_B12_(Raw)@1")))
```

кінець лістингу 2.1

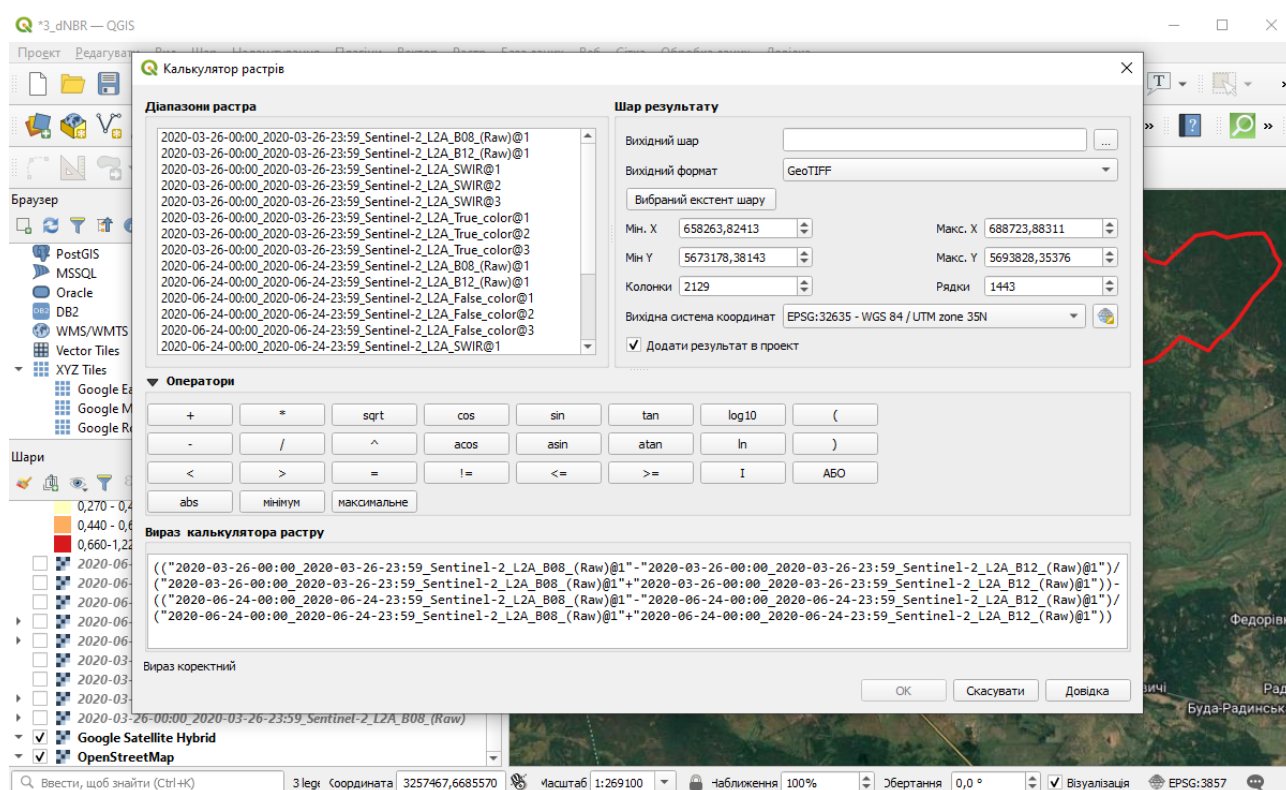


Рисунок 2.10 – Обчислення dNBR у програмі QGIS 3.16

Таким чином, використання індексу dNBR у середовищі QGIS є ефективним методом оцінювання наслідків лісових пожеж. Поєднання супутникових даних та геоінформаційних технологій дозволяє кількісно визначати ступінь пошкодження лісових територій, проводити картографування зон вигорання та забезпечувати інформаційну підтримку заходів із відновлення природних екосистем.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Створення цифрових карт пожежі

Створення цифрових карт пожеж є одним із ключових етапів забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на основі геоінформаційних технологій. Цифрове картографування дозволяє систематизувати просторову інформацію про осередки займання, аналізувати масштаби поширення пожеж, оцінювати ступінь пошкодження територій та формувати інформаційну основу для прийняття управлінських рішень. Використання цифрових карт значно підвищує оперативність реагування на надзвичайні ситуації та ефективність моніторингу лісових територій.

Цифрова карта пожеж являє собою тематичний картографічний продукт, створений у середовищі геоінформаційної системи на основі інтеграції просторових і атрибутивних даних про пожежі. На таких картах можуть відображатися місця виникнення осередків займання, межі вигорілих територій, ступінь пошкодження рослинності, ризики повторного займання та інші характеристики пожежної ситуації [20].

Основою для створення цифрових карт пожеж є просторові дані, отримані з різних джерел. До них належать супутникові знімки, результати дистанційного зондування Землі, дані систем моніторингу пожеж, цифрові моделі рельєфу, межі лісових масивів та результати польових спостережень. Особливу роль відіграють дані супутникового моніторингу, оскільки вони дозволяють оперативно отримувати інформацію про зміни стану території [24].

Процес створення цифрових карт пожеж складається з декількох послідовних етапів.

На першому етапі виконується збір та підготовка вихідних даних. Для аналізу використовуються супутникові знімки території до виникнення пожежі та після неї. Додатково можуть залучатися дані про осередки займання,

метеорологічні показники, інформація про типи лісових насаджень та адміністративні межі досліджуваної території.

Другим етапом є попередня обробка даних. Вона включає перевірку систем координат, корекцію просторових зміщень, обрізання території дослідження та підготовку наборів даних до подальшого аналізу. Особливу увагу приділяють забезпеченню однакової просторової прив'язки всіх інформаційних шарів.

Наступним етапом є виділення територій, що зазнали впливу пожежі. Для цього застосовуються методи спектрального аналізу супутникових знімків та індексного картографування. Одним із найбільш поширених підходів є використання індексів вигорання, які дозволяють визначати зміни стану рослинності та формувати межі пошкоджених ділянок.

Після виділення зон пожеж здійснюється побудова тематичних шарів цифрової карти. У ГІС формуються окремі тематичні інформаційні шари, які можуть містити [20]:

- межі лісових масивів (полігональні об'єкти);
- осередки виникнення пожеж (точкові об'єкти);
- площі вигорілих територій (полігональні об'єкти);
- класи ступеня пошкодження рослинності (полігональні об'єкти);
- транспортну мережу (лінійні об'єкти);
- водні об'єкти (полігональні або лінійні об'єкти);
- рельєф місцевості (поверхня) – має особливе значення для гірських та горбистих територій;
- інфраструктурні об'єкти лінійні (точкові або полігональні об'єкти).

