

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР гол. наук. співроб., д-р с.-г. наук, професор	(підпис) / (дата)	С.Зібцев (реферат, вступ, висновки, розд. 1, 2, 3, 4, 6)
Відповідальний виконавець ст. наук. співроб., канд. с.-г. наук, доцент	(підпис) / (дата)	В. Миронюк (розділ 2, 3, 4)
Старший науковий співробітник, канд. геогр. наук, с.н.с.	(підпис) / (дата)	В.Балабух (розд. 2)
Старший науковий співробітник, канд. с.-г. наук, с.н.с.	(підпис) / (дата)	М.Сбитна (розд. 1, 3)
Науковий співробітник, канд. с.-г. наук, доцент	(підпис) / (дата)	О.Морозюк (розд. 1, 3)
Науковий співробітник, канд. с.-г. наук	(підпис) / (дата)	В.Гуменюк (розд. 1, 4)
Науковий співробітник, канд. с.-г. наук	(підпис) / (дата)	О.Сошенський (розд. 1, 2, 3)
Науковий співробітник, канд. с.-г. наук, доцент	(підпис) / (дата)	С.Сендонін (розділ 2)
Молодший науковий співробітник	(підпис) / (дата)	В. Корень (розд. 1, 2)
Молодший науковий співробітник	(підпис) / (дата)	Т. Богомолова (розд. 5, 6)
Молодший науковий співробітник	(підпис) / (дата)	Б. Дубровець (розд. 1)
Провідний фахівець	(підпис) / (дата)	Т. Сошенська (розд. 2, 3)
Провідний фахівець	(підпис) / (дата)	І. Ретьман (розд. 2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 128 с., 46 рис., 14 табл., 57 джерел, 1 додаток.

Ключові слова: геопортал, веб-сторінка, композитний знімок, чорнобильська зона відчуження, пожежна небезпека лісів, природні пожежі.

Об'єкт дослідження – екосистеми Полісся України як вразливі до природних пожеж об'єкти.

Предмет дослідження – ландшафти, методи оцінювання ризику та поведінки природних пожеж, динаміка горимості в Українському Поліссі з використанням ГІС та даних ДЗЗ.

Мета роботи – створення вихідних наборів геопросторових даних та моделей, які описують основні параметри рослинного покриву та запасів горючих матеріалів у природних екосистемах Українського Полісся, в тому числі на територіях забруднених радіонуклідами.

Метод дослідження – експеримент, логічний, статистичний та математичний аналіз даних щодо горимості лісів, накопичення лісових горючих матеріалів, лісового фонду в Поліссі України.

Проаналізовано методи прогнозу ризиків природних пожеж на ландшафтному рівні, висвітлено роль інформаційних систем в управлінні природними пожежами, проаналізовано розроблені на даний час моделі розвитку пожеж, в тому числі можливість застосування моделі Ротермеля, як найбільш поширеної в світі. Проведено аналіз процесу моделювання розвитку пожеж з метою прогнозу ризиків, зокрема проаналізовано можливість застосування системи BehavePlus для імітаційного моделювання природних пожеж на ландшафтному рівні.

Надано характеристику структури геопросторової основи для моделювання пожеж на ландшафтному рівні, зокрема перелік необхідних кліматичних показників, топографічні параметри, характеристики моделей

горючих матеріалів території досліджень та склад веб-сторінок геопорталу. Запропоновано алгоритми класифікації супутникових знімків за типами земного покриву і класами горючих матеріалів, які будуть використовуватись при розробці геопорталу та зібрано характеристику базової інформації про стан земного покриву території дослідження.

Встановлено багаторічну динаміку пожеж на території Українського Полісся. Зокрема встановлено, що площа пожеж у Поліссі України коливається в межах 100-500 тис. га щорічно. Роками пожежних максимумів були 2002 рік (310 тис. га), 2008-2009 рр. (біля 425-393 тис. га), 2014-2015 рр. (390-495 тис. га) відповідно. Протягом пожежонебезпечного періоду найбільш небезпечними за період 2001-2016 рр. є березень (823 тис. га), квітень (440 тис. га), серпень (606 тис. га), вересень (714 тис. га) та жовтень (562 тис. га). Зібрано інформацію про площу та кількість природних пожеж за адміністративними одиницями. Проведено валідацію площі пожеж за даними супутникових знімків LANDSAT.

Розроблено технічне завдання та принципи дизайну геопорталу. Обґрунтовано вимоги та вибір програмних компонент для розробки геопорталу, в тому числі веб-дизайн, системи управління базами даних, визначено мови веб-програмування, вимоги до веб-серверу, надано опис засобів відображення карти на веб-сторінці, визначено склад сторінок геопорталу.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ВСТУП.....	7
1 КЛАСИФІКАЦІЯ ЛІСОВИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ	9
2 МЕТОДИ ПРОГНОЗУ РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ПОЖЕЖ НА ЛАНДШАФТНОМУ РІВНІ.....	16
2.1 Роль інформаційних систем для управління природними пожежами.....	16
2.2 Моделі розвитку пожеж	19
2.3 Моделювання розвитку пожеж як метод прогнозу ризиків	23
2.4 Огляд системи BehavePlus в контексті імітаційного моделювання природних пожеж на ландшафтному рівні	27
3 ГЕОПРОСТОРОВА ОСНОВА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖ НА ЛАНДШАФТНОМУ РІВНІ.....	36
3.1 Кліматичні показники території досліджень	37
3.2 Топографічні параметри території досліджень.....	45
3.3 Характеристика моделей горючих матеріалів території досліджень	48
3.4 Алгоритми класифікації супутникових знімків за типами земного покриву і класами горючих матеріалів	56
3.5 Характеристика опорної інформації про стан земного покриву..	63
4 БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА ПОЖЕЖ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ.....	70
4.1 Просторово-часовий розподіл кількості пожеж на території досліджень	70
4.2 Динаміка площі пожеж за адміністративними областями	79

4.3 Валідація площі пожеж за даними супутникових знімків LANDSAT	89
5 ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ РОЗРОБКИ ГЕОПОРТАЛУ	98
5.1 Веб-дизайн	99
5.2 Системи управління базами даних	100
5.3 Мови веб-програмування	101
5.4 Веб-сервер	112
5.5. Засоби відображення карти на веб-сторінці.....	115
6 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СКЛАД СТОРІНОК ГЕОПОРТАЛУ	117
6.1 Призначення геоportалу	117
6.2. Склад веб-сторінок геоportалу.....	118
ВИСНОВКИ	121
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	124
ДОДАТКИ	130

ВСТУП

Природні ландшафти Полісся України і, в першу чергу, ліси є головним середовищем рослинного та тваринного біорізноманіття, важливим фактором стабілізації гідрологічного режиму і клімату регіону. Зміни клімату та антропогенний вплив на екосистеми призвели до суттєвого погіршення стану та стійкості цих лісів, збільшення випадків всихання лісів, спрощення просторової і видової структури насаджень, накопичення сухостою та підвищення пожежної небезпеки. За таких умов актуальною науковою задачею є прогнозування ризиків виникнення природних пожеж, кількісна оцінка та моделювання головних компонент пожежного середовища ландшафтів та пожежної інфраструктури, що дозволить виділяти критичні з точки зору пожежної небезпеки ділянки ландшафтів, отримати динаміку накопичення горючих матеріалів та прогнозувати ризики виникнення природних пожеж.

Новизна наукового проекту полягає у тому, що вперше в Україні та Східноєвропейському регіоні буде розроблена та реалізована у вигляді прототипу інформаційна основа для прогнозування ризиків природних пожеж у ландшафтах Полісся України. Задля вирішення цього завдання передбачається удосконалити існуючі алгоритми моделювання динаміки пожеж із урахуванням особливостей природно-кліматичних умов Полісся України, створити базовий набір геопросторових даних, який включає топографічні показники місцевості, типи земного покриву та параметри деревної рослинності. Важливим науковим доробком досліджень є методика оцінки запасів горючих матеріалів в лісових екосистемах із використанням сучасних ГІС-технологій та даних ДЗЗ.

Дослідження базуються на принципово нових для вітчизняної лісопірологічної науки технологіях моделювання лісових пожеж. Зокрема, новій спеціалізованій методичній основі дешифрування супутникових

знімків для отримання тих показників насаджень, які визначають поведінку лісових пожеж, в першу чергу, породного складу та зімкнутості деревостанів.

В результаті досліджень буде вдосконалено методику оцінки наслідків пожеж за даними дистанційного зондування Землі, опрацьовано принципи використання часових серій супутникових знімків, одержаних різними системами, з метою встановлення фактичних просторо-часових характеристик пожеж, картографування згарищ і визначення їхньої реальної площі. Одержані результати дозволять встановити найбільш вразливі території й опрацювати алгоритми імітаційного моделювання параметрів пожежі, способів управління ними за різних сценаріїв.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ЛІСОВИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Пірологічна класифікація лісів в Україні і за кордоном здійснюється по двох напрямках: класифікація видів лісових (рослинних) горючих матеріалів, як пірологічної основи і класифікація лісів як об'єкту, де формуються однорідні комплекси лісових горючих матеріалів (ЛГМ).

До ЛГМ відносять лісові рослини (відмерлі або живі), а також їх залишки різного ступеня розкладання, які повністю або частково згорають при лісовій пожежі. Вони складаються в основному з клітковини, усереднений хімічний склад якої $C_6H_9O_4$. Теплота згорання сухих ЛГМ зазвичай варіює в межах 17-21 Мдж/кг.

По відношенню до зволоження і висихання ЛГМ діляться на дві великі категорії [30, 44, 46]:

- гігроскопічні, до яких відносять відмерлі ЛГМ (сухостій, трави, що всохли, опад, пеньки, порубкові залишки, вітролом, підстилка), а також несудинні рослини з відсутньою (лишайники) або погано розвиненою (мохи) кореневою системою. Вміст вологи в них постійно міняється залежно від гідрометеорологічних умов;

- негігроскопічні, живі рослини (дерева, самосів, підріст, підлісок, чагарники, чагарнички, трави), які здатні за рахунок добре розвиненої кореневої системи підтримувати в своїх тканинах певний рівень вологи.

Існують наступні підходи до класифікації ЛГМ:

- за можливістю і швидкістю їх висихання, використовується в Національній системі оцінки пожежної небезпеки лісів США - NFDRS (National Fire Danger Rating System) [7];

- за місцем, яке вони займають у фітоценозі [25];

- за їх походженням (генетична класифікація), запропонована М.А. Шешуковим [58, 60].

Класифікація ЛГМ може бути здійснена на трьох рівнях:

а) класифікація елементарних частин комплексів ЛГМ, включаючи окремі рослини з надґрунтового покриву, підросту, чагарників, опад і деревні залишки на ґрунті, морфологічні частини дерев і тому подібне, яка не зачіпає дрібні частинки, що розглядаються в сукупності у вигляді шарів (підстилка, торф і ін.);

б) класифікація шарів ЛГМ усередині лісових ділянок;

в) класифікація однорідних лісових ділянок як складних комплексів ЛГМ.

У національній системі оцінки пожежної небезпеки США ЛГМ діляться на дві категорії [7]: відмерлі (*dead fuel*) і живі (*live fuel*). Живі рослини зазвичай здатні підтримувати свою високу вологомісткість, тоді як вологомісткість відмерлих ЛГМ залежить від процесів їх зволоження і висихання під впливом погодних умов.

Відмерлі ЛГМ розділені за здатністю утримувати вологу на чотири класи: легкі, середні, важкі і дуже важкі. У NFDRS стандартними умовами повітряного середовища є температура повітря +26,5 °C і відносна вологість повітря 20 %, саме за таких умов розраховано поділ ЛГМ за здатністю утримувати, або випаровувати, вологу. За основу розрахунків було взято час за який при стандартних умовах випаровується 2/3 вологи із ЛГМ. До першого класу (1-hour time lag fuel) відносяться ЛГМ з середнім часом випаровування 2/3 вологи - 1 година. До таких ЛГМ відносять сухі трав'янисті рослини і сухі рослинні частки діаметром до 6 мм (опад хвої і тонких гілочок). До другого класу (10-hours time lag fuel) відносяться ЛГМ з середнім часом випаровування 2/3 вологи – 10 год. Зазвичай, це опалі гілки діаметром від 6 до 25 мм. До третього класу (100-hour time lag fuel) відносяться ЛГМ з середнім часом випаровування 2/3 вологи – 100 год. Зазвичай, це повалені дерева або порубкові залишки діаметром від 26 до 75 мм. До четвертого класу (1000-hour time lag fuel) відносяться ЛГМ з середнім часом випаровування 2/3 вологи – 1000 год., як правило повалені дерева, опалі гілки розміром понад 75 мм.

Живі ЛГМ (*life fuel*) діляться на два класи: 1) трави і трав'янисті рослини; 2) хвоя, листя і гілки діаметром менше 6 мм. Згідно даних обстеження горільників, діаметр 6 мм – це верхня межа діаметру живих деревних матеріалів, які повністю згорають при лісовій пожежі.

У Канаді для оцінки і прогнозування лісопожежної ситуації використовується система CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System). Вона складається з чотирьох підсистем: 1) підсистема індексної оцінки пожежної небезпеки в лісах за умовами погоди FWI; 2) підсистема прогнозу поведінки лісової пожежі FBP; 3) підсистема Assessor Fuel Moisture System, що дозволяє оцінювати вологомісткість лісових горючих матеріалів, відмінних від «стандартного» типу; 4) підсистема для прогнозування виникнення пожеж від блискавок і з вини людини.

У канадській класифікації ЛГМ ділять на три великі групи: 1) ґрунтові (*ground fuels*), такі, що включають гумус, торф, коріння; 2) надґрунтові (*surface fuels*), включають опад листя і хвої, трав'яну рослинність, дрібні кущики, сухостій; 3) горючі матеріали у кронах (*crown fuels*), гілки з хвоєю і листям, відмерлі сучки.

Основоположником російської класифікації є Н.П. Курбатський [44], який розділив всі ЛГМ на три категорії: 1) провідники горіння; 2) ті, що підтримують горіння; 3) ті, які затримують горіння.

Окрім того, Н.П. Курбатський виділив сім груп ЛГМ:

I – мохи, лишайники і дрібні рослинні рештки;

II – підстилка, перегнійний і торф'яний горизонти ґрунту;

III – трав'яна рослинність і напівкущики;

IV – крупні деревні рештки (сухостій, сухі сучки, пні, порубкові рештки);

V – підріст, кущі;

VI – хвоя і листя дерев, що ростуть (разом з дрібними гілочками до 7 мм);

VII – стовбури дерев, що ростуть, і живі сучки товстіше 7 мм.

Окрім Н.П. Курбатського класифікацією ЛГМ займався Е.В. Конев [42]. Є.М. Валендік, М.П. Матвеев та М.А. Софронов розробили класифікацію ЛГМ по черговості загоряння із врахуванням типів лісу і типів лісорослинних умов [29]. Також пізніше, М.А. Софронов, А.В. Волокитіна запропонували використовувати клас засухи. Характеристика території по можливих видах, силі і наслідкам пожеж доповнює оцінку природної пожежної небезпеки лісів.

М.А. Шешуков запропонував класифікацію ЛГМ за типами, для лісів Далекого Сходу з урахуванням їх щільності [59]. Для Далекого Сходу М.А. Шешуков виділив 8 типів ЛГМ:

- хвойний тип (опад хвої і підстилка);
- листопадний тип (опад листя з підстилкою);
- трав'яний тип (опад трав'янистої рослинності з підстилкою або дерниною);
- лишайниковий тип (лишайники з підстилкою);
- зеленомошниковий тип (зелені мохи з підстилкою);
- сфагновий тип (сфагн з рештками торфу);
- багновий тип (багно з підстилкою);
- бамбуковий тип (бамбук з підстилкою).

Виділені типи ЛГМ дуже неоднорідні за пірологічними властивостями, що є основним недоліком цієї класифікації. Вказані недоліки були відмічені і усунені А.В. Волокитіною і М.А. Софровим [31, 32, 30], що поділили ЛГМ на 7 груп.

На думку Ю.А. Міхалева [49] систематизацію і класифікацію лісів у пірологічному відношенні необхідно здійснювати через пірологічну оцінку таксаційних характеристик лісів і виділення на цій основі класів, типів, моделей. Теоретичне значення пірологічної класифікації лісів полягає в можливості глибшого пізнання законів самоорганізації лісів під впливом вогню і визначення на цій основі ефективних шляхів їх збереження. Практичне значення пірологічної класифікації лісів полягає в можливості

виділення територіальних таксономічних облікових одиниць, що визначають однорідність пірологічних властивостей і наслідків.

Лісові горючі матеріали, як правило, представлені комплексами [57]. Склад комплексів визначає таксаційна характеристика ділянки (виділу). Однорідність комплексів надґрунтових горючих матеріалів в межах таксаційної ділянки залежить від якості контурного дешифрування виділу при лісовпорядкуванні. У однорідному виділі буде представлений однорідний склад горючих матеріалів.

За існуючими у лісовій пірології класифікаціями лісових горючих матеріалів сухостій відносять: залежно від ярусного розташування – до групи наземних лісових горючих матеріалів, за займистістю – до первинних об'єктів, що часто загоряються [47, 48], за здатністю підтримувати горіння – до групи лісових горючих матеріалів, що підтримують горіння [47, 54], або до провідників горіння [36].

Істотним недоліком вищенаведених класифікацій є те, що сухостій як лісовий горючий матеріал, розглядається без диференціації за ступенем розкладання. Він є неоднорідним лісовим горючим матеріалом, що включає залежно від фітоценотичної приналежності і пори року як часто гориму (власне сухостій і мохи, що покривають його), так рідко гориму (зростаючі на території сухостійного лісу чорниця, брусниця і ін. чагарнички) і дуже рідко гориму (зростаючі на території сухостійного лісу широколисті трави у вегетуючому стані) частини, співвідношення яких визначається ступенем розкладання сухостоїв [38, 39, 40]. Окрім цього, розкладання сухостою в природних умовах супроводжується збільшенням його вологості [52, 53], яка є найважливішою пірологічною характеристикою, що визначає горимість лісових горючих матеріалів. У зв'язку з цим залишається відкритим питання про роль сухостоїв в розповсюдженні лісових пожеж і їх місце в класифікації лісових горючих матеріалів.

На підставі отриманих результатів досліджень сухостою білоруські вчені [40], вважають обґрунтованим віднесення сухостою 4-5-ї стадій

розкладання (діаметр основи більше 20 см) до групи лісових горючих матеріалів, що знижують або затримують швидкість горіння при низовій пожежі і виконують роль природного вогнезахисного бар'єру в соснових і ялинових лісах в свіжих і вологих умовах місцезростання.

Відмінності в підходах і формах представлення класифікацій свідчать про те, що до теперішнього часу в лісовій пірології немає загальноприйнятої класифікації ЛГМ, що перешкоджає уніфікації нормативно-довідкових матеріалів і можливості застосування даних лісовпорядкування, а також ускладнює формалізацію початкових даних, необхідну при використанні сучасних інформаційних технологій.

Знання характеристики ЛГМ (структури, запасу, вологості, теплотворної здатності) має велике значення для розуміння процесу виникнення і розвитку лісових пожеж, профілактики, засобів і способів боротьби з пожежами, оцінки природної пожежної небезпеки лісових насаджень, розрахунків можливої поведінки діючих пожеж під час боротьби з ними [45].

Існує багато методів і методик дослідження лісових горючих матеріалів, але найчастіше науковці застосовують методики закладання пробних площадок. Важливу роль у розумінні процесу виникнення й розвитку лісових пожеж відіграє знання структури, запасу та температури горіння підстилки як одного з основних об'єктів загорання в лісі. Особливо важливим це є для сосняків Українського Полісся, для яких характерні значні запаси підстилки.

Науковцями УкрНДІЛГА [34, 35] в лабораторних умовах були проведені дослідження температурних режимів горіння лісової підстилки соснових насаджень Українського Полісся. Встановлено особливості динаміки параметрів горіння для лісової підстилки з різних едатоїв та якісно оцінено вплив вітру на параметри горіння.

Також лабораторними дослідженнями пожежонебезпечних властивостей найпоширеніших видів лісових горючих матеріалів займаються

науковці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності [43]. У лабораторних умовах за стандартною методикою визначено температуру займання хвої сосни звичайної, листя дуба звичайного, граба звичайного, вільхи чорної (свіжозірваного і сухого) та сухих фрагментів надземної частини деяких трав'яних рослин і чагарників. Виявлено, що температура займання свіжозірваної хвої є нижчою, ніж сухої. Для листя дерев спостерігається зворотна залежність, а найнижчою є температура займання листя вільхи чорної. Температура займання досліджених сухих трав'яних рослин і чагарників перебуває у межах 220-264 °С. Визначено і температуру полум'я під час горіння лісових горючих матеріалів, яка для деревних рослин є найбільшою для хвої сосни звичайної, а найменшою для листя вільхи чорної.