Це далеко не повний перелік об'єктів, який за потреби можна розширити. Поєднання цих шарів дозволяє отримати комплексну просторову модель пожежної ситуації.

Одним із важливих етапів є символізація та оформлення цифрової карти. Для відображення різних рівнів пошкодження застосовуються тематичні шкали кольорів (або інтенсивності штриховки), що забезпечують зручність

інтерпретації результатів. Зазвичай території з високим рівнем пошкодження відображаються темно-червоними та червоними відтінками, середній рівень – помаранчевими та жовтими, а території з незначними змінами – зеленими або блакитними кольорами [26].

Для реалізації цифрового картографування доцільно використовувати спеціалізовані ГІС, які забезпечують роботу з растровими та векторними даними, підтримують інструменти просторового аналізу та дозволяють автоматизувати процес обробки інформації. У межах даного дослідження цифрові карти пожеж створювалися у середовищі QGIS шляхом інтеграції супутникових знімків, результатів розрахунку індексів вигорання та тематичних просторових шарів.

Отримані цифрові карти використовуються для оцінювання площ пошкоджених територій, визначення найбільш пожежонебезпечних ділянок та аналізу просторових закономірностей поширення вогню. Крім того, вони є основою для подальшого прогнозування ризиків виникнення пожеж та планування заходів із відновлення лісових екосистем.

Побудуємо тематичну карту наслідків пожежі 3-13 квітня 2020 р. поблизу с. Рагівка Київської області на основі розрахунку індексу dNBR, який було обчислено на основі космознімків Sentinel-2 L2A з сервісу Copernicus Browser.

Для інтерпретації результатів найчастіше застосовують шкалу Геологічної служби США (United States Geological Survey, USGS) (табл. 3.1). За нижню межу (поріг) пошкодженої пожежею рослинності доцільно взяти $dNBR=100$ [31, 2].

Отриманий результат відображається у вигляді тематичної карти ступеня пошкодження території. Для інтерпретації результатів застосовується класифікація значень dNBR. Як правило, низькі або від'ємні значення відповідають відсутності пошкодження або відновленню рослинності, тоді як високі значення свідчать про сильне вигорання.

У результаті побудови карти були отримані наступні результати (рис. 3.1). Побудована карта дозволяє визначити просторовий розподіл

пошкоджених ділянок та оцінити масштаби впливу пожежі на лісові масиви. Можна зробити висновки, що пожежа найбільше пошкодила ліси на півночі та півдні досліджуваної території, а також на північ від кол. населеного пункту Поліське (червоні та помаранчеві кольори). Великі ареали мало постраждали від пожежі – категорія низька тяжкість ($dNBR = 0,100-0,269$), на карті позначено зеленим кольором. Переважна більшість території на карті позначено синім кольором ($dNBR < 0,100$) – це ареали, які мало постраждали від пожежі та на момент аналізу (24 червня 2020 р.) повністю відновилися.

Таблиця 3.1 – Шкала USGS для рівнів інтенсивності вигорання рослинності dNBR [12]

Інтенсивність вигорання	діапазон dNBR
Розширене відновлення, високе (після пожежі)	-0,500 – -0,251
Розширене відновлення, низьке (після пожежі)	-0,250 – -0,101
Неспалений	-0,100 – +0,099
Низька тяжкість	+0,100 – +0,269
Помірна-низька тяжкість	+0,270 – +0,439
Помірна-висока тяжкість	+0,440 – +0,659
Висока тяжкість	+0,660 – +0,1300

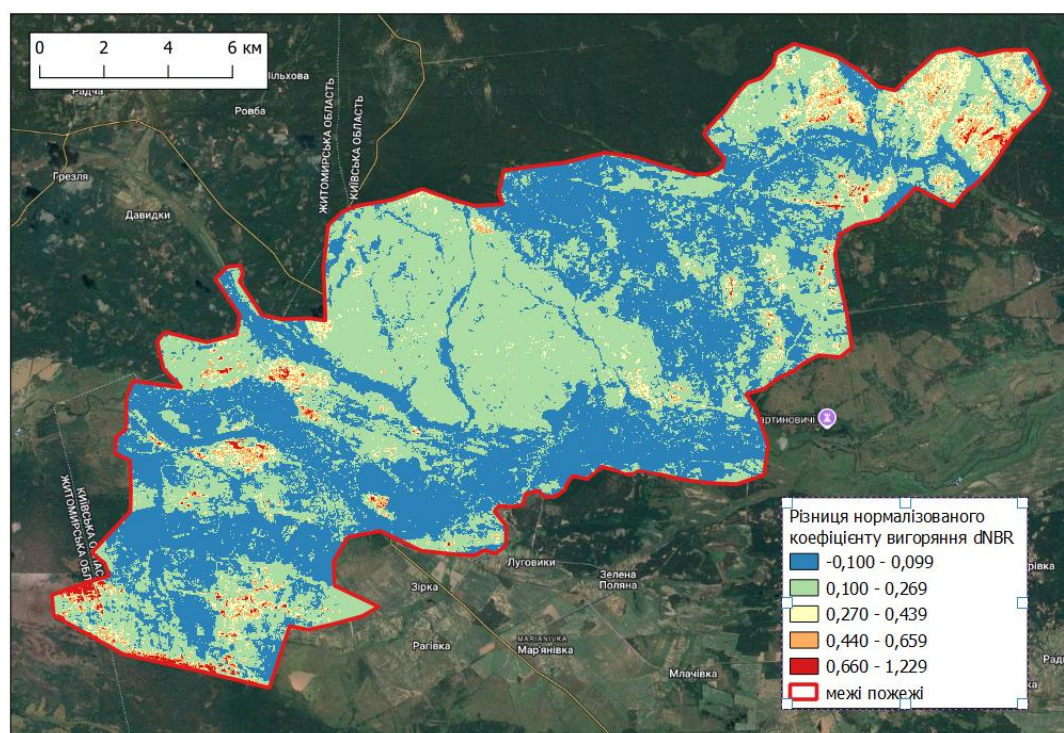


Рисунок 3.1 – Наслідки пожежі поблизу с. Раївка Київської області, 3-13 квітня 2020 р. ($dNBR$ обчислено станом на 24 червня 2020 р., на основі космознімків Sentinel-2 L2A у QGIS 3.16)

Отримані результати можуть використовуватися для планування лісовідновлювальних заходів, аналізу ефективності протипожежних заходів та прогнозування процесів природного відновлення екосистем.