Таким чином, в світі розроблені декілька класифікації лісових горючих матеріалів, які використовуються для прогнозування пожежної небезпеки та поведінки пожежі. Серед них підходи розроблені у США є найбільш розповсюдженими для цілей моделювання запасів, структури та вологості на рівні регіону та у глобальному масштабі. Перевагою використання даної класифікації є те, що на ній базується цілий ряд безкоштовного програмного забезпечення наукового і практичного спрямування, що частково може бути використано і для розробки пірологічного геопорталу.

2 МЕТОДИ ПРОГНОЗУ РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ПОЖЕЖ НА ЛАНДШАФТНОМУ РІВНІ

2.1 Роль інформаційних систем для управління природними пожежами

Пожежі є одним із ключових видів порушень, які впливають на стан екосистем. У зв'язку з цим ефективне управління природними пожежами потребує належної інформаційної підтримки, яку забезпечують сучасні геопросторові бази атрибутивних даних про ключові параметри ландшафтів. Нині в багатьох країнах розроблено та активно використовується багато інформаційних ресурсів, завданнями яким є підтримка прийняття рішень щодо управління пожежними режимами територій.

Однією з найвідоміших програм такого роду є міжвідомчий геопортал США LANDFIRE – Landscape Fire and Resource Planning Tools¹. Він надає вільний доступ до різноманітних наборів просторових даних, що описують існуючі типи рослинного покриву, видову структуру рослинності, пожежні режими для всієї території країни. У сучасних умовах LANDFIRE застосовується в численних дослідженнях, пов'язаних із оцінкою та управлінням природними ресурсами, моделюванням ризиків, спричинених пожежами. Для цієї мети в порталі призначено низку тематичних шарів, що характеризують просторовий розподіл і типи горючих матеріалів. Детальний опис параметрів ландшафтів у форматі ГІС дозволяє аналізувати різноманітні стратегії з управління пожежами, оцінювати ймовірні ризики пожеж, вивчати вплив зовнішніх факторів на просторовий розподіл, кількість та площу пожеж. Одним із прикладів застосування геопорталу є інтеграція даних в інші ресурси з оцінки впливу пожеж на довкілля, зокрема моніторинг викидів вуглецю.

¹ <https://www.landfire.gov/>

Для підтримки LANDFIRE використовується багато джерел інформації, включаючи географічно прив'язані пробні площі, відбитки історичних порушень екосистем (контури пожеж), супутникові дані Landsat, цифрові моделі рельєфу території та відповідні похідні шари (ухили, експозиція схилів). Станом на 2013 рік портал містив понад 800 тис. пробних площ із показниками стану рослинного покриву та запасів горючих матеріалів. Більшість із них одержано на основі угод про спільне використання даних із програмою національної інвентаризації лісів FIA, неприбутковими та приватними компаніями, що володіють інформацією про параметри природних ландшафтів на регіональному та локальному рівнях.

Повне покриття території США та детальність геопросторових даних створюють можливості для моделювання природних пожеж. Оцінка ризиків здійснюється на основі аналізу ймовірності виникнення пожеж – burn probability – растрової карти з прогнозованими рівнями небезпеки. З цією метою розроблено деякі спеціальні продукти, що дозволяють виконувати імітаційне моделювання пожеж на ландшафтному рівні. Серед них треба відзначити такі програмні продукти, як FARSITE, FlamMap тощо.

Міністерство природних ресурсів Канади наразі оперує відразу двома національними інформаційними системами для управління лісовими пожежами: канадська інформаційна система з лісових пожеж (Canadian Wildland Fire Information System – CWFIS) і система моделювання, моніторингу та картування пожеж (Fire M3). Вони засновані на компонентах канадського підходу щодо оцінки лісової пожежної небезпеки (Canadian Forest Fire Danger Rating System – CFFDRS) і використовують ресурси системи просторового управління пожежами (Spatial Fire Management System – sFMS) для отримання, управління, моделювання, аналізу та презентації інформації.

Канадська методика використовується в деяких інших країнах, зокрема, Нова Зеландія, Аргентина, Мексика, Індонезія, Малайзія. Система була успішно використана також в Фінляндії та Швеції [22]. Канадська

методика прогнозування лісової пожежної небезпеки побудована з урахуванням аналізу великої кількості статистичних даних і досить точно прогнозує пожежну небезпеку [16]. Метеорологічні параметри одержують з точкових джерел вимірювань (мережа Канади і північної частини США налічує близько 900 метеорологічних станцій), інтерполуються для отримання просторової деталізації осередків загорань із просторовим розрізненням 1 км.

В Австралії найбільш поширеними є дві системи, які використовуються в охороні лісу від пожеж: показник лісопожежної небезпеки (Forest Fire Danger Index – FFDI) МакАртура, який використовується в східній частині Австралії, і таблиці динаміки лісових пожеж (Forest Fire Behaviour Tables – FFBT), які використовуються в Західній Австралії [16]. Дослідження, [17] проведені в період з кінця 1950-х років до початку 1960-х, привели до розробки показника лісопожежної небезпеки (Forest Fire Danger Index – FFDI) і показника лугової пожежної небезпеки (Grassland Fire Danger Index – GFDI). Вони були розроблені та апробовані в Південно-Східній Австралії. Запропонований метод оцінки пожежної небезпеки, як і канадський, заснований на статистичному аналізі великих обсягів експериментальних даних. Експерименти, проведені на луговій рослинності і в евкаліптових лісах, полягали в контрольованому підпалі горючих матеріалів і спостереженні за пожежею протягом 15–60 хв. FFDI дозволяє прогнозувати ймовірність виникнення пожежі, швидкість розповсюдження, інтенсивність і складність ліквідації. На основі індексу FFDI дослідницька група CSIRO по лісовим пожежам розробила комп'ютерну систему SiroFire (2004) – спеціальний додаток для підтримки прийняття рішень на базі персонального комп'ютера.

Слід відзначити італійську систему CHARADE, спрямовану на підтримку прийняття рішень під час гасіння лісової пожежі [2]. Підтримка прийняття рішень полягає в оцінці ситуації при пожежі й побудові оперативного плану гасіння та заснована на прецедентному підході (CBR –

case-based reasoning). Система спрямована на вирішення двох основних завдань: складання плану гасіння в разі лісової пожежі й тренування персоналу, який бере участь в гасінні лісових пожеж.

2.2 Моделі розвитку пожеж

Із метою мінімізації екологічного, економічного збитку, числа жертв, а також раціонального використання коштів на охорону лісів від пожеж одним з найголовніших екологічних завдань постає прогнозування природних пожеж та розробка програми відповідних запобіжних засобів. Сучасні методи моделювання пожеж дозволяють спрогнозувати хід їхнього поширення, наслідки, тривалість і ситуативну поведінку. Реалізація таких методів передбачає обробку великої кількості даних, що вимагає значних ресурсів і є неможливим без використання сучасних багатопроцесорних систем та розподілених обчислень.

На сьогоднішній день відомий ряд робіт з моделювання горіння рослинних матеріалів під час пожежі. Перші з них, які стосуються проблеми лісових пожеж датуються 1920-1950 рр. (дослідження Мітчелла, Каррі, Фонса, Амосова, Девіса, Байрама, Вонського, Мелехова, Анцишкіна) [20]. Кожна з цих робіт присвячена дослідженню окремих питань, таких як теплофізичні властивості рослинних горючих матеріалів, способи передачі тепла при пожежі тощо. Ці роботи поклали початок теорії лісових пожеж, проте вони не можуть бути використані на практиці через суто теоретичну спрямованість. У 1960–1970 рр. були спроби детальнішого вивчення процесу горіння, а також побудовані відповідні моделі (Ліндермут, Байрам, Ванвагнер, Тепліцин, Томас, Андерсен, Ротермель, Амосов) [2, 20]. Проте й вони не достатньо повно описували процес поширення лісової пожежі. Лише в останні десятиліття з'явилися роботи, які більш широко враховують весь комплекс фізико-хімічних процесів, що протікають під час пожежі, а завдяки

розвитку комп'ютерної техніки такі моделі отримали можливість практичного застосування.

Всі математичні моделі лісових пожеж, які лежать в основі систем оцінки лісової пожежної небезпеки, згідно Вебера (1991) [28], можуть бути розділені на три групи: емпіричні (або статистичні), напівемпіричні (або лабораторні) і фізичні (або аналітичні). У реальних завданнях прості емпіричні моделі трансформуються в складніші – фізичні моделі.

Експериментальний комплекс з емпіричною моделлю обмежений сферою застосовності, для якої модель створена. Повні фізичні моделі позбавлені обмежень, але вони рідше використовуються, оскільки такий детальний підхід вимагає введення точних даних. Розрахунки за фізичними моделями зазвичай повільні та, значною мірою, надлишкові. Тому напівемпіричні моделі частіше обираються для практичного застосування.

Емпіричні моделі бувають статистичні та стохастичні, можуть включати дані статистики пожеж минулих років, усереднюючи параметри прогнозування лісових пожеж, отриманих з експериментальних лабораторій. Дві емпіричні моделі широко використовувалися в Австралії та Канаді. В Австралії – модель МакАртура, що відтворює наземні у т.ч. лісові пожежі. Вона не робила жодної спроби використовувати фізичні механізми при поширенні вогню і була виключно статистичною, описуючи параметри за результатами спостережень. Модель перевірялася в посушливих регіонах південного сходу Австралії. Лісова канадська служба 25 років проводила дослідження реальних сценаріїв поширення пожеж і сформувала Канадську систему прогнозування поведінки лісових пожеж, яка доступна нині в електронному вигляді. Це система, що містить 89 формул, отриманих дослідним шляхом і зведених у вигляді таблиць, вважається однією з сучасних моделей прогнозування пожеж.

Напівемпіричні моделі ґрунтуються на глобальній енергетичній рівновазі (Бойко, 2008) і на припущенні, що енергія, яка отримується ще незгорілим матеріалом, пропорційна тій енергії, що вивільняється під час

горіння. Деякі елементи моделі мають бути підібрані з результатів лабораторних експериментів з вогнем. Простота цього підходу дозволяє розробляти оперативні методи прогнозування ризиків, спричинених пожежами.

Найбільш важлива напівемпірична модель, створена Ротермелем у 1972 р. [20]. Її покладено в основу багатьох систем прогнозу в США та в інших країнах. Модель розроблено для передбачення швидкості поширення вогню у фронті пожежі, залежно від наявності легкозаймистих матеріалів (ЛЗМ), погодних умов та особливостей рельєфу.

Вхідні дані для моделі Ротермеля діляться на три типи:

- 1) властивості часток ЛЗМ – тепловміст, мінеральний вміст, щільність часток;
- 2) структура масиву часток ЛЗМ (запас ЛЗМ, середній розмір часток, середня висота шару);
- 3) параметри довкілля (швидкість вітру, вологість, наявність ЛЗМ, нахил поверхні).

Модель Ротермеля є основою для багатьох систем прогнозування пожеж і встановлення передумов їх виникнення. Національна система оцінки лісової пожежної небезпеки NFDRS (1972) і комп'ютерна система прогнозу пожеж VENAVE (1984) засновані на моделі Ротермеля [20].

Спільно з моделлю Ротермеля часто використовується модель Байрама. Вона визначає інтенсивність фронту пожежі ($\text{кВт}\cdot\text{м}^{-1}$) на основі питомої теплоти згоряння ЛЗМ ($\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}$), запасу ЛЗМ ($\text{г}\cdot\text{м}^2$) і швидкості поширення вогню ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$). Моделі Ротермеля і Байрама застосовувалися на прикладі різних екосистем і лісових горючих матеріалів Північної та Південної Америки, Південної Африки, Франції й Австралії. Прогноз за моделлю Ротермеля в умовах саван виявилися достовірними в широкому діапазоні параметрів. Водночас значні похибки виникали в складніших за структурою екосистемах.

Фізичні моделі лісових пожеж засновані на законах збереження маси, руху й енергії для всіх елементів системи (грунт, лісові горючі матеріали, повітря) і значно відрізняються за детальністю опису. Основними процесами є перенесення тепла (теплопровідність, конвекція та випромінювання) і турбулентний потік газу. Складні хімічні реакції піролізу дерева та горіння з великою кількістю проміжних компонентів замінюються, як правило, процесами утворення твердих і газоподібних продуктів горіння.

На практиці використовуються як двовимірні, так і тривимірні моделі. Двовимірний опис процесів на площині, що відповідає «лінійній» пожежі, може використовуватися для порівняння або розробки моделей, але має обмежену практичну цінність. Двовимірна «горизонтальна» модель базується на наступних припущеннях:

- 1) горючі матеріали зосереджені на поверхні;
- 2) висота шару повітря мала порівняно з лінійними масштабами.

Ця модель, очевидно, не описує власне верхову пожежу, але може застосовуватися під час оцінювання її наслідків.

Для верхової пожежі потрібна повна тривимірна модель, пов'язана (в разі сильної пожежі) з регіональною моделлю атмосферної динаміки. Складність створення адекватної моделі цього процесу визначається рядом чинників: необхідністю розробити модель тривимірного розподілу лісових горючих матеріалів, що включає ряд параметрів, описує міру нерівномірності розподілу, який має хаотичний характер як самого горіння, так і атмосферних течій; а також – широким масштабом завдання.

Очевидно, що модель має бути системою ієрархічних субмоделей для різних масштабів. Найпростіший зв'язок між моделями – використання параметризації, що дозволяє зменшити масштаби (апроксимація за допомогою нейронних мереж, багатопараметрична регресія тощо). Перспективним видається адаптивне використання моделей, тобто процеси догорання вогнища під час пожежі можуть описуватись простішими, ніж фронт вогню засобами. Хаотичний характер динаміки пожежі вимагає

розгляду безлічі варіантів розрахунку для оцінки вірогідності прогнозу. Нарешті, для математичної моделі реальної лісової пожежі як способу підтримки прийняття рішень необхідне коригування результатів розрахунків на основі поточних даних дистанційного зондування Землі [4, 5]. У зв'язку з цим, важливим елементом запропонованої системи має стати процедура асиміляції експериментальних даних у розрахункову модель.

Верифікація моделі включає два етапи: перевірку точності чисельного вирішення рівнянь і оцінку відповідності моделі реальності. Останнє, у разі лісових пожеж, викликає серйозні труднощі. Однак, лабораторні експерименти щодо горіння лісових матеріалів, безумовно, необхідні і дозволяють, наприклад, визначити необхідні параметри моделі горіння однорідного шару горючих матеріалів за відсутності вітру на горизонтальній поверхні.

Отже, застосування математичного моделювання є важливим, щонайменше, для дослідження ефективності заходів попередження та оперативного гасіння пожеж.

2.3 Моделювання розвитку пожеж як метод прогнозу ризиків

Аналіз ризиків відноситься до вимірювання та передачі неочікуваних майбутніх подій екстремальних наслідків. Як правило, аналіз ризику фокусується на подіях з низькою вірогідністю негативних наслідків, які є стохастичними в просторі та часі. Він виконується, коли прогнозовані результати невизначені, однак можливі наслідки можуть бути описані з визначеним рівнем достовірності. Аналіз ризиків дозволяє краще зрозуміти час, місце та потенційні втрати, завдані природними пожежами.

Останніми роками відбувся суттєвий розвиток і вдосконалення інструментів аналізу ризиків природних пожеж. Досягнення в системах оцінки ризиків в основному обумовлені поліпшенням програмного забезпечення, системної інтеграції, доступності даних, ГІС і методів

моделювання [2, 9, 19]. Комп'ютерні моделі можуть відтворити поширення пожежі з урахування наявних горючих матеріалів та одержати параметри пожежі в конкретному ландшафті [1]. Сучасні досягнення в питаннях моделювання пожеж сприяли кількісній оцінці ймовірності виникнення пожеж, їхній інтенсивності та ймовірних наслідків у просторово-часовому форматі.

Інтенсивність пожежі представлена рядом показників, включаючи інтенсивність вогню, довжину полум'я й умови виникнення верхової пожежі. Оцінки залежать від конкретної моделі поведінки пожежі та припущень щодо ймовірних погодних умов, стану та запасу горючих матеріалів. Наприклад, довжина полум'я може бути оцінена шляхом моделювання поведінки пожеж за незмінних погодних умовах [9] або шляхом внесення певної варіабельності в діапазоні ймовірних погодних умов, що змінюють швидкість і напрямки поширення вогню [3].

Світова наукова спільнота по-різному застосовувала термін «ризик» у контексті моделювання пожеж, що призводить до плутанини, незважаючи на зусилля по стандартизації цього визначень. Відповідно до визначення товариства з оцінки ризиків²: 1) ризик являє собою потенціал для реалізації небажаних, несприятливих наслідків для життя, здоров'я, майна або навколишнього середовища людини; 2) оцінка ризику заснована на очікуваному значенні умовної ймовірності події, що відбувається під час події, якщо воно сталося. Відповідно до цього, ризик являє собою очікування втрати та включає в себе певну оцінку трьох компонентів ризику: 1) ймовірність події; 2) очікувана інтенсивність і 3) один або кілька наслідків, пов'язаних з очікуваною інтенсивністю. У контексті сучасного розуміння цього питання, під час, скажімо, лісової пожежі можуть бути одержані як негативні, так і як позитивні ефекти.

² <http://www.sra.org/resources>

Небезпека пожежі – це комбінація ймовірності, інтенсивності та наслідків, спричинених пожежею. Висока ймовірність пожежі не обов'язково означає високий ризик пожежі, якщо інтенсивність пожежі занадто низька. Базова задача оцінки ризику пожежі – інтерпретація аналогічних рівнів ризику, що виникають з абсолютно за різних комбінацій компонентів ризику.

Отже, ризик пожежі може бути представлений такими поняттями як ймовірність займання – «ignition probability» та ймовірність вигорання – «burn probability». Як правило, вірогідність займання статистично моделюється з використанням даних про випадки пожеж, а ймовірність вигорання оцінюється на основі моделювання. Ці два подання ризиків можуть істотно відрізнятися у просторі та, як правило, використовуються для різних цілей. Наприклад, оцінка ймовірності займання використовується для визначення точки початку випадкової пожежі під час імітаційного моделювання, а ймовірність вигорання частіше застосовується для управління горючими матеріалами.

Оцінки трьох основних компонентів пожежонебезпеки (ймовірність, інтенсивність і наслідки) та факторів, які їх викликають, необхідні для оцінки ризику. В окремих випадках достатнім є визначення ймовірності займання (ignition probability), тоді як в інших використовується ймовірність вигорання (burn probability). Хоча burn probability частково залежить від ignition probability, визначальним є подальше розповсюдження вогню. Точність моделювання можна оцінити за історичними даними про площу, кількість, а також просторовий розподіл пожеж.

Численні дослідження присвячено оцінці ризику лісових пожеж як в контексті їхньої появи (ignition probability), так і поширення (burn probability). Відповідні статистичні методи застосовуються для оцінки людського фактору, методів управління горючими матеріалами на ймовірності виникнення та поширення пожеж. Встановлено, що ймовірність виникнення пожежі, зазвичай, корелює з такими факторами, як рівень ведення сільського господарства, фермерства, близькість поселень, відстань до транспортних

маршрутів тощо [15]. У всьому світі людська діяльність спричиняє більшість лісових пожеж. Навіть в країнах Середземномор'я понад 90 % лісових пожеж викликані людьми (ФАО, 2007). Там, де причиною виникнення лісових пожеж є антропогенний фактор, вивчення ймовірності займання може бути особливо цінним для менеджерів, правоохоронних органів і пожежних служб. Наприклад, оцінка ймовірності займання використовуються для імітації ефективності початкової атаки [11].

Картографування ризиків базується на моделях поведінки природних пожеж. Моделі прогнозування швидкостей поширення полум'я на поверхні землі та в короні, перехід низової пожежі у верхову та її поширення в кроні використовуються окремо або в поєднанні для картографування ризиків. Для цього доступні різні програмні продукти, серед яких канадська система Canadian Forest Fire Danger Rating System, NEXUS, VS-FFE, BehavePlus, FOFEM тощо. Ці інструменти були спочатку розроблені для створення точкових оцінок поведінки пожеж і пов'язаних з ними ефектів, проте для відображення пожеж на великих ландшафтах обов'язковим є використання методів картографування в ГІС. У Канаді інструменти ГІС були інтегровані з системою оцінки пожежної небезпеки з метою зіставлення потенційних характеристик поведінки пожеж, а в США застосування FlamMap значно поліпшило можливість дослідження інтенсивності вогню на великих територія [1].