Таким чином, створення цифрових карт пожеж є важливим елементом сучасних систем моніторингу лісових пожеж. Використання геоінформаційних технологій дозволяє інтегрувати різноманітні джерела даних, підвищити точність оцінювання наслідків пожеж та забезпечити ефективну інформаційну підтримку процесів управління пожежною безпекою лісових масивів.

3.2 Візуалізація результатів дослідження. Створення web-карти пожежі

ГІС – це потужний інструмент для візуалізації та аналізу даних про пожежі. Однак робота із геоінформаційними технологіями потребує певних умінь та навичок. Як правило, непідготовлений користувач не у змозі працювати з QGIS. Цей програмний пакет не є широко поширений серед звичайних користувачів, які не є спеціалістами у ГІС. Виникає проблема передачі інформації користувачам-замовникам (наприклад у лісові господарства). Саме для цього потрібно представити дані у форматі, який зможе бути відображений у будь-якому комп'ютері, будь-який користувачем.

Найпростішим способом є експорт зображення із ГІС (додаток А). QGIS надає можливості експорту результатів дослідження у рисунок (рис. 3.2). Доступні 3 опції: експорт у растрове зображення, у векторний формат, у pdf-файл.

Проте такий спосіб неминуче призводить до втрати значної частини інформації. Іншим способом представлення даних – передачі виконаного завдання замовнику – є створення інтерактивної web-карти, яку можна відкрити будь-яким браузером, або вбудувати у сайт. Для цього використовується плагін «qgis2web» (рис. 3.3).

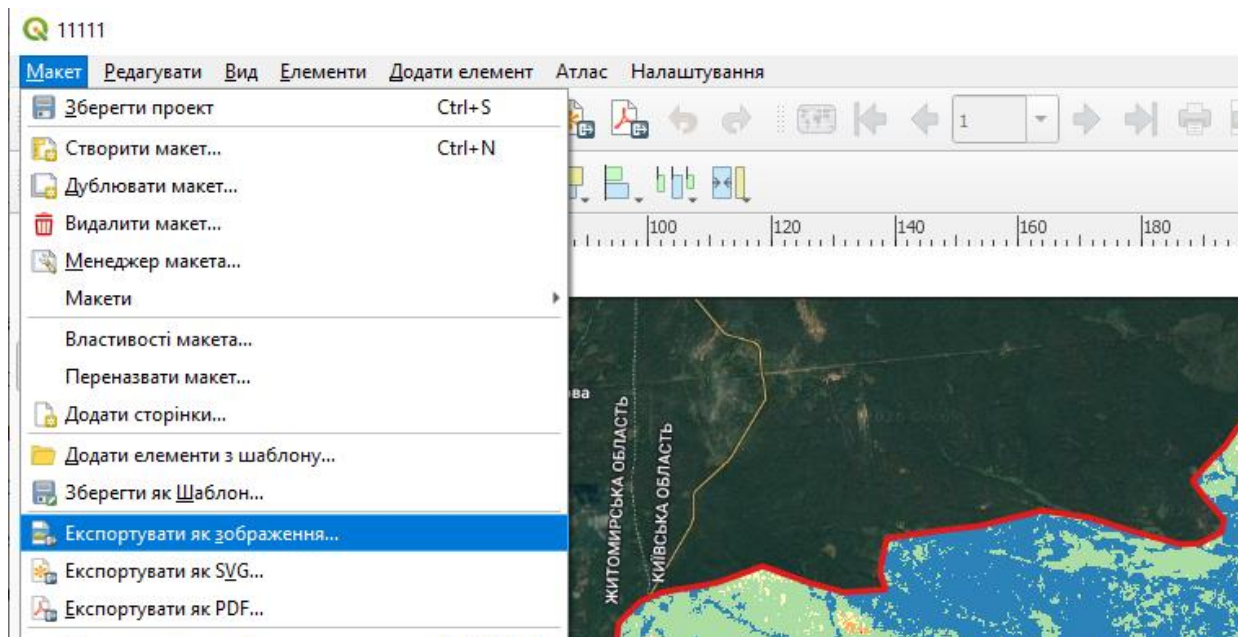


Рисунок 3.2 – Експорт результатів у зображення у QGIS 3.16

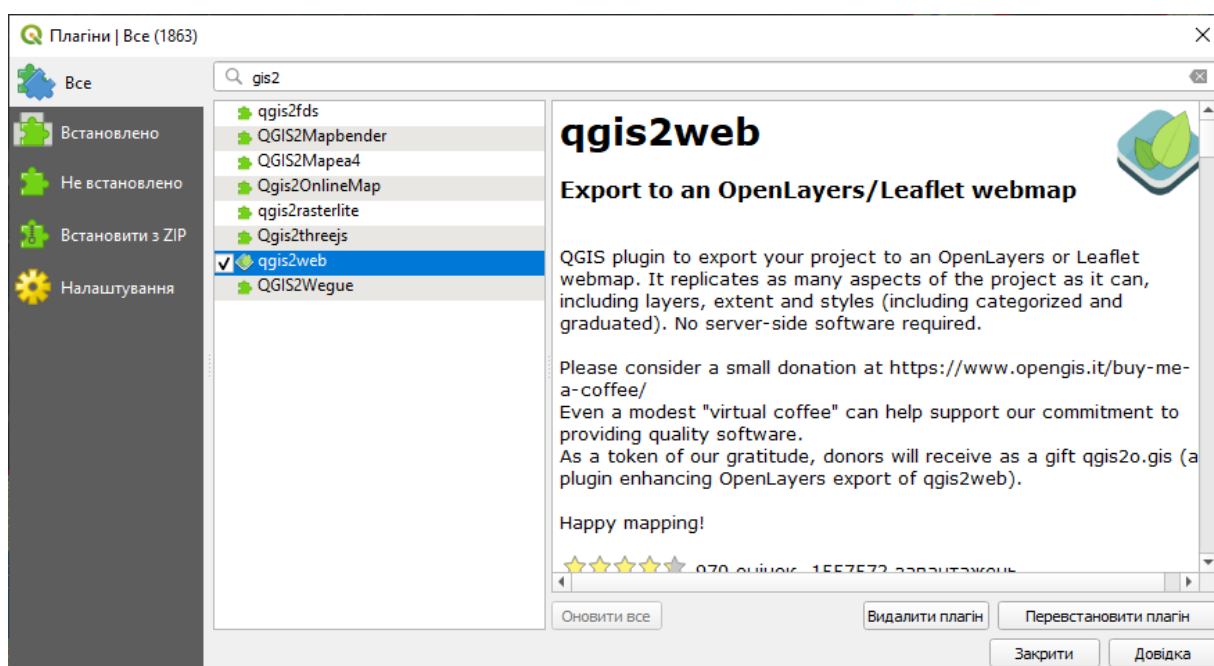


Рисунок 3.3 – Плагін QGIS «qgis2web»

Перед створенням web-карти потрібно попередньо підготувати проект QGIS: закрити непотрібні тематичні шари та проміжні результати, відкрити усі шари із інформацією, яку Ви хочете представити у веб-карті, переназвати тематичні шари (це потім буде відображатися у легенді карти) тощо. Коли все готово, починаємо процес створення карти та запускаємо «qgis2web». Для

цього виконуємо «Веб – qgis2web – Create web map» (рис. 3.4). На першому етапі (вкладка «Layers and Groups») задаємо шари для відображення. Ставимо відмітки («галочки») навпроти потрібних нам шарів. Також задаємо чи буде видимий шар після відкриття веб-карти (відмітка навпроти комірки «Visible») та базову карту (відмітка навпроти комірки «BaseMap»).

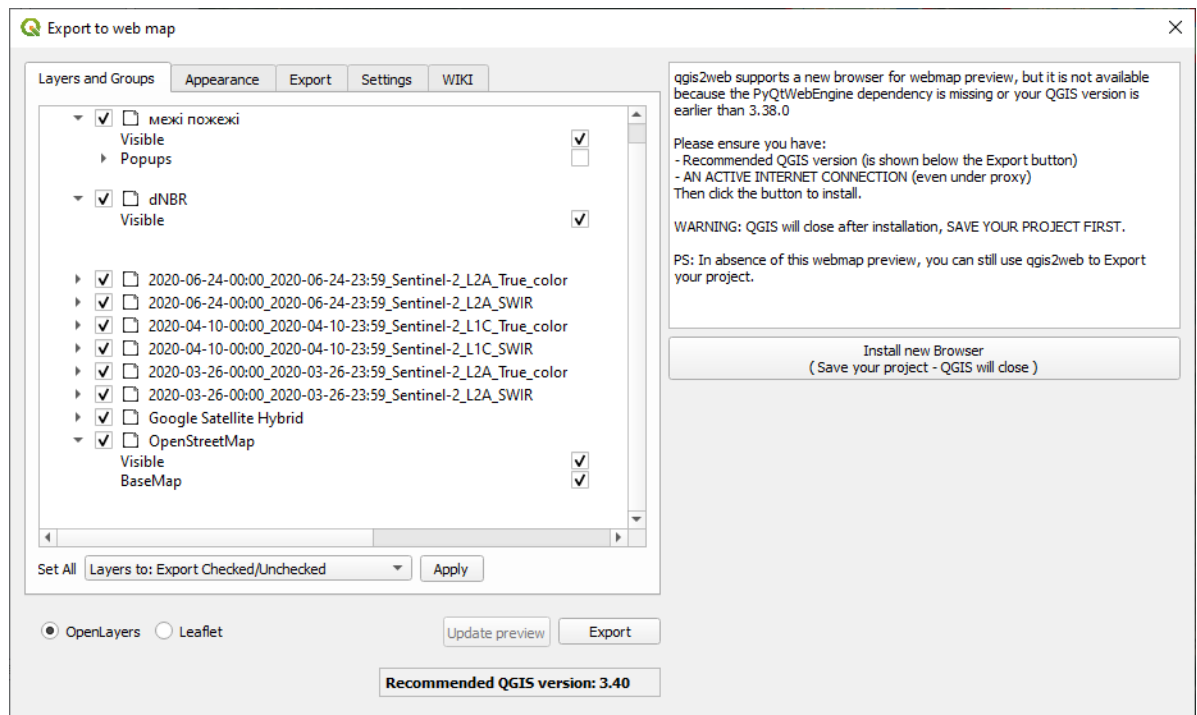


Рисунок 3.4 – Плагін «qgis2web», вкладка «Layers and Groups»

Ми вирішили додати у проєкт космознімки до пожежі (26 березня 2020 р.), під час пожежі (10 квітня 2020 р.) та після пожежі (24 червня 2020 р.) у режимах True Color (реальні кольори) та SWIR (комполит який використовують для ідентифікації пожеж та їх наслідків). На нашу думку це буде корисно замовникам та підвищить інформативність веб-карти.

Наступна вкладка – «Appearance» (рис. 3.5), де задається зовнішній вигляд веб-карти. Тут ми вказуємо назву «Title», відомості про карту «Abstract», легенду карти «Layers list» (ми вибрати функцію розгорнута легенда «Extended»). Серед інших корисних функцій додамо «Measure tool» (інструмент для вимірювання відстаней та площ на карті) та «Address search» (стрічка пошуку за географічними назвами та адресами).