Нещодавно розроблений підхід для картографування пожежної небезпеки FIREHARM – дозволив удосконалити моделювання ефектів високого просторового розрізнення (100 м) [1]. Цей підхід використовує просторово орієнтовані дані про щоденні історичні показники кліматичних умов, що дозволяє відкоригувати добову вологість горючих матеріалів з урахуванням історичного діапазону мінливості умов погоди. Це відрізняється від багатьох інших підходів, які відображають небезпеку за умови статичних і, зазвичай, екстремальних погодних умов. FIREHARM використовує щоденні зміни у вологості горючих матеріалів, а також існуючі моделі

поведінки пожеж і моделювання ймовірностей небезпечних природних пожеж.

Опис ризику пожежі вимагає поєднання ймовірності та небезпеки. Для цього використовується два загальних підходи: розробка рейтингів або індексів ризику і те, що прийнято називати в США, інтегральною моделлю ризику (IRM). Індекс ризику і рейтинговий підхід широко використовуються для державних і регіональних оцінок в США. Ці оцінки виконують цілий ряд функцій, включаючи ідентифікацію районів, які найбільш схильні до дії вогню та можуть бути пом'якшені. Вони також можуть полегшити зв'язок між агентствами під час ліквідації пожеж, або місцевими жителями.

Одним із важливих досягнень у питаннях аналізу ризиків стала можливість моделювати часову динаміку пожежонебезпеки. Більшість досліджень ризику використовували статичні функції, враховуючи тільки безпосередні ефекти пожежі. Однак, функції, що описують тільки короточасні пожежні ефекти, можуть недооцінювати ефекти в разі затримки смертності дерев або завищувати ефекти в разі швидкого відновлення рослинності. Однією з спроб оцінити стан відновлення деревостану після пожежі в рамках оцінки ризиків є модель FTM [15]. FTM оцінює ризик пожежі, але також враховує потенціал відновлення деревостану. Моделі відновлення вегетації використовуються, щоб врахувати часові зміни компонентів ризику. Наприклад, Finney et al, [9] використовували версію симулятора лісової рослинності FVS-FFE для вивчення кількох різних сценаріїв управління горючими матеріалами на ймовірність пожежі для трьох західних областей США. Сценарії включали випадкове і оптимальне розміщення горючих матеріалів [9] з різними розмірами одиниць, де виконувалися заходи зі зменшення запасів горючих матеріалів.

2.4 Огляд системи BehavePlus в контексті імітаційного моделювання природних пожеж на ландшафтному рівні

Система BehavePlus – це вдосконалена версія BEHAVE, що використовує ті ж математичні моделі. Як вхідні параметри застосовуються температура, відносна вологість повітря, швидкість і напрям вітру, ухил місцевості, моделі горючих матеріалів, їхня вологість за класами розмірів. Такий набір параметрів дозволяє повністю відтворювати умови пожежі. У BehavePlus використовується 13 оригінальних моделей горючих матеріалів за Андерсеном (fuel model (FM)), та динамічні моделі за Scott & Burgan (2005) [21]. На основі моделі Р. Ротермела (1972) [20] в системі BehavePlus передбачено обчислення 189 вхідних змінних і вихідних параметрів пожежі, які упорядковані в 13 груп: 1) швидкість поширення та інтенсивність низової пожежі; 2) поверхневі горючі матеріали; 3) вологість поверхневого шару горючих матеріалів; 4) швидкість і напрям вітру; 5) ухил місцевості; 6) параметри верхової пожежі; 7) розмір безпечної зони; 8) розмір та форма полум'я; 9) тактика зупинки вогню; 10) вимірювання відстані; 11) висота факела полум'я; 12) деревна смертність; 13) ймовірність загоряння. Моделювання пожеж переважно базується на експертній оцінці можливого сценарію їхнього розвитку, а перелічені показники є критеріями, за якими визначається відповідність прогнозних параметрів пожежі реальним умовам. У зв'язку з цим, варто зупинитися основних поняттях більш детально.

Швидкість поширення та інтенсивність низової пожежі

Швидкість поширення (Surface Rate of Spread) – це швидкість вогню на поверхні, під час якого згорають поверхневі матеріали. Вони включають трав'янисті рослини, кущі, іншу мертву та живу рослинність в межах приблизно 6 футів над землею.

Довжина полум'я (Flame Length) – стосується низової пожежі, що розповсюджується в межах вогняного фронту, вимірюється з середньої точки в активній зоні горіння до середнього кінця вогню (рис. 2.1). Довжина полум'я пов'язана з інтенсивності вогню, у зв'язку з цим є функцією швидкості розповсюдження та температури пожежі на одиницю площі.

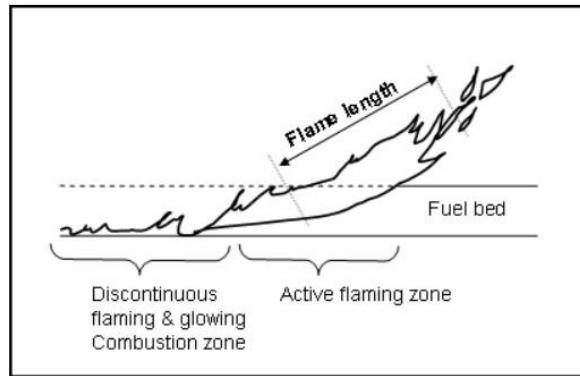


Рисунок 2.1 – Моделювання низової пожежі: довжина полум'я

Інтенсивність вогню (Fireline Intensity) – це теплова енергія, що виділяється у результаті згорання горючих матеріалів у смужі завширшки 1 м (1 фут) між фронтом і задньою кромкою вогню (рис. 2.2). У фізичному розумінні – це функція швидкості розповсюдження та температури на одиницю площі, що безпосередньо пов'язана з довжиною полум'я.

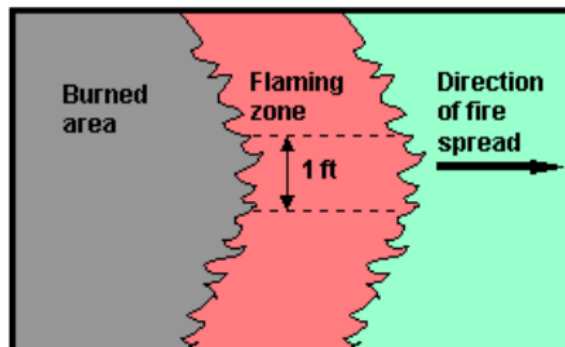


Рисунок 2.2 – Моделювання низової пожежі: інтенсивність вогню

Тепло на одиницю площі (Heat per Unit Area) – виділення теплової енергії на одиницю площі (1 фут^2 або 1 м^2) всередині палаючого фронту поверхневих горючих матеріалів. На цей показник не впливає вітер, ухил місцевості або напрям вітру, він залежить лише від горючих матеріалів.

Інтенсивність реакції (Reaction Intensity) – це швидкість викиду енергії на одиницю площі (1 фут^2 або 1 м^2) в межах фронту полум'я.

Напрямок максимального поширення (Direction of Maximum Spread) – розраховується на підставі ухилу місцевості, швидкості та напрямку вітру.

Діаграма характеристик вогню (*Fire Characteristics Chart*) – відображає чотири основні характеристики вогню: швидкість поширення, температуру на одиниці площі, довжину полум'я та інтенсивність пожежі (рис. 2.3). За цим графіком можна підібрати найбільш коректні вхідні параметри для моделювання низової пожежі.

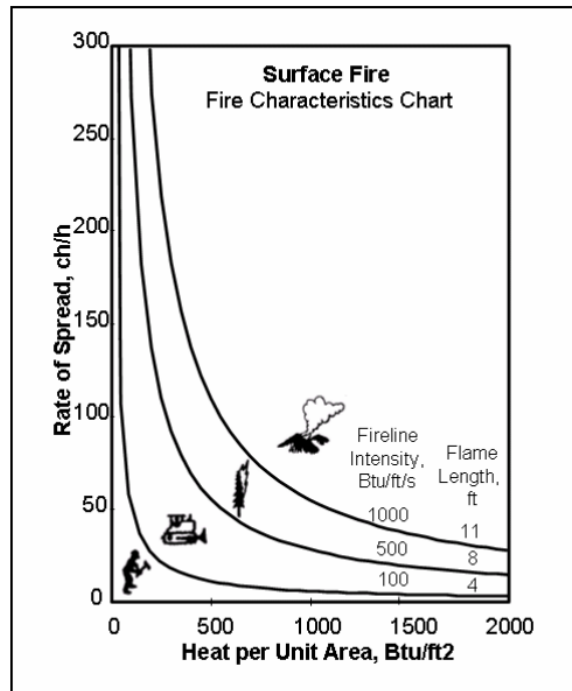


Рисунок 2.3 – Моделювання низової пожежі: діаграма характеристик вогню

Поверхневі горючі матеріали

Моделі горючих матеріалів (Fuel Model) – це сукупність чисельних значень, що описують витрати горючих матеріалів для математичної моделі Ротермеля, яка прогнозує поширення пожежі на поверхні. Існує 53 стандартних моделі горючих матеріалів, включаючи 13 оригінальних, які були описані Андерсоном (Anderson, 1982), а також 40 динамічних, які були додатково визначені в роботі Scott & Burgan (2005) [21].

Тип моделі горючих матеріалів (Fuel Model Type) – розділяють статичний (S) або динамічний (D) типи моделей горючих матеріалів. Динамічні моделі враховують компонент живого трав'янистоого покриву, частина якого переноситься в запаси горючих матеріалів відмерлої

рослинності під час горіння. Цей процес залежить від вмісту вологи: чим нижчий вміст вологи, тим більша частка живих компонентів трав'яної рослинності переходить у мертві (рис. 2.4).

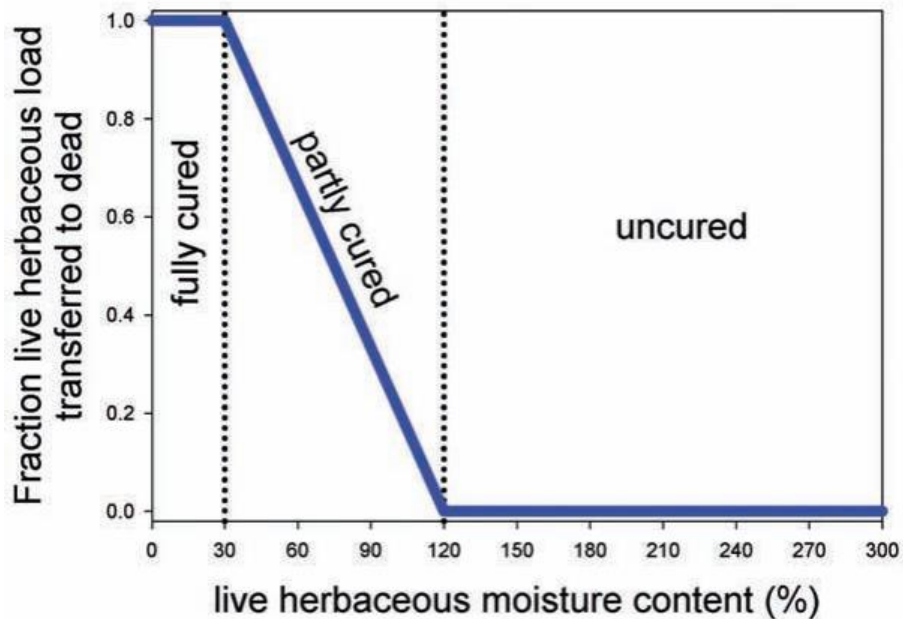


Рисунок 2.4 – Графічне відображення динамічних моделей горючих матеріалів

Товщина шару горючих матеріалів (Fuel Bed Depth) – визначає запас горючих матеріалів на поверхні.

Вологість відмерлих горючих матеріалів (Dead Fuel Moisture of Extinction) – визначає вміст вологи відмерлих решток.

Вологість живих горючих матеріалів (Live Fuel Moisture of Extinction) – визначає внесок участі живих компонентів рослинності в процес горіння відповідно до динамічних моделей горючих матеріалів.

Клас розміру горючих матеріалів – швидкість зміни вмісту вологи залежить від розміру дерев'янистих часток горючих матеріалів. Традиційно в завданнях моделювання пожеж такі горючі матеріали прийнято поділяти на класи розмірів за часовим лагом. *Клас розміру 1-h* – це запас відмерлих горючих матеріалів на одиницю площі, що включає в себе горючі матеріали від 0 до 0,25 дюйма (0,64 см) в діаметрі (хвоя, листя, трав'янисті рослини і

тонкі мертві стебла рослин). *Клас розміру 10-h* – ця категорія включає дерев'янисті рештки діаметром від 0,25 до 1,0 дюйма (0,64 до 2,54 см). *Клас розміру 100-h* – включає в себе деревну ламань від 1 до 3 дюймів (2,54 до 7,62 см). Горючі матеріали, що перевищують цю категорію (1000-h), не сприяють зростанню швидкості розповсюдження, яка розраховується за моделлю розповсюдження пожежі на поверхні Ротермеля.

Запас трав'яних мертвих горючих матеріалів (Dead Herbaceous Fuel Load) – запас цього класу горючих матеріалів на одиницю площі та є змістовною змінною тільки для динамічних моделей горючих матеріалів, в яких частина живих трав'яних горючих матеріалів переноситься в категорію відмерлих, що підтримують горіння. Вміст вологи цієї категорії приймається рівним вологості горючих матеріалів класу розміру 1-h.

Запас трав'янистих живих горючих матеріалів (Live Herbaceous Fuel Load) – живими трав'яними горючими матеріалами є однорічні або багаторічні трави. Якщо модель горючих матеріалів є динамічною, то початковий запас живих горючих матеріалів визначається моделлю. Під час горіння частина живих трав'яних горючих матеріалів переноситься в категорію відмерлих відповідно до рис. 2.4, а початковий вміст вологи задається користувачем.

Живі трав'янисті залишки горючих матеріалів (Live Herbaceous Fuel Load Remainder) – запас живих компонентів трав'янистих рослин, який залишається після того, як частина запасу переноситься до класу відмерлих. Ця змінна має значення тільки для динамічних моделей.

Запас живих горючих матеріалів (Live Woody Fuel Load) – цей клас є параметром моделі горючих матеріалів. Він включає в себе листя і дуже тонкі стебла живих чагарників.

Загальний запас відмерлих горючих матеріалів (Total Dead Fuel Load) – сумарний запас усіх класів горючих матеріалів. Для всіх моделей включає класи розміру 1-h, 10-h, 100-h. Ця змінна має найбільше значення для динамічних моделей горючих матеріалів.

Загальний запас живих горючих матеріалів (Total Live Fuel Load) – сума запасів всіх класів живих горючих матеріалів. Розрахунок проводиться для динамічних моделей горючих матеріалів після того, як відбувся перехід запасу живих горючих матеріалів до відмерлих.

Для розрахунку показників, що визначають умови переходу низової пожежі у верхову використовуються наступні показники (рис. 2.5).

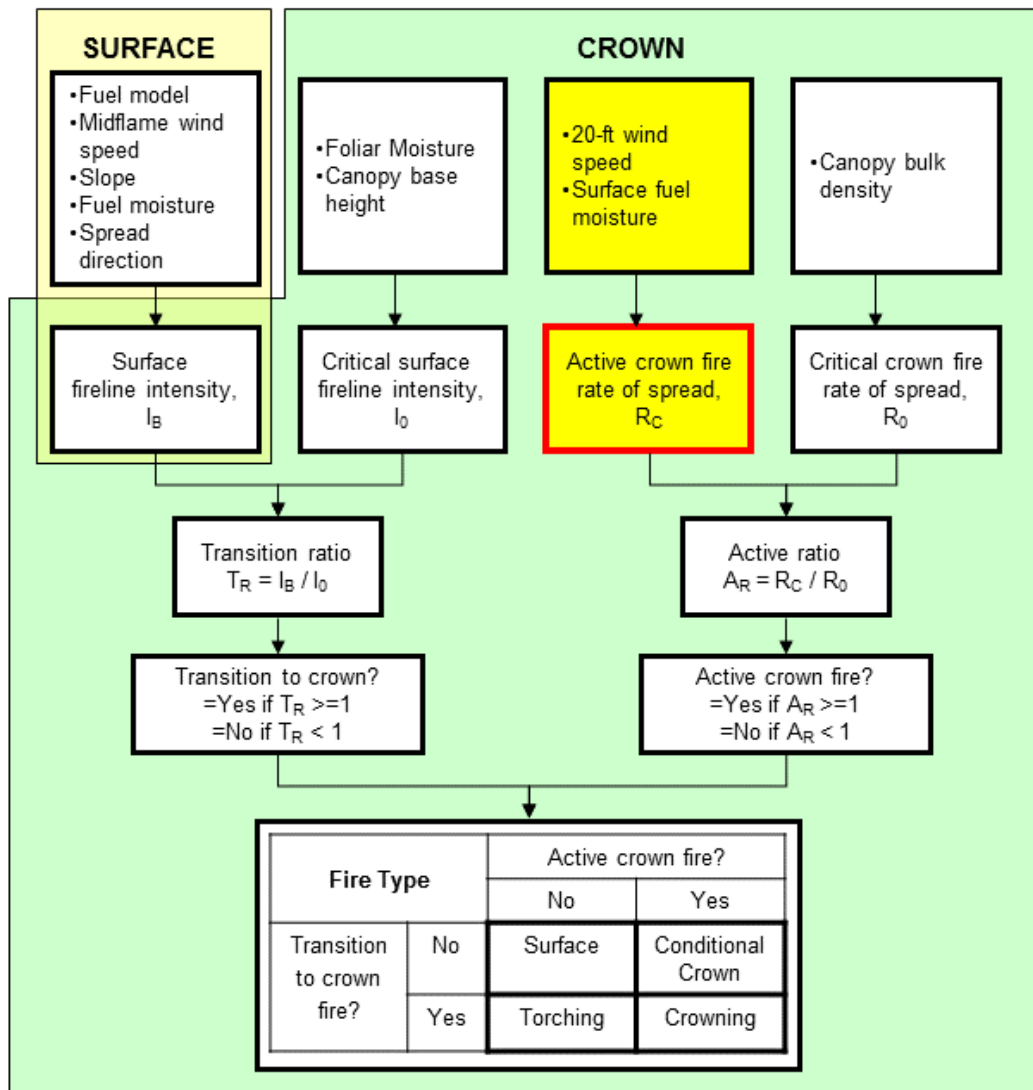


Рисунок 2.5 – Методика моделювання верхової лісової пожежі в системі

Вологість поверхневих горючих матеріалів (Surface Fuel Moisture)

Індекс вологості горючих матеріалів є інструментом, який широко використовується для розуміння потенціалу поширення вогню. Вміст вологи

горючих матеріалів залежить від умов навколишнього середовища (таких як погода, місцева топографія) та характеристик рослинності. Якщо вологість горючих матеріалів висока, пожежа не може швидко поширюватися, або взагалі не виникає. За низького вмісту вологи загорання викликають пожежі, а вогонь поширюється швидко.

Якщо вміст вологи горючих матеріалів менше 30 %, вони, по суті, вважаються відмерлими рештками. Відмерлі горючі матеріали реагують виключно на поточні умови середовища та є критичними для визначення потенціалу пожежі. Вологість таких горючих матеріалів (10-h, 100-h або 1000-h), яка називається часовим лагом, базується на часі, протягом якого вологість 2/3 відмерлих горючих матеріалів почне відповідати атмосферній. Невеликі рештки, такі як трави, листя та підстилка, швидше реагують на зміну атмосферної вологості (наприклад, клас розміру 1-h, 10-h).

Швидкість і напрям вітру

Швидкість вітру над рослинністю (20-Ft Wind Speed) – визначає швидкість вітру на висоті 20 футів над рослинністю.

Швидкість вітру на поверхні (Midflame Wind Speed) – це швидкість вітру над шаром поверхневих горючих матеріалів, що впливає на поширення пожежі на відкритих просторах та в лісі.

Ухил місцевості (Slope)

Експозиція (Aspect) – використовується, щоб розглянути сукупний вплив вітру і схилу на поширення пожежі.