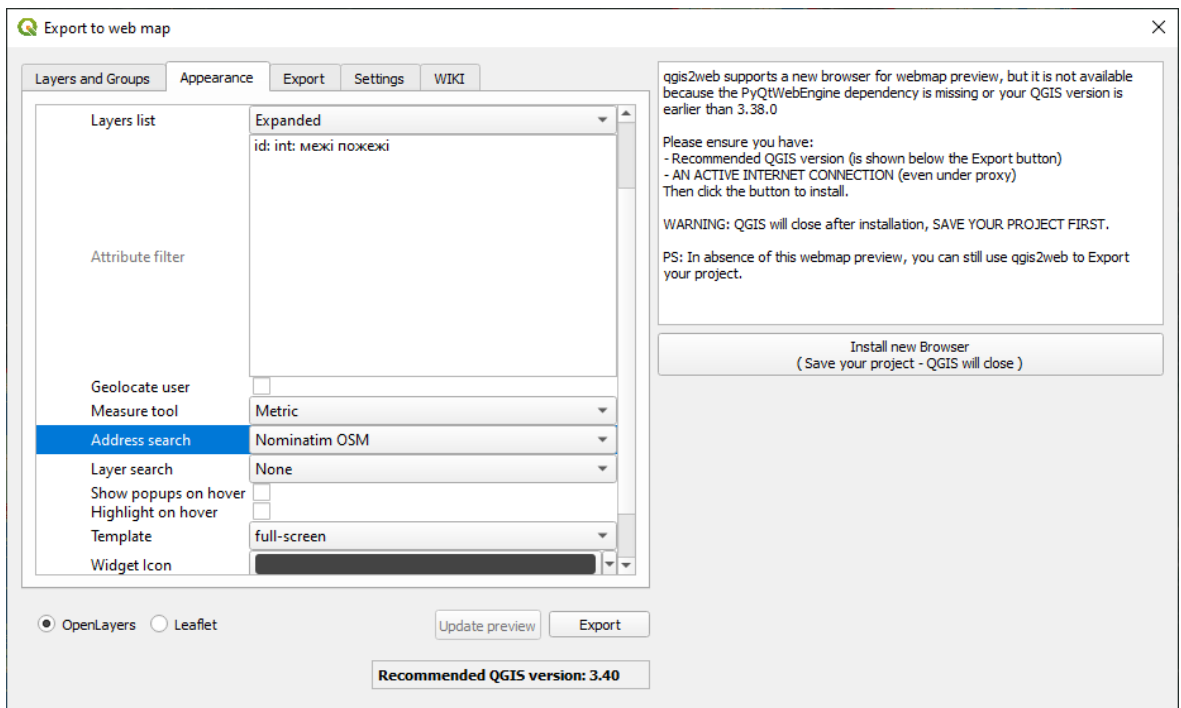


Рисунок 3.5 – Плагін «qgis2web», вкладка «Appearance»

На вкладці «Export» (рис. 3.6) задаємо місце збереження веб-карти.

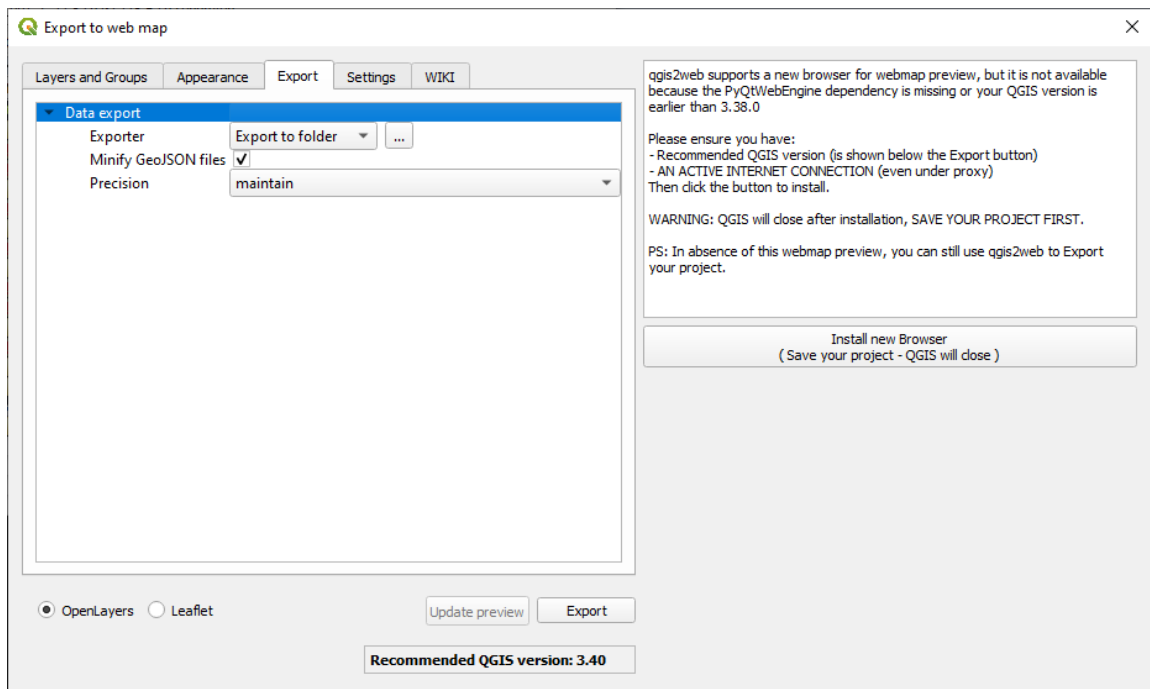


Рисунок 3.6 – Плагін «qgis2web», вкладка «Export»

На вкладці «Setting» (рис. 3.7) ставимо відмітки навпроти «Preview on startup» та «Close feedback on screen». Після цього натискаємо кнопку «Export».

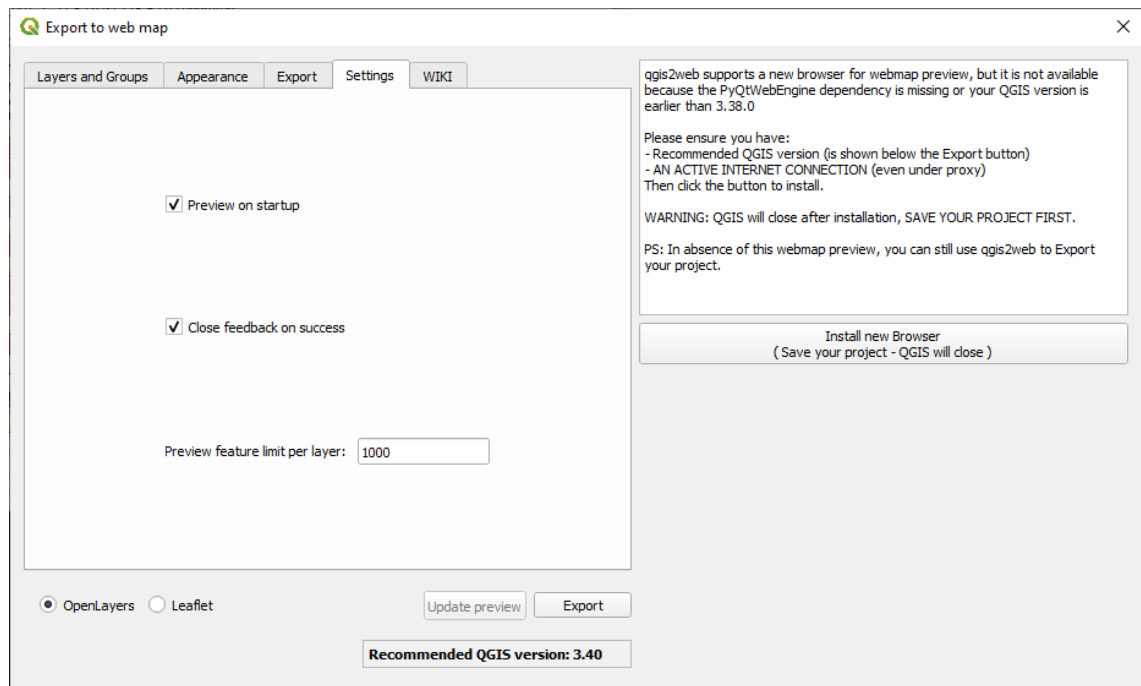


Рисунок 3.7 – Плагін «qgis2web», вкладка «Setting»

В результаті веб-карта була створена у теці «qgis2web_2026_05_04-10_54_24_907820». Щоб відкрити карту, слід запустити файл index.html. У результаті маємо інтерактивну веб-карту на якій можна подивитися усі результати нашого дослідження, масштабувати карту, зробити вимірювання довжин та площ, робити пошук об'єктів (рис. 3.8). HTML код веб-карти пожежі поблизу с. Рагівка, Київської області, 3-13 квітня 2020 р. наведено у додатку Б.

Підсумовуючи, можна зазначити, що візуалізація результатів дослідження та створення веб-карти пожежі є важливим етапом аналізу та представлення просторових даних про лісові пожежі. Використання веб-картографування дозволяє забезпечити наочне відображення осередків займання, меж пошкоджених територій та результатів просторового аналізу у зручному для користувача форматі. Створена веб-карта підвищує доступність інформації, спрощує процес моніторингу пожежної ситуації та може використовуватися як інструмент підтримки прийняття рішень у сфері забезпечення пожежної безпеки лісових масивів.

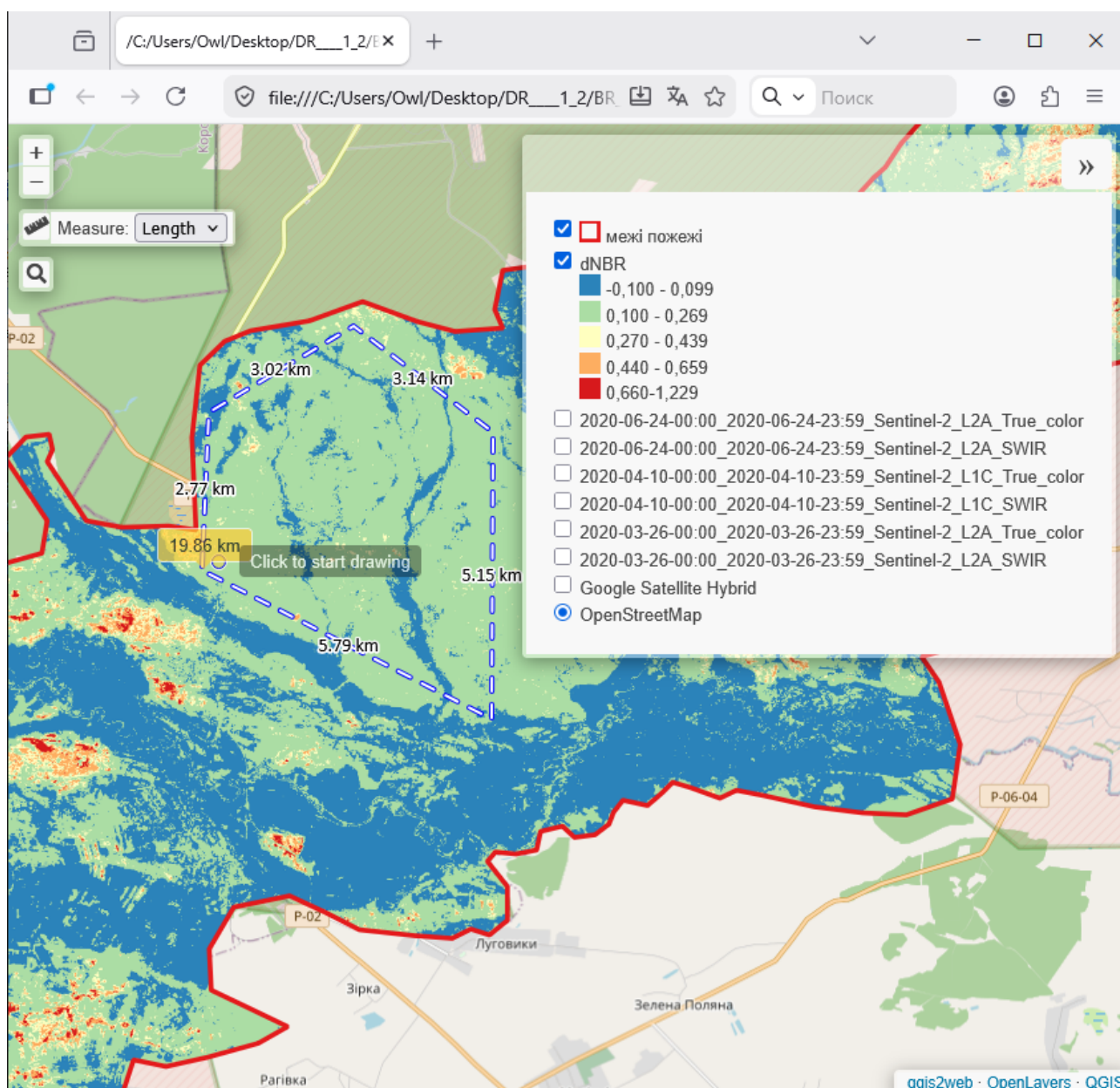


Рисунок 3.8 – Web-карта пожежі поблизу с. Рагівка Київської області,
3-13 квітня 2020 р.

3.3 Оцінка ефективності розробленої системи та перспективи її впровадження

Одним із завершальних етапів розроблення геоінформаційної системи забезпечення пожежної безпеки лісових масивів є оцінювання її ефективності та визначення перспектив практичного впровадження. Така оцінка дозволяє встановити рівень результативності використаних методів моніторингу, аналізу

та прогнозування пожеж, а також визначити можливості застосування створеної системи у діяльності лісових господарств, природоохоронних установ і служб реагування на надзвичайні ситуації [20, 26].

Розроблена система базується на інтеграції геоінформаційних технологій, супутникових даних дистанційного зондування Землі, сервісів моніторингу пожеж та засобів просторового аналізу. Її головним призначенням є автоматизація процесів виявлення осередків займання, аналізу наслідків пожеж і прогнозування зон потенційного ризику.