Горизонтальна відстань на схилі (Slope Horizontal Distance) – це відстань між двома точками на місцевості вздовж по схилу, яка є більшою, ніж горизонтальна проекція. Важлива для розрахунку шляху, який пройшов фронт вогню.

Крутизна схилу (Slope Steepness) – виражається в процентах або градусах залежно від прийнятого стандарту моделювання.

Верхова пожежа (Crown Fire)

Вміст вологи листя (Foliar Moisture) – для хвойних деревних видів вказується вологість хвої. Використовується разом з інтенсивністю наземного вогню та висотою початку крони для оцінки можливості переходу низової пожежі у верхову.

Висота початку крони (Sanіру Base Height) – висота деревостану, при якій накопичується достатня щільність горючих матеріалів для верхової пожежі.

Щільність горючих матеріалів у кроні (Sanіру Bulk Density) – це щільність загального запасу горючих матеріалів у кронах деревостану ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$).

Тип пожежі (Fire Type) – у моделюванні виділяють чотири типи пожежі: поверхнева, перехідна у крону, умовна верхова та верхова.

3 ГЕОПРОСТОРОВА ОСНОВА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖ НА ЛАНДШАФТНОМУ РІВНІ

Успішне використання імітаційного моделювання залежить від якості вхідних наборів даних. Точна інформація про просторовий і часовий розподіл типів горючих матеріалів, топографічних показників і погодних умов має важливе значення для прогнозу швидкості поширення та інших параметрів поведінки пожежі. Під час моделювання природних пожеж варто виділити два завдання, які можна досягти на основі різних наборів тематичних шарів – моделювання пожежі на поверхні землі (у т.ч. під наметом деревостану) та верхової лісової пожежі. В останньому випадку для роботи моделі необхідно включити деякі додаткові шари, що дозволяють спрогнозувати умови переходу низової поверхні в пасивну чи активну верхову.

Погодні умови. Кліматичні показники стану атмосфери необхідні для прогнозу умов розвитку пожежі для конкретного типу горючих матеріалів. Такі показники як швидкість вітру (середня та максимальна), напрям вітру визначають швидкість поширення вогню, довжину полум'я, отже впливають на низку інших параметрів імітаційного моделювання. Наприклад, швидкість вітру є визначальною для виникнення верхової пожежі. З іншого боку природно-кліматичні показники території треба враховувати для визначення рівня вологості горючих матеріалів, яка змінюється впродовж календарного року.

Топографія. Для коректної роботи імітаційних моделей необхідна інформація про топографічні показники місцевості, зокрема крутизну схилів. Топографія має істотний вплив на швидкість вітру, поширення полум'я, а експозиція схилів визначає кількість сонячної радіації, яка впливає на вміст вологи у горючих матеріалах. Отже, цифрова модель рельєфу є ключовим параметром для застосування моделей поширення пожежі. У програмних продуктах із моделювання пожеж на основі системи FlamMap для цього

використовується три тематичних шари: elevation – висота над рівнем моря, m; aspect – експозиція схилу, азимут; slope – величина ухилу, градус.

Горючі матеріали. Типи горючих матеріалів формують тематичну основу для прогнозу розвитку пожежі. Ця інформація під час моделювання пожежних режимів на регіональному рівні переважно одержуються на основі дешифрування даних ДЗЗ, використовуючи тематичні класи земного покриву, що можуть бути безпосередньо інтерпретовані як певний тип моделей горючих матеріалів відповідно до атласу (Scott & Burgan, 2005).

Модель поширення вогню. Алгоритм поширення вогню по ландшафті задається конкретною математичною моделлю. Для цього прийнято опиратися на відповідні продукти, які орієнтуються на ту, чи іншу модель. Наприклад, у FARSITE реалізовано модель Rothermel (1972) [20], тоді як Prometheus оперує моделлю McArthur, розробленої для Австралії.

3.1 Кліматичні показники території досліджень

Із метою формування файлу погодних умов, на основі якого визначаються найімовірніші сценарії розвитку пожежі, для території досліджень одержано інформацію про ключові показники руху атмосфери, зафіксовані з 2004 по 2010 рр. низкою метеостанції (до 2013 року – для м. Сновськ та м. Семенівка). До них, в першу чергу відносяться, щоденні записи про середню та максимальну швидкість вітру. Щоправда, для прогнозу найімовірнішого напрямку поширення пожежі необхідно мати інформацію про напрям вітру. У зв'язку з мінливістю цього показника навіть протягом добового періоду, визначити переважаючий напрям вітру не вдалося.

Із аналізу табл. 3.1 можна зробити висновок про відсутність екстремальних регіонів з точки зору наявності різючих відмінностей в показниках стану атмосфери. Числові спостереження вказують на існування незначного широтного градієнта в розподілі середньодобової температури повітря, а також швидкості вітру.

Таблиця 3.1 – Багаторічні метеорологічні показники території досліджень

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Світязь			
Квітень	9,1	2	15
Травень	13,9	2	17
Червень	17,5	2	15
Липень	20,2	2	15
Серпень	18,9	2	15
Вересень	13,9	2	15
Жовтень	8,6	2	15
За 2004-2010 рр.	14,6	2	17
Метеостанція: Володимир-Волинський			
Квітень	9,3	2	13
Травень	13,8	2	12
Червень	17,4	2	13
Липень	19,9	2	12
Серпень	18,7	2	11
Вересень	13,6	2	12
Жовтень	8,6	2	8
За 2004-2010 рр.	14,5	2	13
Метеостанція: Ковель			
Квітень	9,3	2	8
Травень	13,9	2	10
Червень	17,5	2	7
Липень	20,0	1	10
Серпень	18,8	1	8
Вересень	13,6	1	7
Жовтень	8,3	2	9
За 2004-2010 рр.	14,5	2	10

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Луцьк			
Квітень	9,3	3	10
Травень	14,0	3	11
Червень	17,6	2	10
Липень	20,0	2	13
Серпень	19,0	2	10
Вересень	13,9	2	11
Жовтень	8,5	2	10
За 2004-2010 рр.	14,6	2	13
Метеостанція: Любешів			
Квітень	9,3	2	10
Травень	13,8	2	10
Червень	17,4	2	12
Липень	19,9	2	12
Серпень	18,7	2	10
Вересень	13,6	2	10
Жовтень	8,3	2	10
За 2004-2010 рр.	14,4	2	12
Метеостанція: Маневичі			
Квітень	8,7	2	8
Травень	13,5	2	10
Червень	17,2	2	7
Липень	19,7	2	7
Серпень	18,5	2	7
Вересень	13,5	2	6
Жовтень	8,0	2	7
За 2004-2010 рр.	14,2	2	10
Метеостанція: Дубно			
Квітень	9,4	2	13
Травень	14,2	2	13
Червень	17,6	1	10

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Дубно			
Липень	19,9	1	15
Серпень	18,8	1	12
Вересень	13,6	1	15
Жовтень	8,6	1	11
За 2004-2010 рр.	14,6	1	15
Метеостанція: Рівне			
Квітень	9,1	4	15
Травень	14,0	4	12
Червень	17,4	3	12
Липень	19,9	3	14
Серпень	18,9	3	12
Вересень	13,7	3	13
Жовтень	8,2	4	11
За 2004-2010 рр.	14,5	3	15
Метеостанція: Сарни			
Квітень	9,2	1	13
Травень	14,2	2	11
Червень	17,9	1	10
Липень	20,2	1	13
Серпень	19,1	1	12
Вересень	13,8	1	10
Жовтень	8,2	1	11
За 2004-2010 рр.	14,7	1	13
Метеостанція: Олевськ			
Квітень	8,7	3	12
Травень	14,0	3	10
Червень	17,5	2	7
Липень	19,8	2	11
Серпень	18,7	2	10
Вересень	13,3	2	7

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Олевськ			
Жовтень	7,9	2	9
За 2004-2010 рр.	14,3	2	12
Метеостанція: Новоград-Волинський			
Квітень	9,3	2	10
Травень	14,4	2	8
Червень	18,0	2	6
Липень	20,1	1	8
Серпень	19,2	1	6
Вересень	13,8	1	8
Жовтень	8,3	2	6
За 2004-2010 рр.	14,7	2	10
Метеостанція: Житомир			
Квітень	9,4	2	12
Травень	14,8	2	9
Червень	18,3	2	8
Липень	20,6	1	7
Серпень	19,6	1	15
Вересень	14,1	1	7
Жовтень	8,6	2	10
За 2004-2010 рр.	15,1	2	15
Метеостанція: Коростень			
Квітень	9,0	3	13
Травень	14,4	3	11
Червень	17,9	2	9
Липень	20,1	2	14
Серпень	19,3	2	13
Вересень	13,8	2	10
Жовтень	8,2	3	11
За 2004-2010 рр.	14,7	2	14

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Овруч			
Квітень	8,7	1	7
Травень	14,2	1	8
Червень	17,7	1	7
Липень	19,9	1	7
Серпень	19,0	1	8
Вересень	13,6	1	9
Жовтень	7,8	1	6
За 2004-2010 рр.	14,4	1	9
Метеостанція: Тетерів			
Квітень	9,0	1	7
Травень	14,9	1	7
Червень	18,6	1	7
Липень	20,8	1	6
Серпень	20,0	1	6
Вересень	14,1	1	7
Жовтень	8,2	1	8
За 2004-2010 рр.	15,1	1	8
Метеостанція: Чорнобиль			
Квітень	9,1	2	7
Травень	14,7	2	6
Червень	18,2	1	5
Липень	20,4	1	6
Серпень	19,6	1	6
Вересень	14,0	1	4
Жовтень	8,2	2	5
За 2004-2010 рр.	14,9	1	7
Метеостанція: Київ			
Квітень	10,0	3	8
Травень	15,6	3	8
Червень	19,3	2	8

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Київ			
Липень	21,6	2	9
Серпень	21,0	2	7
Вересень	15,2	2	7
Жовтень	9,1	2	8
За 2004-2010 рр.	16,0	2	9
Метеостанція: Остер			
Квітень	9,1	2	11
Травень	15,1	2	10
Червень	18,8	2	8
Липень	21,0	2	12
Серпень	20,3	2	10
Вересень	14,3	2	6
Жовтень	8,3	2	10
За 2004-2010 рр.	15,3	2	12
Метеостанція: Чернігів			
Квітень	8,9	3	12
Травень	14,8	3	12
Червень	18,4	3	9
Липень	20,8	2	15
Серпень	20,1	3	12
Вересень	14,2	3	9
Жовтень	8,0	3	9
За 2004-2010 рр.	15,1	3	15
Метеостанція: Ніжин			
Квітень	9,0	2	7
Травень	14,9	2	9
Червень	18,6	2	7
Липень	20,6	2	9
Серпень	20,0	2	8
Вересень	14,0	2	8

Продовження таблиці 3.1

Місяць	Середня добова температура повітря, С°	Швидкість вітру, м·с ⁻¹	
		середня	максимальна
Метеостанція: Ніжин			
Жовтень	8,0	2	8
За 2004-2010 рр.	15,0	2	9
Метеостанція: Сновськ			
Квітень	11,9	2	9
Травень	12,3	2	8
Червень	11,6	2	6
Липень	11,9	2	6
Серпень	10,6	2	8
Вересень	12,4	2	7
Жовтень	10,9	2	7
За 2004-2013 рр.	11,7	2	9
Метеостанція: Семенівка			
Квітень	11,4	2	11
Травень	11,8	2	10
Червень	11,2	2	9
Липень	11,4	2	9
Серпень	10,1	2	9
Вересень	11,9	2	9
Жовтень	10,4	2	8
За 2004-2013 рр.	11,2	2	11
Метеостанція: Покошичі			
Квітень	8,1	2	16
Травень	14,2	2	14
Червень	17,7	2	14
Липень	20,0	1	12
Серпень	19,5	1	14
Вересень	13,5	1	12
Жовтень	7,5	2	14
За 2004-2010 рр.	14,4	1	16

Для моделювання природних пожеж найбільше значення має максимальна швидкість вітру, яка для території досліджень на перевищує 15–16 м·с⁻¹. Істотно менші значення цього показника (до 10 м·с⁻¹) зафіксовані метеостанціями Овруча, Тетерева, Києва та Ніжина. Проте для них відзначається дещо вище середнє значення добової температури повітря. У часовому відношенні закономірностей розподілу швидкості за місяцями не виявлено.

3.2 Топографічні параметри території досліджень

У північній частині розташована Поліська низовина. Її висоти не перевищують 200 м за винятком Словечансько-Овруцького кряжу, що піднімається трохи більше, ніж 300 м над рівнем моря. У долинах Дніпра, Прип'яті та Десни місцевість понижується до 100–120 м. У геологічному відношенні Поліська низовина розташовується на різних тектонічних структурах. Її основу формує Український щит, який на заході змінюється Волино-Подільською плитою, а на сході – Дніпрово-Донецькою западиною. Територія неглибоко порізана достатньо густою річковою сіткою та має загальний нахил у напрямі русел річок Прип'яті та Дніпра. Південніше Поліської низовини на лівобережжі розташовується Придніпровська низовина з висотами 90–170 м. Вона повністю лежить на Дніпрово-Донецькій западині та нахилена в бік Дніпра. Територія, прилегла до Дніпра, має практично плоску поверхню (рис. 3.1).

Цифрова модель рельєфу – DEM (Digital Elevation Model) має важливе значення для багатьох задач комп'ютерного моделювання, у т.ч. симуляції природних пожеж у ГІС. Джерелом даних для створення таких моделей у сучасних умовах є, переважно, дистанційне зондування Землі. Враховуючи завдання досліджень, доречними будуть глобальні моделі рельєфу, які знаходяться у відкритому доступі (наприклад, SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, 90 м).

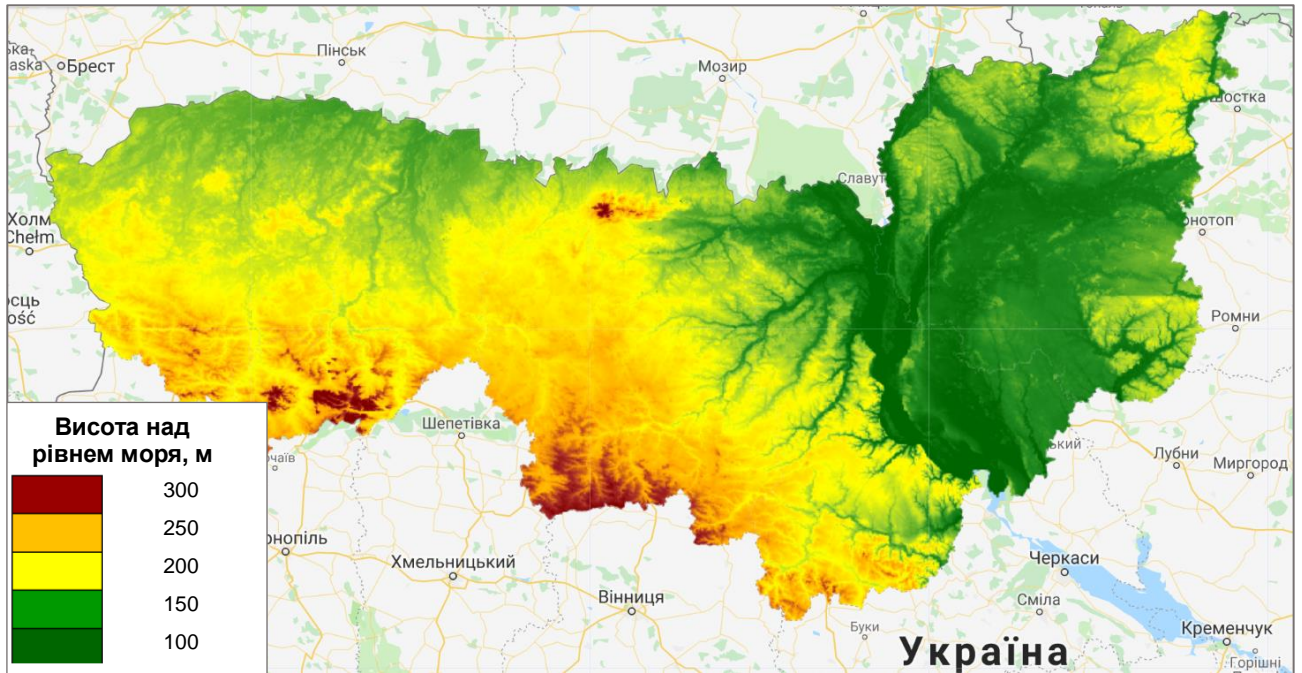


Рисунок 3.1 – Рельєф території досліджень за даними SRTM
(*Shuttle radar topographic mission*)

Одним із важливих топографічних показників місцевості, який істотно впливає на умови поширення пожеж, є ухил місцевості. Цей параметр має особливе значення для гірських регіонів, у зв'язку з чим застосовується в ключових моделях динаміки пожеж США. Певне уявлення про перевищення території досліджень створює карта затіненого рельєфу, на якій виділяється кілька локальних територій із найбільшим коливанням висот (рис. 3.2).

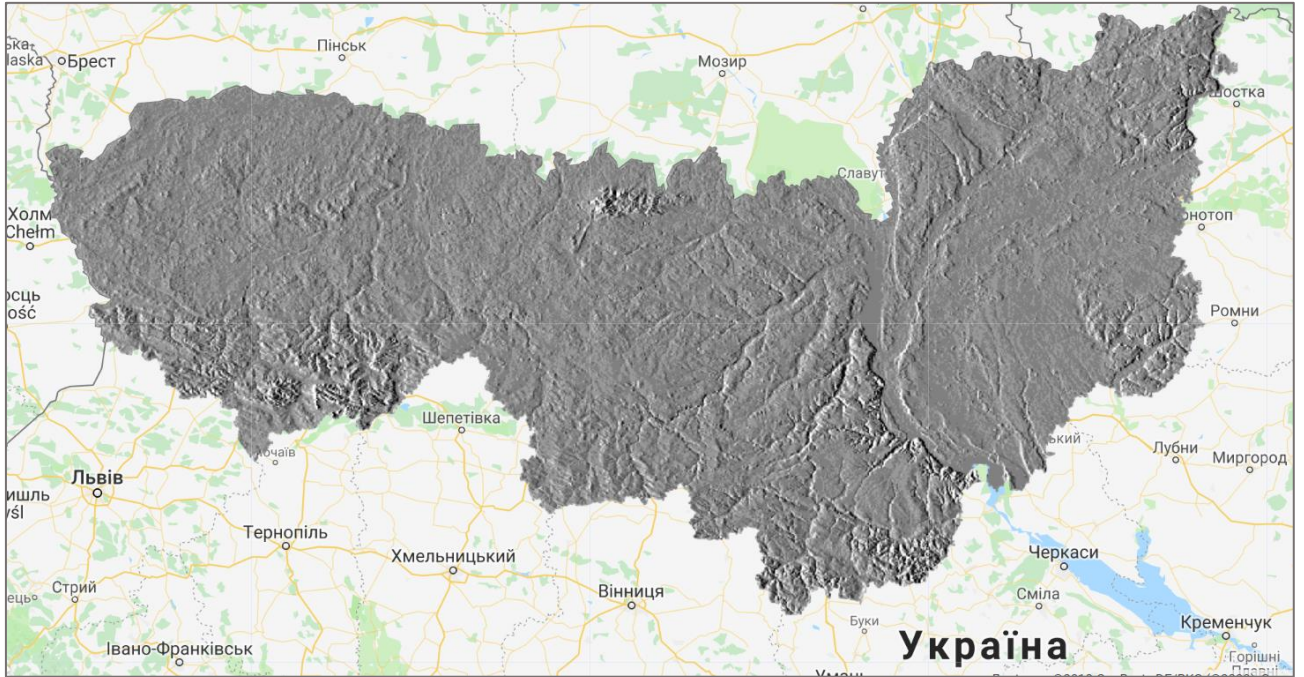


Рисунок 3.2 – Затінений рельєф території досліджень

У цілому треба визнати не принципову роль топографічних параметрів території досліджень на методичні принципи моделювання природних пожеж. Відповідно до рис. 3.3 регіони Полісся України характеризується відносно мінімальними значеннями крутизни схилів.

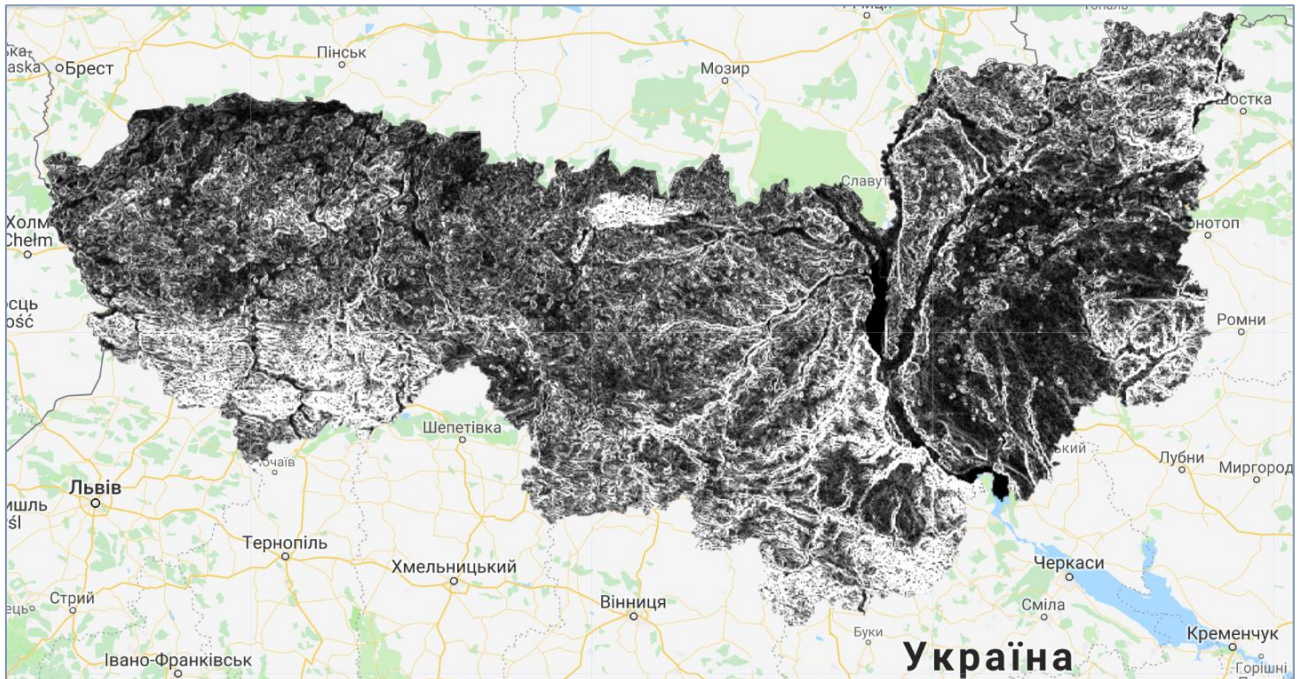


Рисунок 3.3 – Карта ухилів території Полісся України (крутизна схилів)

Загальний нахил місцевості на північ та північний схід визначив особливості експозиції схилів. Так, на більшій території досліджень переважають схили з крутизною до 2° , направлені в бік понижених ділянок (рис. 3.4).

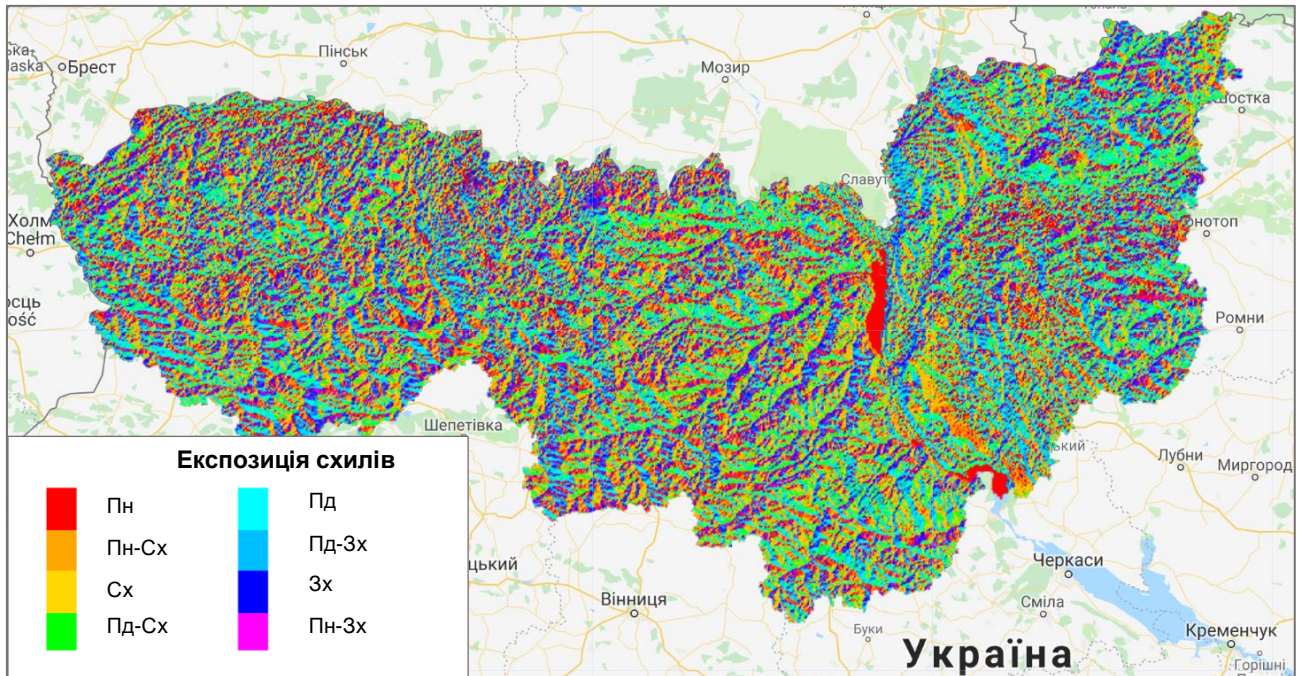


Рисунок 3.4 – Експозиція схилів території досліджень

Растри висоти над рівнем моря (elevation), ухилів (slope), експозиції схилів (aspect) є обов'язковими тематичними шарами, так званого, файлу ландшафтів (lsc-file), який створюється за допомогою програми FlamMap і лежить у основі імітаційного моделювання. Незважаючи на те, що топографія дослідної території у більшості випадків не визначає поширення пожежі, наявність зазначених шарів є обов'язковою.

3.3 Характеристика моделей горючих матеріалів території досліджень

Прогноз потенційної поведінки пожежі є важливим завданням імітаційного моделювання. У цьому контексті біофізичні параметри ландшафтів, такі як запаси горючих матеріалів, розміри рослинних решток, вологість тощо одержали формалізовану форму у вигляді моделей горючих

матеріалів. Вони використовуються як один із вхідних параметрів системи моделювання пожеж на основі моделі поширення вогню, розробленої Ротермелем у 1972 році [20]. Вхідний набір даних про конкретну модель горючих матеріалів включає:

- запаси горючих матеріалів (живих і відмерлих компонентів) за класами розмірів (від 0 до 0,25 дюйма, від 0,25 до 1,0 дюйма та від 1,0 до 3,0 дюйма, або у вигляді часового лагу: 1-h, 10-h, 100-h відповідно);

- співвідношення між площею поверхні та об'ємом для кожного класу розмірів горючих матеріалів;

- теплоємність за класами розмірів;

- товщину шару горючих матеріалів;

- втрату вологи відмерлими компонентами горючих матеріалів.

Сучасну основу моделювання природних пожеж складають 13 стандартних моделей, описаних у роботі Anderson (1982) [4]. Ці моделі достатньо непогано працюють в умовах піку пожежонебезпечного сезону, проте мають недоліки під час моделювання поширення вогню за конкретних умов, наприклад, контрольованих палів, після проведення заходів із управління горючими матеріалами. З цією метою в роботі Scott & Burgan (2005) [21] були описані додаткові 40 динамічних моделей.

Усі моделі горючих матеріалів згруповані за типом джерела вогню. Кількість моделей горючих матеріалів в кожному типі горючих матеріалів відрізняється. Для кожного типу горючих матеріалів призначено мнемонічний код з двох літер:

- NB (Nonburnable) – негорючі матеріали;

- GR (Grass) – травостої;

- GS (Grass-Shrub) – травостої-чагарники;

- SH (Shrub) – чагарники;

- TU (Timber-Understory) – деревостан-підлісок;

- TL (Timber Litter) – деревний опад;

- SB (Slash-Blowdown) – деревна ламань.

У межах типу моделі горючих матеріалів упорядковані за збільшенням тепла, що виділяється під час горіння на одиницю площі. На практиці використовується три схеми кодування моделей горючих матеріалів: числовий номер моделі горючих матеріалів (від 1 до 256; для використання в комп'ютерних програмах); символний код моделі горючих матеріалів (три символи, що використовується для усних та письмових комунікацій, а також як вхід у системи моделювання пожеж); повна назва моделі горючих матеріалів. Наприклад, 100 – GR1 – трав'янистий покрив сухого клімату.

Для кожного типу горючих матеріалів призначено блок номерів моделей (табл. 3.2), що спрощує побудову відповідних тематичних карт. Частина номерів не використовується та зарезервовані для майбутніх стандартних моделей, або користувацьких моделей горючих матеріалів. Це забезпечує можливість майбутнім моделям горючих матеріалів знаходитися у відповідній (коректній) групі.

Таблиця 3.2 – Класифікація моделей горючих матеріалів

Тип горючих матеріалів	Номер блоку моделі горючих матеріалів	Використовується в оригіналі або новому наборі	Зарезервовані для майбутніх стандартних моделей	Доступні для користувацьких моделей горючих матеріалів
	1-13	1-13		
	14-89			14-89
NB	90-99	91-93, 98-99	94-95	90, 96-97
GR	100-119	101-109	110-112	100, 113-119
GS	120-139	121-124	125-130	120, 131-139
SH	140-159	141-149	150-152	140, 153-159
TU	160-179	161-165	166-170	160, 171-179
TL	180-199	181-189	190-192	180, 193-199
SB	200-219	201-204	205-210	200, 211-219
	220-256			220-256

У новому наборі Scott & Burgan (2005) [21] всі моделі горючих матеріалів, які мають живий трав'яний компонент, є динамічними. Використовуючи динамічні моделі, слід пам'ятати, що вміст вологи у живому трав'янистому покриві суттєво впливає на поведінку вогню, оскільки запаси таких горючих матеріалів в процесі горіння перерозподіляються між живими та відмерлими компонентами. Жодна з 13 оригінальних моделей горючих матеріалів не є динамічною. Тому прямі порівняння між новими та оригінальними моделями горючих матеріалів можуть бути зроблені лише, коли вміст вологи в живому компоненті складає 30 % або нижче. Наприклад, моделі GR6 та GR8 подібні до оригінальної моделі 3, однак їх поведінка за різного рівня вмісту вологи дуже відрізняється. Оригінальна модель 3 не має живих трав'янистих компонентів, у зв'язку з чим параметри вогню не змінюється. У свою чергу, для моделей GR6 та GR8 поведінка вогню різко змінюється при підвищенні рівня вологи в живих компонентах горючих матеріалів.

Відповідно до Scott & Burgan (2005) [21] існують певні унікальні сценарії комбінації вологи в живих (табл. 3.3) і відмерлих (табл. 3.4) компонентах горючих матеріалів. Для відмерлих компонентів вологість вказується залежно від класу розмірів решток, а живої – типу (трав'янистої чи дерев'янистої). В останньому випадку від коливається від 30 % (повністю зав'ялих) до 120 (абсолютно здорових) рослин.

Таблиця 3.3 – Вміст вологи у відмерлих компонентах горючих матеріалів, %

Клас розміру	D1 (дуже низький)	D2 (низький)	D3 (середній)	D4 (високий)
1-h	3	6	9	12
10-h	4	7	10	13
100-h	5	8	11	14

Таблиця 3.4 – Вміст вологи у живих компонентах горючих матеріалів, %

Тип компоненту	L1 (дуже низький)	L2 (низький)	L3 (середній)	L4 (високий)
Живий трав'янистий	30	60	90	120
Живий дерев'янистий	60	90	120	150

Щоб вибрати модель горючих матеріалів треба спочатку визначити тип горючих матеріалів (трава, трава з чагарниками, чагарники, лісова підстилка, деревний опад, деревна ламань), тобто оцінити який компонент забезпечує горіння. Наприклад, вогонь може опинитися в лісовій зоні, але якщо лісовий покрив незімкнутий, то забезпечуватиме горіння трава, а не хвоя. Далі прийняти рівень вмісту вологи для живих і відмерлих компонентів горючих матеріалів. У цьому відношенні треба взяти до уваги природно-кліматичні умови території, сезонність, топографічне положення тощо. Наприклад вологість одного і того ж горючого матеріалу в березні та серпні може відрізнятися в рази. Також при цьому треба звернути увагу на товщину шару горючих матеріалів. Не обов'язково прив'язувати модель до відповідного типу горючих матеріалів, у першу чергу потрібно орієнтуватися на очікувану поведінку вогню за різної комбінації факторів зовнішнього середовища.

Із урахуванням зазначеного нами було вибрано 11 типів горючих матеріалів, які узгоджено з основними типами земного покриву, що характеризують територію досліджень (табл. 3.5). Наведені типи земного покриву можуть бути класифіковані у результаті обробки часових серій супутникових знімків Landsat із достатньою для задач точністю.

Таблиця 3.5 – Співвідношення між типами земного покриття та горючими матеріалами на території досліджень

Тип земного покриття	Номер моделі горючих матеріалів	Шифр моделі горючих матеріалів
Хвойний ліс	188	TL8
Листяний ліс	182	TL2
Мішаний ліс	161	TU1
Чагарники	142	SH2
Травостої з поодинокими деревами	123	GS3
Травостої	102	GR2
С.-г. угіддя (орні землі)	101	GR1
Болота	121	GS1
Інфраструктура	91	NB1
Водойми	98	NB8
Піски	99	NB9

Візуалізацію обраних типів горючих матеріалів на прикладі реальних ландшафтів Чорнобильської зони відчуження наведено на рис. 3.5- рис. 3.16.



Рисунок 3.5 – NB1 (91) – Інфраструктура, селищна забудова, промислова зона.
Негорючі території



Рисунок 3.6 – NB8 (98) – Відкриті водойми (річки, озера, ставки, водосховища).
Негорючі ландшафти



Рисунок 3.7 – NB9 (99) – Піски. Негорючі ландшафти. Поширення вогню не очікується



Рисунок 3.8 – GR1(101) - Сільськогосподарські землі, на якій вирощуються зернові культури. Поширення вогню очікується, починаючи з березня до кінця квітня, та в серпні-вересні. Основним джерелом вогню є залишки трав'янистих рослин, стерня



Рисунок 3.9 – GR2(102) – Розріджена трав'яниста рослинність на малопродуктивних землях. Основним джерелом вогню є коротка трава. Зустрічається незначна частка дерев'янистих компонентів. Поширення вогню очікується протягом липня-вересня



Рисунок 3.10 – GS4(121) – Болотиста місцевість. Рівень ґрунтових вод знаходиться близько до поверхні, у зв'язку з цим значну частину року вогонь не може поширюватися. Пожежі можуть виникати протягом березня-квітня, та у вересні-жовтні



Рисунок 3.11 – GS3(123) – Пустирі, прогалини. Джерелом вогню є деревний опад, трав'янисті компоненти. Пожежі можуть виникати протягом липня-вересня



Рисунок 3.12 – SH2(142) – Чагарники. Основним джерелом вогню є дерев'янисті рештки, опад та трава. Пожежі можуть виникати в серпні-вересні



Рисунок 3.13 – TU1(161) – Мішані лісові насадження, в яких переважає сосна звичайна, береза повисла, дуб звичайний. Частка сосни не перевищує 40–60 %. Швидкість поширення вогню висока



Рисунок 3.14 – TL8(188) – Чисті соснові деревостани з незначною домішкою інших деревних порід (берези, осики, дуба). Швидкість поширення вогню висока



Рисунок 3.15 – TL2(182) – Листяний ліс, у якому переважають такі деревні види, як береза повисла



Рисунок 3.16 – TL2(182) – Листяний ліс, у якому переважають такі деревні види, як вільха чорна

3.4 Алгоритми класифікації супутникових знімків за типами земного покриття і класами горючих матеріалів

Моделювання розвитку пожеж і прогноз імовірних ризиків на ландшафтній основі передбачає створення низки тематичних геопросторових шарів, які відображають основні біофізичні параметри території досліджень. Єдиним джерелом інформації про ці параметри в сучасних умовах і з урахування масштабів досліджень можуть бути виключно дані, одержані системами дистанційного зондування Землі. Відповідно до сучасного досвіду вирішення цього питання під час розробки цифрової основи для моделювання варто розглядати матеріали супутникової зйомки оптичного діапазону. В першу чергу, основу досліджень повинні складати загальнодоступні супутникові знімки Landsat, просторове розрізнення яких (30 м) відповідає детальності фінальних продуктів моделювання та узгоджується із завданнями проекту. До переваг цієї системи відноситься також широкий спектр існуючих алгоритмів обробки супутникових знімків.

Класифікація території досліджень за типами земного покриття відіграє важливу роль у дешифрування основних типів ландшафтів. Одержана тематична інформація у вигляді цифрових карт є основою для присвоєння відповідним типам ландшафтів відповідних моделей горючих матеріалів. З урахуванням зазначеного, аналіз існуючих алгоритмів автоматизованої класифікації супутникових знімків та визначення їхніх переваг із урахуванням реальних науково-практичних завдань проекту відноситься до першочергових задач наукового проекту.

Вибір класифікаційного алгоритму залежить від багатьох аспектів, включаючи тип даних, особливостей розподілу показників, що досліджуються, простоти використання результатів тощо. Як і для інших завдань, пов'язаних із моделюванням лісових об'єктів, дуже важливо забезпечити баланс між точністю та використаними ресурсами. Протягом останніх років в аналізі даних супутникової зйомки почали домінувати непараметричні методи класифікації (табл. 3.6)

Таблиця 3.6 – Непараметричні методи класифікації супутникових знімків Landsat та їх використання у дослідженні лісів

Метод класифікації	Регіон досліджень	Досліджуваний параметр	Посилання
CART (Classification and Regression Trees)	Північна Америка	Відсоток зімкнутості деревостанів	(Song et al., 2014)
	Континентальна частина США	Лісовий покрив, втрати та відновлення лісів	(Hansen et al., 2014)
	Туреччина	Відсоток зімкнутості деревостанів	(Donmez, Berberoglu, Erdogan, Tanriover, & Cilek, 2015)
RF (Random Forest)	Західний Азербайджан	Типи земного покриву	(Eisavi, Homayouni, Yazdi, & Alimohammadi, 2015)
	США	Відсоток зімкнутості деревостанів	(Coulston et al., 2012)
	Західна Україна	Видовий склад насаджень (за групами)	(Миклуш et al., 2013)
	Гірські регіони Греції	Сума площ перерізів, запас, густина насаджень	(Chrysafis, Mallinis, Gitas, & Tsakiri-Strati, 2017)
	Канада, Саскачеван	Наземна фітомаса	(Boisvenue, Smiley, White, Kurz, & Wulder, 2016)
ANN (Artificial Neural Network)	Україна	Типи земного покриву	(Лавренюк et al., 2016)
	США, Огайо	Наземна біомаса	(Zhu & Liu, 2015)
SVM (Support Vector Machine)	Європейська частина Росії	Типи земного покриву	(Sieber et al., 2013)
	США, Огайо	Видовий склад деревостанів	(Zhu & Liu, 2014)

На противагу параметричним підходам, які опираються на апріорну інформацію про характер розподілу досліджуваних величин, непараметричні методи мають кілька важливих переваг: 1) забезпечують гнучкість у вивченні зв'язку між залежними змінними та відгуком; 2) результат моделювання значно менше залежить від вихідних даних, на основі яких розроблено параметричну модель; 3) дозволяють виявити помилкові спостереження завдяки можливості аналізу їхнього впливу на відгук; 4) мають гнучкість для прогнозу відсутніх значень під час інтерполяції. В лісовій інвентаризації треба окремо розглядати методи тематичної класифікації, наприклад, виділення лісових і нелісових ділянок, насаджень різного видового складу, а також методи регресії, які застосовуються для моделювання просторового розподілу таксаційних показників лісових насаджень.