Оцінювання ефективності системи доцільно здійснювати за кількома критеріями: оперативність отримання інформації, точність виявлення пожеж, якість просторового аналізу, можливість прогнозування розвитку пожежної ситуації та зручність використання результатів для прийняття управлінських рішень.

Одним із найважливіших показників є оперативність роботи системи. Завдяки використанню супутникових даних та автоматизованих алгоритмів обробки інформації значно скорочується час між моментом виникнення пожежі та її виявленням. На відміну від традиційних методів спостереження, які потребують залучення персоналу та проведення польових обстежень, геоінформаційна система забезпечує регулярне оновлення даних і можливість оперативного реагування.

Другим важливим критерієм є точність визначення зон пожеж та оцінювання їх наслідків. Використання спектральних індексів, супутникових знімків і методів класифікації територій дозволяє отримувати об'єктивну інформацію про площі пошкодження та ступінь впливу пожежі на рослинний покрив. Просторовий аналіз забезпечує детальне картографування постраждалих ділянок і формування цифрових моделей територій.

Окрему роль відіграє можливість моделювання ризиків виникнення та поширення лісових пожеж. Моделювання ризику являє собою процес прогнозування ймовірності виникнення пожеж та оцінювання можливих сценаріїв розвитку вогню залежно від природних і антропогенних факторів.

Для побудови моделі ризиків використовуються різні просторові показники, серед яких:

- тип та густота лісових насаджень;
- температура повітря;
- кількість опадів;
- вологість рослинності;
- рельєф місцевості;
- крутизна схилів (для гірської та горбистої місцевості);
- відстань до доріг та населених пунктів;
- історичні дані про попередні пожежі;
- напрямок і швидкість вітру.

Моделювання поширення пожеж дозволяє прогнозувати можливий напрямок руху вогню та оцінювати площі потенційного ураження. Для цього використовуються алгоритми просторового аналізу, які враховують характеристики рельєфу, структуру рослинного покриву та погодні умови. Отримані результати можуть бути використані для визначення пріоритетних напрямків реагування та планування заходів із локалізації пожеж.

Ефективність розробленої системи також визначається можливістю створення інтерактивних цифрових продуктів, зокрема тематичних карт і web-карт. Такі рішення забезпечують швидкий доступ до результатів аналізу, покращують взаємодію між користувачами та дозволяють організувати централізоване управління інформацією про пожежну ситуацію.

Перспективи впровадження системи пов'язані з розширенням джерел даних та автоматизацією аналітичних процесів. Подальший розвиток може передбачати інтеграцію з безпілотними літальними апаратами, автоматизованими метеостанціями, мобільними застосунками збору польових даних та технологіями штучного інтелекту. Це дозволить підвищити точність прогнозування та скоротити час реагування на надзвичайні ситуації.

Крім того, перспективним напрямом є створення регіональних і локальних геоінформаційних платформ для підтримки діяльності органів

управління лісовими ресурсами та служб цивільного захисту. Використання таких систем сприятиме формуванню комплексного підходу до забезпечення пожежної безпеки лісових масивів.

Таким чином, оцінювання ефективності розробленої геоінформаційної системи підтверджує доцільність її використання для моніторингу та аналізу лісових пожеж. Застосування методів моделювання ризиків виникнення та поширення пожеж створює можливість переходу від реагування на наслідки до превентивного управління пожежною небезпекою, що є одним із ключових напрямів сучасного розвитку інформаційних систем у сфері охорони лісів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній роботі бакалавра вирішено актуальну прикладну задачу забезпечення пожежної безпеки лісових масивів на основі використання геоінформаційних систем, засобів дистанційного зондування Землі та сучасних методів просторового аналізу. На основі отриманих результатів сформульовано наступні висновки:

1) у межах аналітичного дослідження розглянуто основні поняття, пов'язані з лісовими територіями та забезпеченням їх пожежної безпеки. Проаналізовано причини виникнення лісових пожеж, встановлено вплив природних і антропогенних факторів на формування пожежної небезпеки, а також досліджено класифікацію пожеж і визначено основні екологічні, економічні та соціальні наслідки їх виникнення.

2) за результатами аналізу сучасних технологій моніторингу обґрунтовано доцільність використання ГІС як базового інструменту для роботи з просторовими даними. Визначено, що застосування ГІС дозволяє інтегрувати інформацію з різних джерел, виконувати просторовий аналіз, створювати цифрові карти та підтримувати процес прийняття рішень у сфері забезпечення пожежної безпеки лісових масивів.

3) проведено дослідження можливостей використання супутникових сервісів моніторингу пожеж та засобів дистанційного зондування Землі. Для оперативного отримання інформації про осередки займання використано систему FIRMS. Для завантаження космознімків та первинної оцінки територій використовувався сервіс Copernicus Browser.

4) реалізовано оцінювання наслідків пожеж із використанням спектрального індексу dNBR у середовищі QGIS. Виконані розрахунки дозволили визначити ступінь пошкодження рослинного покриву та здійснити картографування вигорілих ділянок. Отримані результати підтвердили ефективність застосування індексного аналізу для кількісного оцінювання впливу пожеж на лісові екосистеми.

5) у практичній частині роботи створено цифрові карти пожеж та реалізовано візуалізацію результатів дослідження у форматі web-карти. Побудоване картографічне рішення забезпечило інтерактивне представлення результатів аналізу та створило основу для подальшого використання результатів у системах моніторингу.

б) виконано оцінювання ефективності запропонованої геоінформаційної системи та проведено моделювання ризиків виникнення й поширення лісових пожеж. Встановлено, що використання інтегрованого підходу на основі супутникових даних, ГІС-аналізу та цифрового картографування дозволяє підвищити оперативність виявлення пожеж, покращити точність оцінювання наслідків і створити основу для прогнозування пожежної небезпеки.

Для підвищення ефективності, масштабованості та практичної цінності розробленої системи під час її подальшого використання рекомендується:

– розширення джерел просторових даних: доповнювати супутникові дані інформацією з метеорологічних станцій, польових спостережень, безпілотних літальних апаратів та автоматизованих сенсорних систем моніторингу;

– автоматизація процесів аналізу: впроваджувати алгоритми автоматичного оновлення даних, класифікації територій та формування карт пожежної небезпеки у режимі, наближеному до реального часу;

– удосконалення моделей прогнозування: використовувати методи машинного навчання та багатофакторного просторового аналізу для підвищення точності моделювання ризиків виникнення та поширення пожеж;

– інтеграція з практичними системами реагування: забезпечити використання результатів моніторингу у діяльності служб пожежної безпеки, органів управління лісовими ресурсами та систем цивільного захисту.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування ГІС-технологій для забезпечення пожежної безпеки лісових масивів та демонструють перспективність їх подальшого розвитку у напрямі створення інтегрованих інформаційно-аналітичних систем моніторингу природних ризиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Adab H., Kanniah K. D., Solaimani K. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. URL: DOI 10.1007/s11069-012-0450-8 (access date: 11.03.2026).