Група методів CART завдяки своїм перевагам широко представлена в сучасній літературі. В першу чергу, CART можуть оперувати як дискретними, так і неперервними показниками, а пропуски даних чи мультиколеніарність практично не позначається на результатах. Вони також ефективні для обробки великих масивів даних або великої кількості незалежних факторів. До переваг цього підходу треба також віднести наглядність, оскільки дерева легко відобразити в графічному вигляді. Основним недоліком методу є відносна нестабільність моделей, яку може викликати навіть незначна зміна вихідного масиву даних. Незбалансована навчальна вибірка призводить до того, що більша частина змодельованих значень потраплять до найпредставленіших класів [13]. Певною мірою вирішує проблему репрезентативності різних тематичних класів стратифікована вибірка.

Прогностичні моделі можуть поєднуватися в, так званий ансамбль, демонструючи при цьому вищу точність. Чи не найвідомішим у цьому відношенні є метод Random Forest Breiman (2001) [6]. Алгоритм навчання RF є вдосконаленою версією CART, в якому кращі класифікаційні (регресійні) дерева обираються після рекурсивної зміни вихідного масиву даних. Він побудований на процедурі *bootstarap aggregating* або *bagging* –

багаторазовому випадковому формуванні з навчальної вибірки окремих піднаборів даних для класифікації (регресії) та оцінки точності. Bagging повторюється n -разів, на кожному етапі розробляється нова модель, після чого результати від усього випадкового лісу класифікаційних чи регресійних дерев узагальнюються. Це забезпечує більшу стійкість остаточної моделі. Поєднання алгоритмів CART у вигляді ансамблю в цілому підвищує точність, проте ускладнює інтерпретабельність моделі.

Подібні методи відносять в літературі до категорії непараметричних методів прогнозу типу «чорна скринька». Вони є доцільними у випадках, коли кінцевою метою є точність моделі, а не можливість відображення взаємозв'язків між змінними. На основі дешифрування супутникових знімків у сучасній науці вирішується широке коло завдань. Крім класифікації та регресії часто застосовуються методи інтерполяції. Найбільшого розвитку в лісовій інвентаризації одержав вже описаний метод заміщення пропущених значень – k -Nearest Neighbors.

Методику комплексного використання методів комп'ютерного дешифрування супутникових знімків можна представити у вигляді рис. 3.17.



Рисунок 3.17 – Блок-схема методики дешифрування супутникових знімків

Наземні вибіркові дослідження. Наземні дослідження формують основу ефективного застосування даних ДЗЗ для дешифрування параметрів земного пориву. Оптимальним джерелом наземної інформації слугують вибіркові дослідження, що здійснюються на належній статистичній основі. Особливе значення така інформація для просторового моделювання параметрів лісових насаджень. Однак, статистична інвентаризація лісів до цього часу не реалізована в Україні. Зазначені обставини викликають необхідність розгляду альтернативних підходів стосовно збору вихідних даних. Певну альтернативу наземним дослідженням може скласти візуальне дешифрування супутникових знімків суб-метрового просторового розрізнення.

Додаткові набори даних. Сучасний досвід інвентаризації лісів, побудований на комплексному використанні даних наземних і дистанційних методів збору інформації, свідчить про доцільність поєднання спектральних супутникових знімків оптичного діапазону з додатковими геопросторовими наборами інформації. За умов відсутності достовірної статистичної інформації про показники лісового фонду атрибутивні бази даних у форматі ГІС, які застосовуються наразі в системі лісовпорядкування, варто розглядати як одне із реально доступних джерел інформації про ліс. Можливість практичного використання таких баз даних для дешифрування лісових ділянок на основі супутникових знімків доведено в низці наукових досліджень.

Серед інших допоміжних тематичних шарів, що широко застосовуються для вдосконалення класифікаційних моделей, треба відзначити топографічні показники місцевості, а з урахуванням особливостей території досліджень – це, в першу чергу, географічні координати X та Y , висота над рівнем моря. Певне значення можуть також мати кліматичні умови, що характеризуються розподілом кількості опадів, часткою фотосинтетично активної радіації, що поглинається рослинами, розподілом середньорічної, максимальних і мінімальних температур повітря. Ідея застосування такої інформації полягає в тому, що природно-кліматичні

градієнти визначають основні риси територіального розташування ландшафтів.

Радіометрична корекція. Радіометрична корекція супутникових знімків може здійснюватися за різними алгоритмами, проте найчастіше DN приводять до відбиття на сенсорі (TOA, Top of Atmosphere) або на поверхні землі. В останньому випадку забезпечується повна узгодженість значень відбиття пікселів в межах окремої сцени, а також між різними знімками. Найдосконалішим алгоритмом корекції знімків Landsat є LEDAPS (Masek et al., 2006), який враховує різноманітні атмосферні ефекти (концентрацію озону, водяної пари, щільність аерозолів). Оскільки розрахунок значень відбиття на поверхні землі потребує інформації про стан атмосфери та поширення аерозолів на момент зйомки, загальноприйнятим у дослідженні параметрів лісового покриву стало використання значень відбиття на сенсорі.

Корекція знімків за методикою TOA здійснюється за рівнянням, яке видаляє ефект різниці в умовах освітлення об'єктів, зумовлений різним азимутом Сонця та відстанню від Землі до Сонця:

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_{\rho}}{\cos(\theta_{SZ})}, \quad (3.1)$$

де ρ_{λ} – значення відбиття на сенсорі (TOA); M_{ρ} , A_{ρ} – коефіцієнти масштабування, специфічні для кожного спектрального каналу (одержують з метаданих); Q_{cal} – значення пікселів (DN); θ_{SZ} – азимут Сонця.

Абсолютна радіометрична корекція супутникових знімків до значень відбиття на сенсорі задовольняє більшість завдань (Hansen & Loveland, 2012). Її алгоритми доступні в спеціалізованому програмному забезпеченні для обробки даних ДЗЗ. При цьому для окремих сенсорів (наприклад, Landsat, Sentinel 2³) існує можливість відразу одержання дані, які вже пройшли радіометричну корекцію.

³ <https://code.earthengine.google.com/datasets#>

Геометрична корекція. Супутникові знімки містять спотворення геометрії зображень, спричинені відхиленням датчика від надиру або кривизною поверхні Землі. У зв'язку з цим, геометрична корекція супутникових знімків є важливим етапом попередньої обробки, яку необхідно виконати перед класифікацією та спільним використанням даних в ГІС.

Багато постачальників даних дистанційного зондування використовують глобальні моделі рельєфу (наприклад, SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, 90 м) для виконання нескладних геометричних перетворень і створення ортотрансформованих зображень відповідного рівня обробки. Таким чином, більшість супутникових знімків постачаються після того, як вони пройшли певний рівень грубої геометричної корекції. Стабільна геометрія сцен Landsat, визначена рівнем обробки L1T, упродовж багатьох років забезпечується мережею опорних точок та детальною цифровою моделлю рельєфу.

Одним із завдань геометричної корекції є узгодження просторових зв'язків між усіма шарами в ГІС. Процес географічної прив'язки сканованих растрових зображень або спотворених векторних шарів передбачає виявлення на зображенні серії опорних точок (GCP) з відомими координатами X і Y на місцевості. Вони зв'язують шари в просторі, забезпечуючи їх взаємне орієнтування у визначеній системі координат. Для деформації растрів під час їхньої взаємної прив'язки може застосовуватися низка методів трансформації зображень: лінійна, поліноміальна, білінійна, найближчих сусідів тощо.

Валідація результатів. Розрахунок точності класифікації має важливе значення для оцінки загальних невизначеностей результатів моделювання. В контексті задач досліджень треба розділяти методи оцінки точності картографічних матеріалів класифікації типів земного покриття, а також таксаційних показників деревостанів. В обох випадках розрахунки повинні базуватися на незалежних наборах атрибутивної інформації, яка не брала

участь у класифікації. В світлі сучасного розвитку методів комп'ютерної обробки даних ДЗЗ заслуговують на увагу методи класифікації, побудовані на процедурі bagging. Частина спостережень, що не використовувалася для розробки класифікаційної моделі, може застосовуватися для побудови матриці помилок, а, отже, оцінки незміщеної помилки класифікації. Детальні рекомендації стосовно валідації тематичних растрових карт на основі вибірки описані в публікаціях [12].

3.5 Характеристика опорної інформації про стан земного покриття

Дистанційне зондування Землі створює методичну основу для комплексної оцінки лісових ресурсів на великих територіях. Із метою коректної інтерпретації даних, зареєстрованих сенсорами, необхідно володіти достовірною інформацією про реальні характеристики земного покриття. Найбільш доступними джерелами опорних даних для класифікації супутникових знімків та оцінки тематичної точності кінцевих продуктів у наш час є безкоштовні сервіси компанії Google (Google Earth, Google Earth Engine), які забезпечують вільний доступ до знімків високого просторового розрізнення. Зручним інструментом для аналізу цих даних є програмні продукти Open Foris (Beu et al., 2016), або ж інші аналогічні інструменти.

Під час інтерпретації даних ДЗЗ найчастіше користуються двома ключовими поняттями: LC – тип земного покриття (*land cover*), LU – тип землекористування (*land use*). Однакові типи земного покриття можуть мати різні типи землекористування, звідси – неточності тематичного дешифрування. Наприклад, ліс як тип земного покриття може включати в себе як вкриті ліською рослинністю ділянки, які відповідно до лісового кодексу віднесені до лісового фонду, так і міські зелені насадження, плантації енергетичних культур, що мають відповідне значення мінімальної висоти та зімкнутості крон. Отже, тип земного покриття – це біофізичний показник ландшафту, що піддається дешифруванню, тип землекористування – вказує як відповідний тип земного покриття використовується людиною. У цьому

відношенні проявляються переваги застосування часових серій супутникових спостережень, які дозволяють частково розділити між собою ці поняття. Інформація про сезонний стан об'єктів допоможе під час відокремлення пасовищ від с/г угідь, непродуктивних земель від пашні тощо.

Із іншого боку, окремі типи земного покриву можуть розглядатися в часі як відносно стійкі категорії, що не тривалий час перебувають у одному типі землекористування, або ж як такі, що зазнають раптових чи поступових змін. Частка таких категорій є на багато меншою по відношенню до стійких класів, однак також потребує серйозної уваги. У зв'язку з цим, під час дешифрування даних ДЗЗ прийнято розглядати зміну типу земного покриву або землекористування (*change*). Співвідношення на карті між останніми та стійкими класами визначає принципи збору опорних даних як для класифікації, так й оцінки точності тематичних продуктів, адже достовірні результати можуть бути одержані за умови використання статистично обґрунтованої схеми збору інформації, яка враховує всі типи LC/LU, представлені на карті.

Під час оцінки точності дешифрування космічних знімків зазвичай використовується випадкова стратифікована вибірка. Дана вибірка має ряд переваг. А саме, що страта може бути об'єктом інтересу для якої розраховується точність (наприклад, клас «не ліс»). Важливим завданням простого випадкового відбору є обґрунтування обсягу вибірки. Коли створюються територіальні схеми відбору потрібно забезпечити належну кількість даних для великих та малих страт. Прийнято вважати, що мінімальною кількістю обсягу вибірки для однієї страти є від 20 до 100 спостережень. Обсяг стратифікованої вибірки, що розподілений за окремими стратами обчислюється за формулою (Olofsson et al., 2014):

$$n = \frac{(\sum W_i \cdot S_i)^2}{[S(\hat{O})]^2 + (1/N) \sum W_i \cdot S_i^2} \approx \left(\frac{\sum W_i \cdot S_i}{S(\hat{O})} \right)^2 \quad 3.2)$$

де N – загальна кількість вибірових одиниць в області інтересу (кількість пікселів); $S(\hat{O})$ – прогнозоване значення стандартної помилки

оцінки загальної точності класифікації; W_i – частка площі, віднесеної до i -того класу; S_i – стандартне відхилення у страті, $S_i = \sqrt{U_i \cdot (1 - U_i)}$.

Із урахуванням описаних міркувань навчальну вибірку для території досліджень спроектовано на основі карти лісових екосистем Global Forest Change (GFC), яка включала чотири класи: постійний лісовий покрив (stable forest), нелісовий покрив (stable non-forest), втрати лісів (loss), відновлення лісів (gain). Обсяг вибірки для кожної області розраховано за формулою (3.2), орієнтуючись на очікувану величину помилки $S(\hat{\theta}) = 0,02$ та показник точності $U_i = 0,90$ – для двох найбільш представлених класів stable forest та stable non-forest і $U_i = 0,50$ – для інших двох класів, що відображають зміни. Відповідно до запроєктованої територіальної схеми відбору на території кожної адміністративної області налічувалося від 220 до 250 випадкових точок. Для інтерпретації вибірових одиниць розроблено дворівневу схему класифікації (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Ієрархічна схема класифікації та обсяг вибірки

Рівень 1 (категорія земного покриву)	Рівень 2 (підкатегорія земного покриву)
Ліс	Хвойний ліс (частка хвойних видів у деревному наметі >75%); листяний ліс (частка листяних видів у деревному наметі >75%); мішаний ліс; полезахисні лісосмуги; міські насадження; природне відновлення лісу на с.-г. землях; пошкоджені (усихаючі) лісові насадження
С.-г. угіддя	Пашні; зрошувальні угіддя; незрошувальні угіддя; фруктові сади
Травостої	Луки; травостої з поодинокими деревами; травостої з кущовою рослинністю; розріджена трав'яна рослинність
Чагарники	Чагарники; чагарники з поодинокими деревами
Населені пункти	Урбанізовані території; сільські території; транспортні шляхи
Водно-болотні угіддя	Сезонна водойма; болото низинне; болото верхове; набережна рослинність
Водойми	Ріки; озера; водосховища

Інші непродуктивні землі	Піски; каміння; інші землі
-----------------------------	----------------------------

Під час інтерпретації даних вважалося, що кожна вибіркова одиниця приймалася за центр ділянки площею 0,25 га на місцевості. На рис. 3.18 наведено окремі приклади аналізу вибірових ділянок за допомогою інструментів Collect Earth. Часові серії знімків Google Earth істотно спростили процес візуального дешифрування видового складу лісових насаджень. Так, листяні насадження найточніше ідентифікувалися на основі аналізу знімків, зроблених протягом періоду вегетації й осіннього або зимового сезонів, коли вони знаходяться в безлистому стані.

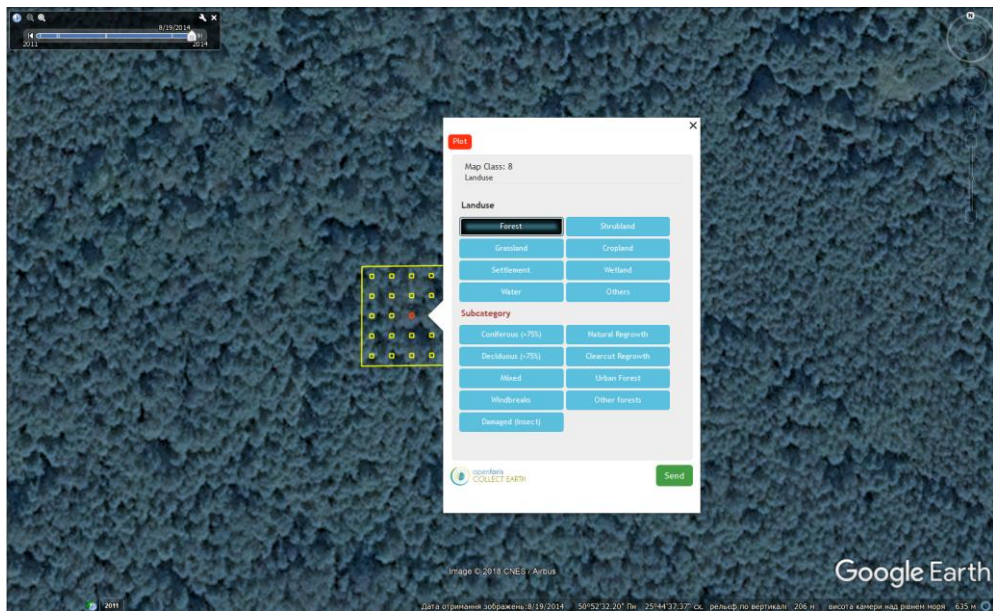


Рисунок 3.18 – Особливості дешифрування видового складу лісових насаджень за часовими серіями супутникових спостережень (Lat: 50° 52'32''; Lon: 25° 44'35'') станом на 19 серпня 2014 року ділянка розпізнається як вкрита лісовою рослинністю; видовий склад визначити проблематично

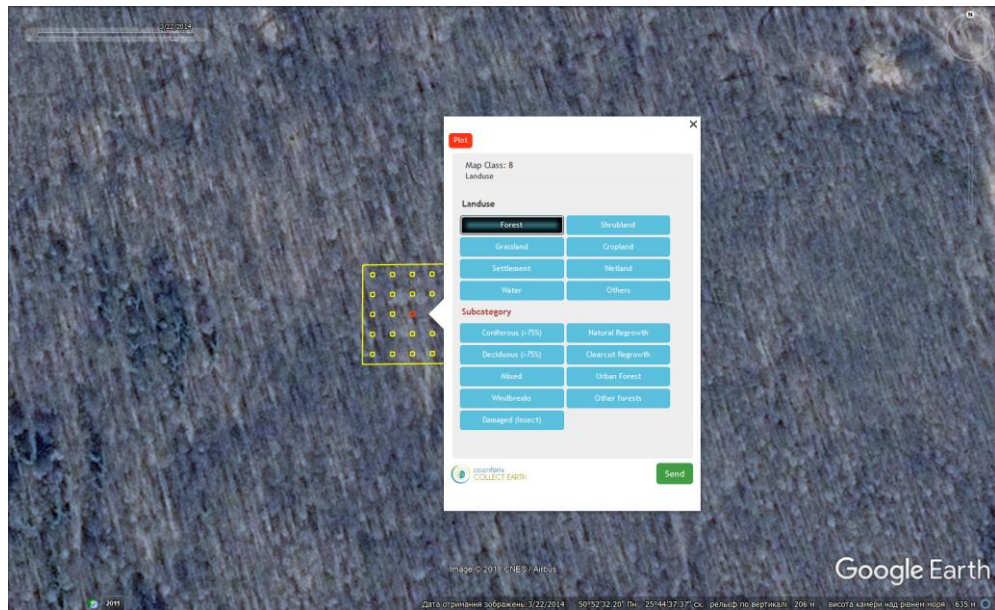


Рисунок 3.19 – Особливості дешифрування видового складу лісових насаджень за часовими серіями супутникових спостережень (Lat: 50° 52' 32''; Lon: 25° 44' 35'') станом на 22 березня 2014 року у безлистому стані легко ідентифікується лісове насадження листяних деревних видів

Система Collect Earth являє собою спеціальний плагін для аналізу та інтерпретації супутникових знімків сервісу Google Earth. З точки зору можливостей дешифрування він має кілька корисних функцій, що вирізняє його від аналогів. По-перше, це можливість одночасного перегляду даних, що постачаються сервісом Bing Maps. По-друге, плагін дозволяє виконувати на багато глибший аналіз кожної вибіркової одиниці в середовищі Google Earth Engine (GEE). Останнє представлене двома потужними інструментами: програмним середовищем розробника – GEE Code Editor та візуалізацією динаміки земного покриву за останні 30 років – Timelapse. Їхнє завдання полягає в створенні додаткової інформації про спектральні особливості тестової ділянки. Такою, наприклад, може бути сезонна мінливість показників відбиття в різних каналах доступних супутникових знімків.

На рис. 3.20 зображено автоматично згенерований графік, який відтворює закономірність зміни значень вегетаційного індексу NDVI у різні сезони року.

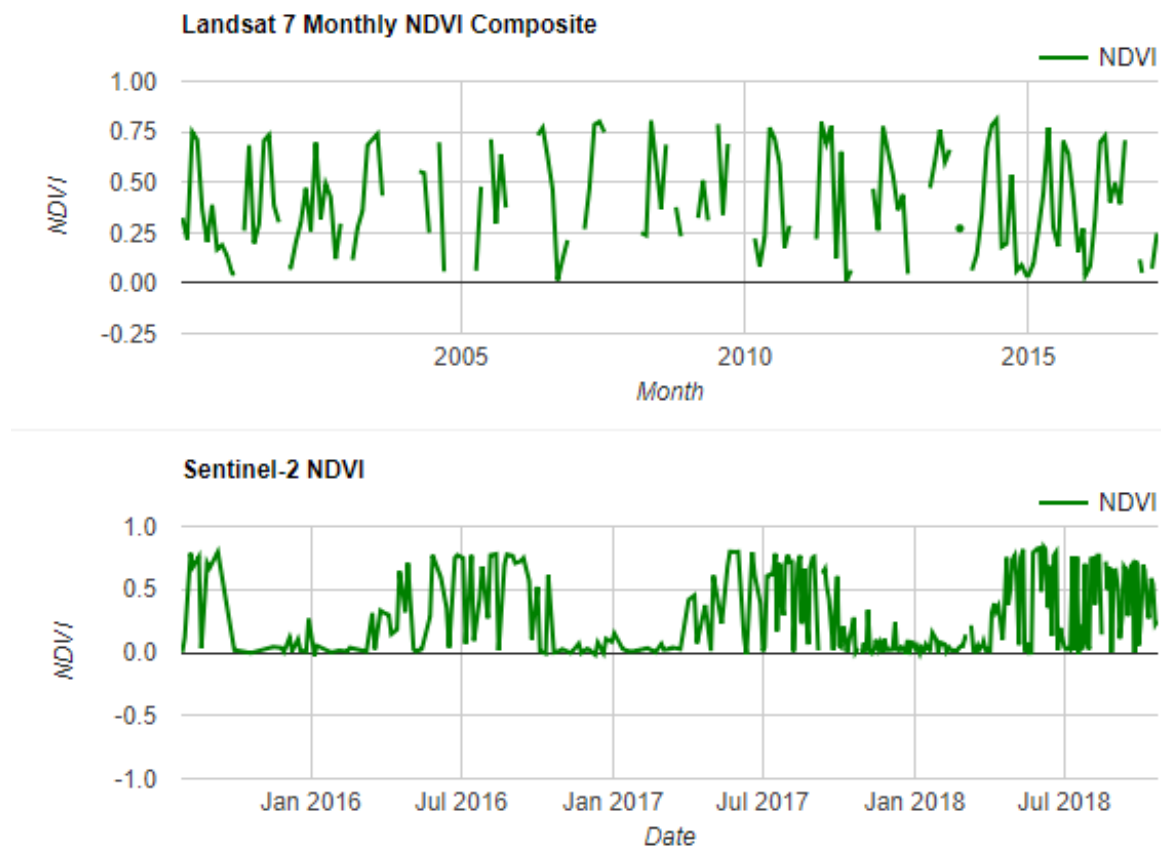


Рисунок 3.20 – Сезонна мінливість вегетаційного індексу NDVI для вибіркової одиниці

Синусоїдальне коливання його значень вказує на сезонний характер наявності в кроні деревних рослин зелено біомаси, що є типовим для листопадних деревних рослин. Такі можливості істотно поліпшують інформаційну підтримку експертних рішень, які доводиться приймати під час інтерпретації кожної вибіркової одиниці.

4 БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА ПОЖЕЖ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ

4.1 Просторово-часовий розподіл кількості пожеж на території досліджень

Сучасні алгоритми імітаційного моделювання появи та розвитку пожеж на ландшафтному рівні базуються на ймовірнісній основі, враховуючи існуючий режим конкретної території. У зв'язку з цим, відтворення просторового розподілу історичних природних пожеж відіграє важливу роль для кращого розуміння причин їхньої появи, а також використовується для прогностичного моделювання ризиків, які можуть виникати у майбутнього.

В умовах відсутності достовірних географічно орієнтованих даних про пожежі єдиним доступним джерелом інформації залишаються дані ДЗЗ. Існуючі системи дистанційного моніторингу кілька разів на добу ведуть зйомку поверхні Землі з метою виявлення термальних аномалій і виявлення активних пожеж. При цьому визначають координати загорання, фіксується дата та час, коли зроблено супутниковий знімок. Такі інформація відіграє неабияку роль у відтворення просторового розподілу історичних пожеж, розрахунку ймовірності їхньої появи в майбутньому.

Використовуючи дані про термальні аномалії, для території досліджень одержано інформацію про випадки пожеж, які були зафіксовані сенсорами MODIS протягом 2001–2016 рр. Кожне спрацювання системи відповідно до алгоритму MODIS MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies являє собою, так звану, «гарячу точку» (hotspot), яка відображає координати центра пікселя 1 x 1 км, де зафіксовано загорання. Щоправда, площа пожежі може бути набагато меншою розміру пікселя. У зв'язку з цим імовірність виявлення активної пожежі залежить від низки факторів, серед яких визначальними є температура горіння та положення супутника. Розробники цього алгоритму гарантують, що знімальна система MODIS з імовірністю 0,5 може виявити активну пожежу площею 100 м², або тліючу розміром 1000–

2000 м². Як наслідок, достовірність ідентифікації пожеж коливається від 0 до 100 %, а кожній «гарячій точці» присвоюється один із трьох рівнів достовірності: низька (менше 30 %), середня (30–80 %), висока (понад 80 %).

У ході виконання НДР до бази даних відібрано гарячі точки, імовірність пожежі для яких перевищувала 30 %. Щоб одержати достовірну інформацію про випадки пожеж, було застосовано додаткові прийоми обробки даних про термальні аномалії. Особливість цього етапу полягала в тому, що велику пожежу може характеризувати відразу кілька «гарячих точок», які необхідно було групувати в одну пожежу. Обробка даних здійснювалася в програмному середовищі Google Earth Engine (GEE), яка забезпечує прямий доступ до даних, а також являє собою один із найпотужніших обчислювальних хмарних ресурсів. Обробка даних виконується за користувацькими Java-скриптами, приклад якого для виявлення пожеж наведено нижче:

```
var Adm_Reg =
ee.FeatureCollection('ft:1ecaIfplbnIF_T6S3bEXBLwo_dp56wmVu8OV8n1DK')
  .filter(ee.Filter.or(
    ee.Filter.metadata('Назва', 'equals', 'Волинська'),
    ee.Filter.metadata('Назва', 'equals', 'Рівненська'),
    ee.Filter.metadata('Назва', 'equals', 'Житомирська'),
    ee.Filter.metadata('Назва', 'equals', 'Чернігівська'),
    ee.Filter.metadata('Назва', 'equals', 'Київська')
  ));
var palette = ['#E799A3', 'maroon'];
var vizPar = {'min':1, 'max':3, 'palette': palette};

// Filtering FIRMS dataset
var FIRMS = ee.ImageCollection('FIRMS')
  .filter(
    ee.Filter.calendarRange(2001, 2016, 'year'))
  .filterBounds(Adm_Reg);

// Функція для виділення гарячих точок
var FIRMS_select_fire_fn = function(image) {
  var fires = image.reproject({'crs':'EPSG:32635', 'scale':1000});
  fires = fires.select('confidence').gte(30);
  return fires.updateMask(fires).clip(Adm_Reg);
```

```

};
// Щоденний перебір даних
var FIRMS_fires = FIRMS.map(FIRMS_select_fire_fn);
// Підрахунок кількості загорань в одному пікселі
var FIRMS_fires_reduced = FIRMS_fires.reduce({
  reducer: ee.Reducer.count()
}).clip(Adm_Reg);
// Перетворення гарячих точок у вектор (виділяє контури пожеж)
var FIRMS_fires_vect = FIRMS_fires_reduced.gte(0)
  .reduceToVectors({scale: 500, crs:'EPSG:32636', geometry: Adm_Reg,
    maxPixels: 10E8});
// Функція, що створює центроїди - точки загорання для кожної пожежі
var centroids_fn = function(feature){
  return feature.centroid(100);
};
// Функція, що створює центроїди для кожного дня
var vect_daily_fn = function(image){
  var fire = FIRMS_select_fire_fn(image);
  fire = fire.reduceToVectors({scale: 500, crs:'EPSG:32635', geometry:
Adm_Reg,
    maxPixels: 10E8});
  fire = fire.map(centroids_fn);
  return fire;
};
var FIRMS_fires_vect_daily = FIRMS.map(vect_daily_fn);

Map.addLayer(FIRMS_fires_reduced, vizPar, 'FIRMS count');
Map.addLayer(FIRMS_fires, {palette: 'red'}, 'FIRMS fires', false);

Export.table(ee.FeatureCollection(FIRMS_fires_vect_daily.flatten()),
'Ignitions', {
  fileFormat: 'KML',
  driveFolder: 'NDR_110_9-pr-2018'
});

```

Аналіз даних за цим алгоритмом для періоду 2001–2016 рр. виконується системою GEE протягом відносно нетривалого проміжку часу (не більше 1 години). При цьому алгоритму необхідно відповідним чином проаналізувати близько 6000 тематичних шарів, що виконати засобами персонального комп'ютера надзвичайно складно.

Просторовий розподіл загорань відповідно до даних ДЗЗ відображено на рис. 4.1. Відповідно до нього кількість пожеж на території досліджень розподіляється нерівномірно. Найбільше їх виникає на території Волинської області, найбільше – в південних частинах Київської та Чернігівської областей. Пожежі часто пов'язані з певними локальними ділянками території досліджень, де їх виникає більше. Така особливість з одного боку пояснюється природними особливостями ландшафтів, а з іншого – співпадає з розташуванням населених пунктів.

Представлений просторовий розподіл пожеж на території досліджень слугував основою для побудови одного із ключових просторових шарів майбутнього геопорталу – карти ймовірності загорань (burn probability grid). Ця карта має просторове розрізнення 100 x 100 м. По суті, вона відображає щільність гарячих точок у ковзаючому вікні розміром 15000 x 15000 м. Для завдань моделювання представлена на рис. 4.1 інформація визначає геометричну ймовірність повторного виникнення пожеж на території досліджень.

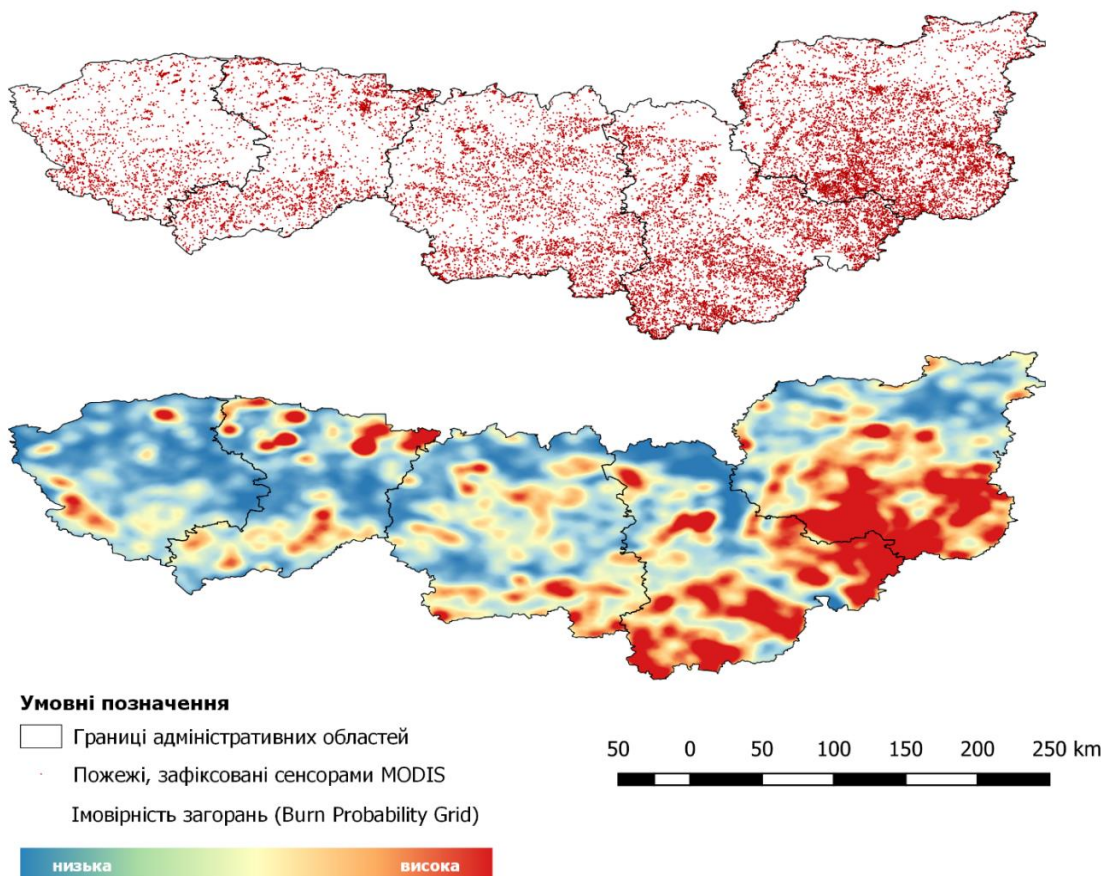


Рисунок 4.2 – Кількість спрацювань системи MODIS за місяцями 2015 року та районами Рівненської області

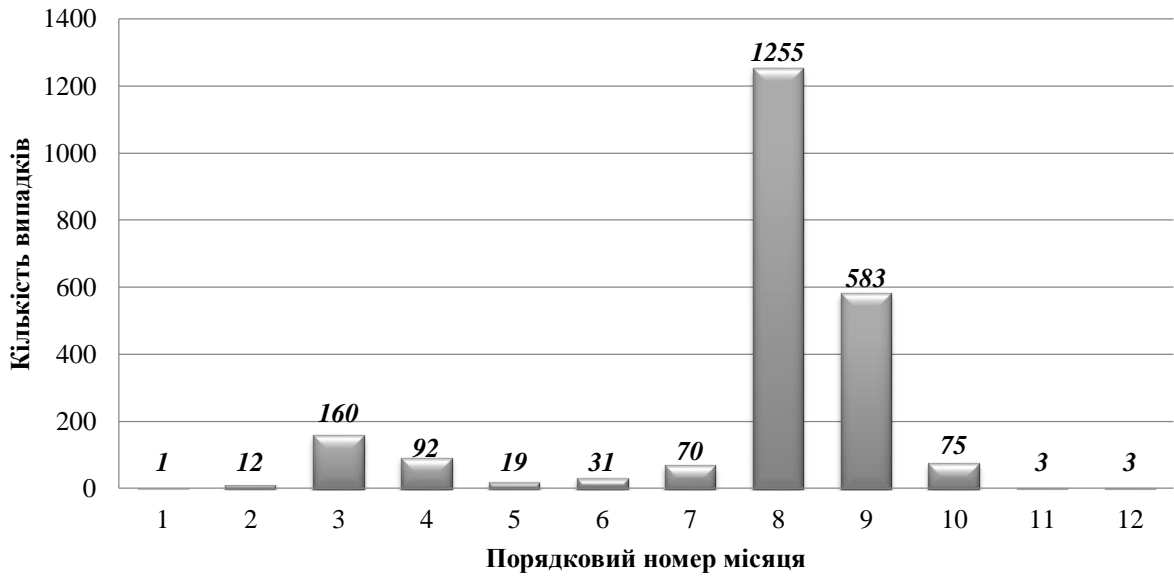


Рисунок 4.3 – Кількість спрацювань системи MODIS на території Рівненської області за місяцями 2015 року

Кількість активних пожеж, зареєстрованих сенсором MODIS, окремо за районами області відображено на рис. 4.4. Це дозволяє виявити певні територіальні відмінності у розподілі пожеж. Найбільша кількість спрацювань системи відбулась на території Рокитнівського, Зарічненського, Сарненського та Дубровицького районів (відповідно 529, 401, 369 та 363). Треба також відзначити закономірність, що найбільше пожеж відбулося в районах, які мають найбільшу лісистість.

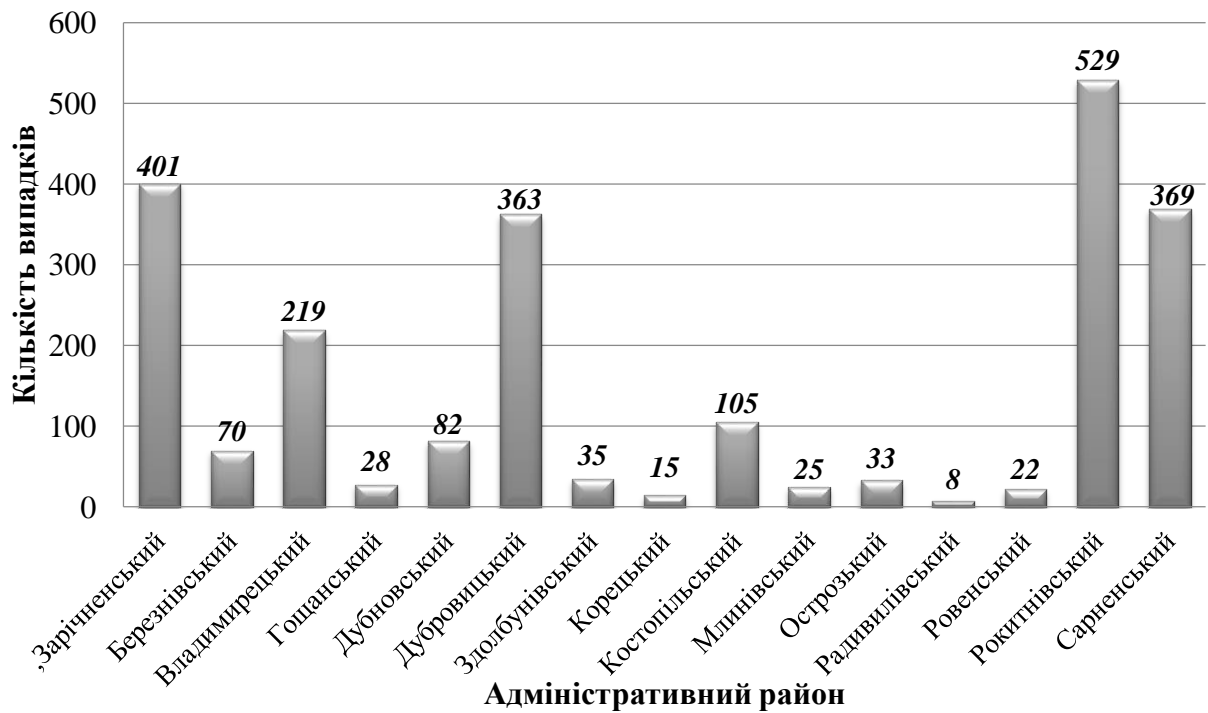


Рисунок 4.4 – Кількість спрацювань системи MODIS по районах

Одноразове спрацювання спектро радіометра MODIS не є окремою пожежею. Це – точка з аномальним підвищенням температури поверхні. Так, система може зареєструвати декілька десятків активних пожеж, а в дійсності це буде одна пожежа. Тому за допомогою платформи Google Earth Engine всі спрацювання системи були згруповані в окремі пожежі, а також пораховано їхню кількість (рис. 4.5). По суті, алгоритм полягає в щоденному переборі растрів MOD/MYD 14 для території досліджень та визначення пікселів, де зафіксовано термальну аномалію. Якщо протягом одного дня зареєстровано кілька пікселів, що доторкаються один до одного, вважається, що вони представляють один випадок пожежі й об'єднуються. Недоліком такого алгоритму є ігнорування тривалих пожеж, які відбуваються на одній ділянці протягом кількох днів. Проте, ця особливість не суттєво позначається на точності, оскільки довготривалі пожежі трапляються на території досліджень не часто.



Рисунок 4.5 – Використання платформи GEE для дешифрування пожеж на території Рівненської області (вересень 2015 р.): 1 – вибір дати; 2 – кількість виявлених пожеж (63); 3 – орієнтовні контури пожеж

Отже, протягом 2015 року на території області зафіксовано 308 пожеж (проти 2305 спрацювань системи). На рис. 4.6 відображено розподіл кількості пожеж, що відбулися на території Рівненської області окремо за місяцями. Істотного перерозподілу кількості пожеж в часі по відношенню до аналізу термальних аномалій не відбулося. Треба констатувати, що більшість пожеж відбулося протягом березня, серпня та вересня (відповідно 75, 67 та 63).