2. Artemenko O., Puhach S., Kaidyk O., Terletskyi T., Zdolbitska N. Analysis of wildfires using GIS technologies (case study of Volyn region, Ukraine). In: *Proceedings of the International Scientific Workshop on Applied Information Technologies and Artificial Intelligence Systems 2025 (AIT&AIS 2025)*, Chernivtsi, Ukraine, Dec. 18-19, 2025. Chernivtsi, 2025. Vol-4160. pp. 379-390.
3. Biletska M., Babiichuk S., Tomchenko O., Davybidia L., Kurach T., Shcheglov O. Assessing Tree Cover Based on Remote Sensing Data (Case Study Territory of Drevlians Nature Reserve in Zhytomyr Oblast). *Zenodo*. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15577839> (access date: 10.05.2026).
4. Chuvieco E., Salas J. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. URL: <https://doi.org/10.1080/02693799608902082> (access date: 15.03.2026).
5. Copernicus Browser guide. *European Space Agency*. URL: https://www.esa.int/Education/Copernicus_Browser_guide (access date: 1.05.2026).
6. Copernicus Browser. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (access date: 01.05.2026).
7. Fire Information for Resource Management System. *Wikipedia, the Free Encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_Information_for_Resource_Management_System (access date: 15.05.2026).
8. FIRMS: Global Fire Map. *FIRMS*. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map> (access date: 21.04.2026).
9. Gonzales C. Scorched Earth: Using NASA Fire Data to Monitor War Zones. *Bellingcat*. URL: <https://www.bellingcat.com/resources/2022/10/04/scorched-earth-using-nasa-fire-data-to-monitor-war-zones/> (access date: 19.05.2026).

10. Jaiswal R. K., Mukherjee S., Raju K. D., Saxena R. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. URL: [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00006-5) (access date: 15.04.2026).
11. Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment (LA). Sampling and Analysis Methods. *U. S. Department of Agriculture. Forest Service*. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr164/rmrs_gtr164_13_land_assess.pdf (access date: 10.05.2026).
12. Normalized Burn Ratio (NBR). *Office for Outer Space Affairs. UN-SPIDER Knowledge Portal*. URL: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio> (access date: 16.04.2026).
13. QGIS. URL: <https://qgis.org/> (access date: 01.12.2025).
14. Shcheglov O., Biletska M., Babiichuk S., Tomchenko O., Davybidia L., Kurach T. Introduction to NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System). *Zenodo*. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15600456> (access date: 01.05.2026).
15. Sivrikaya F., Saglam B., Akay A. E., Bozali N. Evaluation of Forest Fire Risk with GIS. URL: <https://surl.li/lfprkz> (access date: 20.04.2026).
16. Supriadi A., Oswari T. Analysis of Geographical Information System (GIS) design application in the Fire Department of Depok City. URL: <https://doi.org/10.47577/tssj.v8i1.181> (access date: 19.04.2026).
17. Tutorials & Examples. *FIRMS*. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/tutorials/> (access date: 21.05.2026).
18. Бабушка А., Бабій Л., Четверіков Б., Севрук А. Дослідження лісових пожеж за даними дистанційного зондування Землі (на прикладі Чорнобильської зони відчуження). *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2021. Вип. 94. С. 35-43. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.94.035> (дата звернення: 11.03.2026).
19. Бандурка О. І., Свинчук О. В. Метод ідентифікації космічних знімків для прогнозування лісових пожеж. *Системи управління, навігації та зв'язку*.

2022. Т. 1. № 67. С. 13–18. URL: <https://doi.org/10.26906/sunz.2022.1.013> (дата звернення: 11.03.2026).

20. Борисенко О. І., Мешкова В. Л. Прогнозування поширення пожеж та осередків шкідливих комах у соснових лісах засобами ГІС. Монографія. Харків : Планета-Прінт, 2021. 148 с.

21. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. URL: <https://surli.cc/ullwmo> (дата звернення: 12.03.2026).

22. Державне агентство лісових ресурсів України. URL: <https://forest.gov.ua/> (дата звернення: 25.01.2026).

23. Держстат. URL: <https://stat.gov.ua/uk> (дата звернення: 04.04.2026).

24. Донченко М. В., Коваленко І. І. Геоінформаційні системи : навчальний посібник. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 132 с.

25. Дубина М. В., Зінкевич О. В. Теоретичні аспекти функціонування та розвитку лісового господарства в Україні. URL: <https://surl.li/dggzjb> (дата звернення: 21.01.2026).

26. Зацерковний В. І., Демидов В. К., Цюпа І. В., Малік Т. М. Моделювання в ГІС. Підручник. Київ, 2024. 420 с.

27. Зацерковний В., Савков П., Пампуха І., Васецька К. Застосування технологій ГІС та ДЗЗ в задачах моніторингу лісових пожеж. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2020.44.54-58> (дата звернення: 11.03.2026).

28. Лісівництво: навч. посіб. / уклад. В. М. Хрик, І. В. Кімейчук. Біла Церква, 2021. 444 с.

29. Лісовий кодекс України. *Верховна Рада України. Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12#Text> (дата звернення: 25.01.2026).

30. Осадчий В., Орещенко А., Савенець М. Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря : монографія. Київ, 2023. 256 с.

31. Пугач С. О., Кайдик О. Л., Терлецький Т. В., Угрин Д. І., Вісин О. О. ГІС-інструменти для аналізу та моделювання надзвичайних ситуацій (на

прикладі пожеж у Волинській області). *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025. № 60. С. 466-475. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-49> (дата звернення: 21.04.2026).

32. Терлецький Т. В., Кайдик О. Л. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Інформаційні системи та технології охорони і безпеки» галузі знань 12 Інформаційні технології спеціальності 126 Інформаційні системи та технології денної та заочної форм навчання. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 53 с.

33. Ткач В. П. Ліси та лісистість в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. URL: <https://surl.li/ewtgwi> (дата звернення: 10.02.2026).