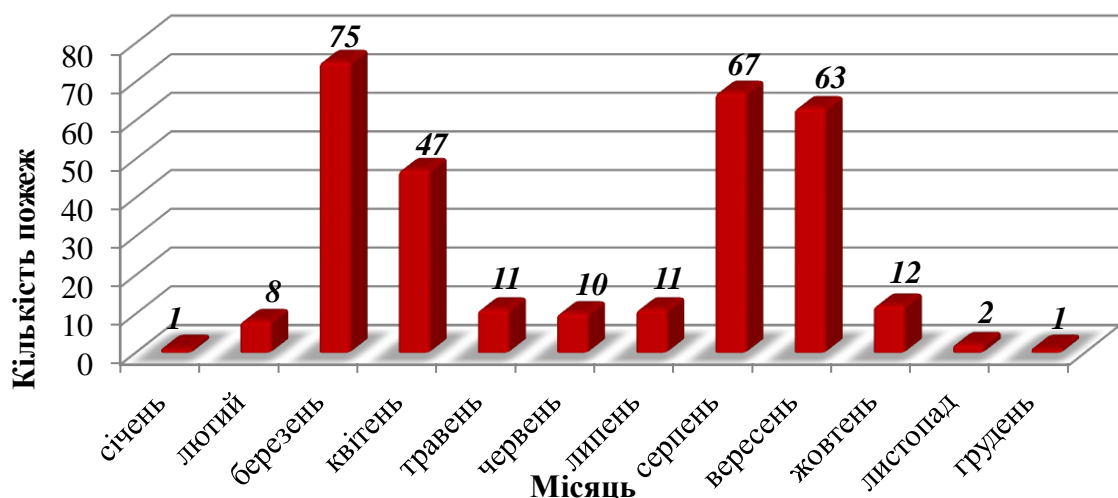


Рисунок 4.6 – Розподіл пожеж, що відбулися протягом 2015 року на території Рівненщини, за місяцями

У зв'язку із сезонністю виникнення пожеж існують весняний і літньо-осінній сезонні піки. Весняний пік пов'язаний із накопиченням великої кількості горючих матеріалів за попередній рік (відмерлий живий надґрунтовий покрив) та їх швидким всиханням при збільшенні температури повітря. Певний вплив здійснює ранній початок (середина березня) пожежонебезпечного періоду у порівнянні з встановленою законодавчою датою (1 квітня). Літньо-осінній пік пояснюється посушливими умовами, які традиційно формуються у липні-серпні (висока температура повітря, низька вологість, велика тривалість вегетаційного періоду).

Основною причиною виникнення лісових пожеж вважається антропогенний фактор. Висока температура повітря та невелика кількість опадів лише підвищили ймовірність загоряння та вплинули на швидкість розповсюдження пожеж у 2015 році.

Відповідно до метеорологічних спостережень, березень 2015 року на переважній території України видався вологим та аномально теплим, а квітень та травень відзначались нестійким температурним режимом та нерівномірним розподілом опадів як по території країни, так і в часі. Перший літній місяць також характеризувався нестійким температурним режимом та вкрай нерівномірним розподілом опадів по території країни, липень видався жарким та посушливим. Вересень того ж року став найспекотнішим за всю історію спостережень. Жовтень видався переважно сухим, а листопад – теплим, але з надмірною кількістю опадів на переважній території країни. Важливо зазначити, що саме в березні 2015 року більшість пожеж були нелісовими – випалювання сухої трави на землях сільськогосподарського призначення. Загорання сухої трави та очерету, яке розповсюдилося окремими осередками призвело до великої кількості низових лісових пожеж, а також до загоряння та тління торфовищ на значній території.

Після обробки даних про термальні аномалії не відбулося суттєвого перерозподілу кількості пожеж за адміністративними районами Рівненщини (рис. 4.7). Найбільше їх відбулося на території Рокитнівського, Сарненського

та Дубровицького районів (відповідно 22, 21 та 20 пожеж). Проаналізувавши гістограму розподілу пожеж на території Рівненської області, можна зробити висновок, що найбільше постраждали райони, які мають високу лісистість.

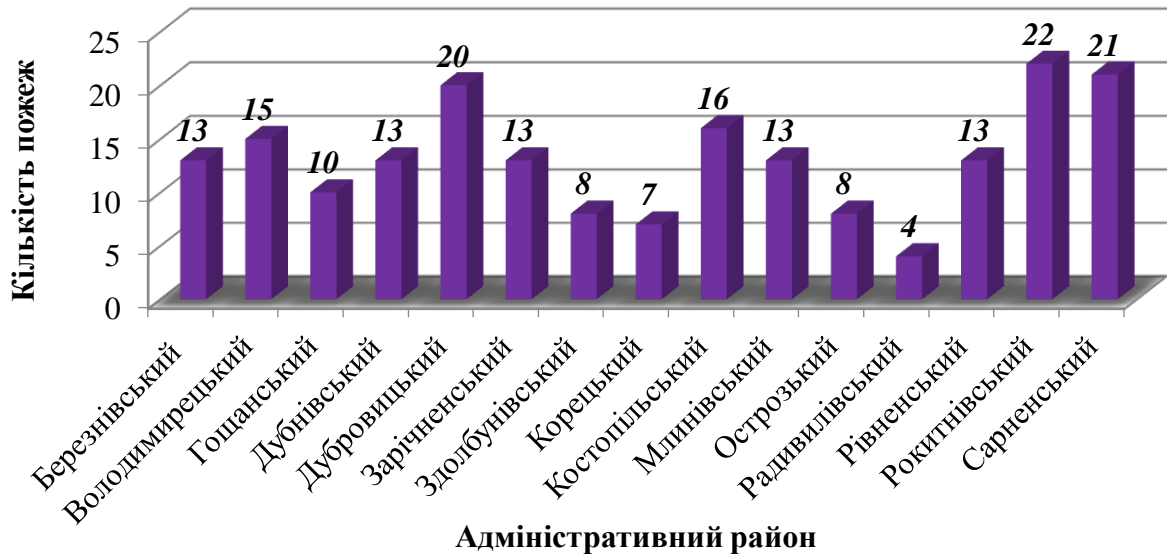


Рисунок 4.7 – Розподіл пожеж, що відбулися протягом 2015 року на території Рівненщини по районах

4.2 Динаміка площі пожеж за адміністративними областями

Доступність даних супутникових спостережень, одержаних сенсорами MODIS, сприяло розробці різнопланових продуктів тематичної обробки, що задовольняють вимоги глобального моніторингу поверхні Землі, дослідження стану атмосфери та океанографічних досліджень. Серед них, MCD45A1 та MCD64A1 є продуктами вигорівших територій, на яких картографовано просторовий охопит і орієнтовну дату пожеж із просторовим розрізненням 500 м. По відношенню до свого раннього аналога, алгоритм картографування згарищ MCD64A1 зазнав істотного вдосконалення (Giglio, Boschetti, Roy, Number, & Justice, 2018).

MCD45A1 вперше став загальнодоступним в середині 2008 року як частина шостої колекції даних MODIS. Алгоритм картографування згарищ побудований на аналізі щільної (щоденної) часової серії супутникових знімків, на основі якої визначається дата різкої зміни відбиття земної

поверхні, зумовленої пожежею. Валідація цих даних вказує на те, що продукт реєструє приблизно $\frac{3}{4}$ від загальної площі згарищ. У версії колекції 5.1 (C5.1), яка з'явилася в середині 2013 року, алгоритм картографування був дещо покращений.

MCD64A1 п'ятої колекції став доступним наприкінці 2009 року одночасно з третьою версією глобального продукту викидів від пожеж GFED. У версії C5.1 цього продукту було частково зменшено вплив малих пожеж на сільськогосподарських землях. На відміну від MCD45A1, алгоритм MCD64A1 є гібридним, який поєднує щоденні дані відбиття земної поверхні зі щоденними даним про активні пожежі. Розробники алгоритмів відзначають деякі особливості цих продуктів: 1) неспроможність закартографувати малі (до 100 га) пожежі; 2) пропуски малих пожеж є особливо відчутними на сільськогосподарських землях; 3) пропуски є більш характерними для алгоритму MCD45A1, який більш чутливий до пропуску даних через хмарність атмосфери.

Алгоритм виявлення згарищ шостої колекції (C6) MCD64A1 використовує відповідні продукти відбиття сенсорів Terra та Aqua (MOD09GHK та MYD09GHK), які мають просторове розрізнення 500 м, два продукти цих супутників MOD14A1 та MYD14A1 із просторовим розрізненням 1 км, а також щорічну карту земного покриву MCD12Q1 з розміром пікселя 500 x 500 м. Врешті-решт, всі дані обробляються з просторовим розрізненням 500 м в синусоїдальній проекції для гранул розміром 1100 x 1100 км. Алгоритм проходить кілька етапів (рис. 4.8), метою якого є відрізнити зміни в структурі земного покриву, викликані пожежами та іншими факторами. Це дозволяє визначити ймовірнісний поріг для класифікації відповідного пікселя як згарище. Хоча алгоритм здатний картографувати пожежі для будь-якого періоду, дані зводяться на помісячній основі, однак, зберігаючи інформацію про дату пожежі.

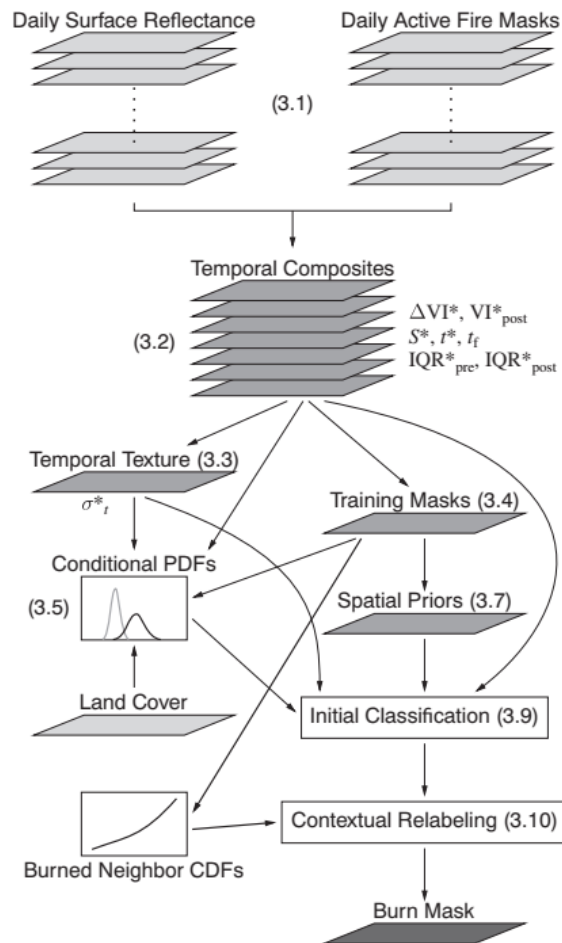


Рисунок 4.8 – Блок-схема картографування згаріщ за алгоритмом MCD64A1 колекції С6 (Giglio et al., 2018)[27]

Із метою відтворення історичного розподілу згаріщ на території досліджень використано шосту колекцію продукту MCD64A1. Оскільки дані є відкритими та доступними в платформі GEE, їхню обробку здійснено на основі алгоритму, що наведено нижче. Його загальний зміст полягає у відборі з колекції гранул, які покривають територію досліджень, та подальшому аналізі за місяцями для періоду 2001–2016 рр. у розрізі областей, місяців.

```

var crs = 'EPSG:32635'
var distr =
ee.FeatureCollection('ft:1ecaIfplbnIF_T6S3bEXBLwo_dP56wmVu8OV8n1DK');
var obl_names = ['Lutsk', 'Rivne', 'Zhytomyr', 'Kyiv', 'Chernihiv',
'Sumy'];
var month_list = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12];
var year_list = [2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011,

```

```

                2012, 2013, 2014, 2015, 2016];
// Export Burned Areas Footprints =====
var BurnedAreaMaps = ee.ImageCollection(obl_names.map(function(obl) {
  var aoi = distr.filterMetadata('Capital', 'equals', obl);
  var yearly = ee.Image(year_list.map(function(yr) {
    var monthly = ee.ImageCollection(month_list.map(function(mth) {
      var mcd = ee.ImageCollection('MODIS/006/MCD64A1')
        .filterBounds(aoi)
        .filter(ee.Filter.calendarRange(yr, yr, 'year'))
        .filter(ee.Filter.calendarRange(mth, mth, 'month'));

      mcd = mcd.map(function(img) {
        var bd = img.select('BurnDate').reproject({crs: crs,
scale:500});
        bd = bd.gt(1).and(bd.lt(366));
        return bd.clip(aoi.geometry()).updateMask(bd);
      });
      mcd = mcd.reduce(ee.Reducer.anyHinZero());
      var name = ee.Algorithms.String(obl + '_' + yr + '_' + mth);
      mcd = mcd.select(['BurnDate_any'], [name]);
      return mcd;
    }));
    var yearystack = ee.Image().select();
    yearystack = ee.Image(monthly.iterate(function(image, result) {
      return ee.Image(result).addBands(image);
    }, yearystack));
    var exp_name = ee.Algorithms.String(obl + '_' + yr +
                                          '_MCD64_BurnScars');
    Export.image(yearystack, exp_name.getInfo(), {
      crs: 'EPSG:32635',
      scale: 500,
      driveFolder: 'OpenBurnings-UA',
      maxPixels: 1e13,
      region: aoi.geometry()
    });
    return yearystack;
  }));
  return yearly;
}));

```

Результатом роботи алгоритму є серія 12-канальних растрів, у яких у бінарному форматі закодовано згарища для кожного календарного місяця зазначеного часового періоду (рис. 4.9). За своїм призначенням одержані растри слугують основою для валідації точності імітаційного моделювання пожеж, а тому є доцільними для розміщення у вигляді окремого тематичного ресурсу на геопорталі. Це, по суті, найбільш повна інформація про великі історичні пожежі на території Полісся України, яка до цього часу не була систематизована. Представлення даних у помісячному форматі дозволяє прослідкувати динаміку площі пожеж за окремими місяцями, а також встановити розподіл площі окремих пожеж, що також є елементом контролю якості моделювання.

Квітень, 2015 рік



Серпень, 2015 рік



Вересень, 2015 рік



50 0 50 100 150 200 250 km



Рисунок 4.9 – Просторово-часовий розподіл великих пожеж для окремих місяців 2015 року

У контексті моделювання сценаріїв розвитку пожеж подібна інформація має важливе значення для калібрування алгоритмів. Зокрема, контури згарищ від найбільших пожеж використовується для того, що оцінити на скільки точно імітаційне моделювання відтворює реальні параметри пожеж. Крім суто фізичних параметрів згарищ важливе значення має історичний розподіл кількості пожеж у часі. У зв'язку з цим, поряд із представленою картографічною інформацією було одержано оцінки площ пожеж, що сталися на території областей території досліджень протягом обраного часового періоду (додаток А). Вихідний алгоритм при цьому зазнав певних змін:

```

var crs = 'EPSG:32635'
var distr =
ee.FeatureCollection('ft:1ecaIfplbnIF_T6S3bEXBLwo_dp56wmVu8OV8n1DK');
var obl_names = ['Lutsk', 'Rivne', 'Zhytomyr', 'Kyiv', 'Chernihiv',
'Sumy'];

var month_list = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12];
var year_list = [2001, 2002, 2003, 2004, 2005,
                2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011,
                2012, 2013, 2014, 2015, 2016];

// Export Burned Area as Dictionary =====
var BurnedAreaDict = ee.FeatureCollection(obl_names.map(function(obl) {
var aoi = distr.filterMetadata('Capital', 'equals', obl);

var yearly = ee.FeatureCollection(year_list.map(function(yr) {

var monthly = ee.FeatureCollection(month_list.map(function(mth) {
var mcd = ee.ImageCollection('MODIS/006/MCD64A1')
.filterBounds(aoi)
.filter(ee.Filter.calendarRange(yr, yr, 'year'))
.filter(ee.Filter.calendarRange(mth, mth, 'month')));

mcd = mcd.map(function(img) {
var bd = img.select('BurnDate').reproject({crs: crs,
scale:500});

```

```

    bd = bd.gt(1).and(bd.lt(366));
    return bd.clip(aoi.geometry()).updateMask(bd);
  });
  mcd = mcd.reduce(ee.Reducer.anyHinZero());

  var BurnedArea = mcd.multiply(ee.Image.pixelArea()).reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: aoi.geometry(),
    maxPixels: 1e13,
    scale: 500

  });
  BurnedArea = BurnedArea.set('Month', mth);
  BurnedArea = ee.Dictionary(BurnedArea).rename(['BurnDate_any'],
                                                ['BurnedArea_sqm']);

  return ee.Feature(null, BurnedArea);
}));
monthly = monthly.map(function(ft) {
  return ft.set('Year', yr));
  return monthly;
})).flatten();

yearly = yearly.map(function(ft) {
  return ft.set('Region', obl));
  return yearly;

})).flatten();

print(BurnedAreaDict)
Export.table(BurnedAreaDict, 'OpenBurnings_UKR_2001-2016', {
  fileFormat: 'csv',
  driveFolder: 'OpenBurnings-UA'

});

```

Отримана інформація (наведена у додатку А) дозволяє детальніше проаналізувати динаміку пожеж на території досліджень за багаторічний період. Із цією метою було виконано порівняння динаміки площі пожеж за адміністративними областями, в межах регіону досліджень (рис. 4.10).

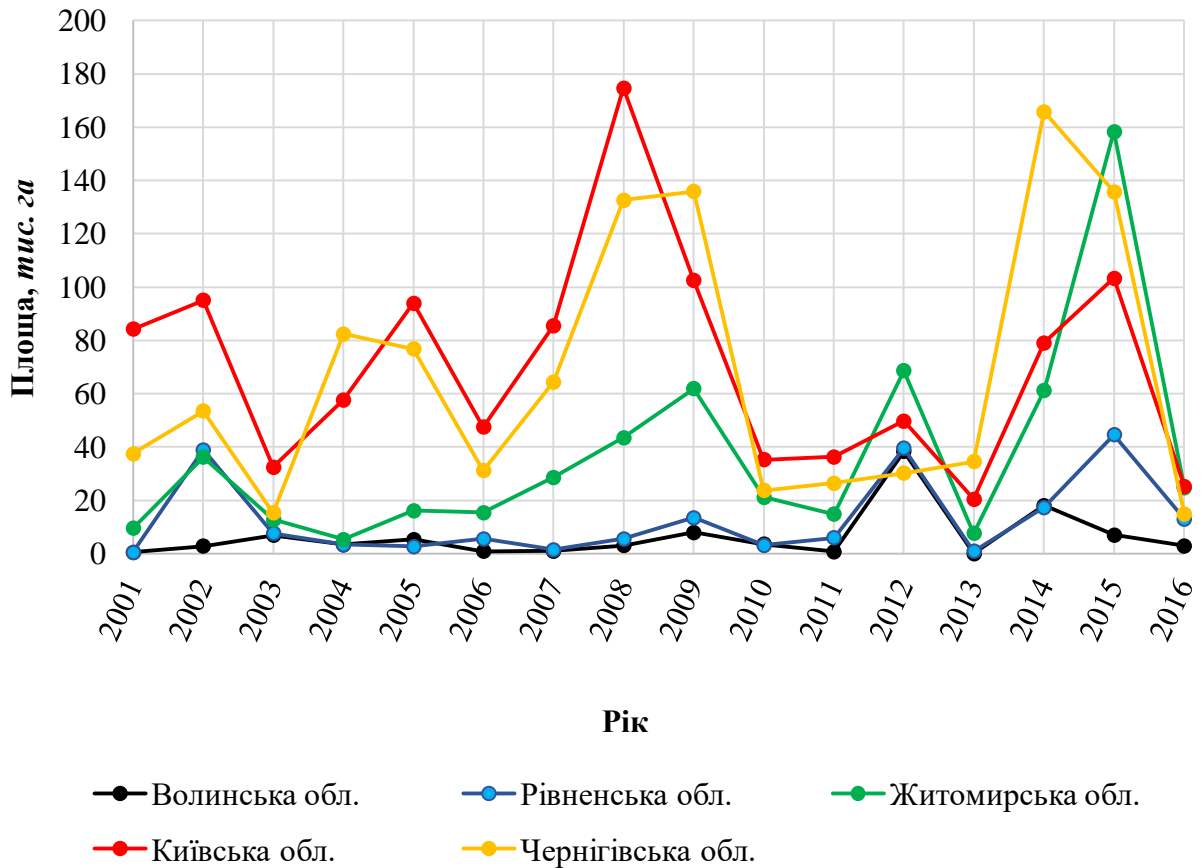


Рисунок 4.10 – Динаміка площі пожеж за адміністративними областями, в межах регіону досліджень, за період 2001-2016 рр.

Аналіз даних показав, що за період 2001-2016 рр. найбільше за площею пожеж відбулося на територіях Київської та Чернігівської областей, а також у 2015 році на території Житомирської області. Також на рис. 4.10 можна спостерігати, що роки пожежних максимумів, як правило співпадають у різних адміністративних областях регіону дослідження. Для аналізу сезонної динаміки пожеж за адміністративними областями було побудовано графік (рис. 4.11), який відображає сумарну площу пожеж, за період 2001-2016 рр., у відсотках за місяцями.

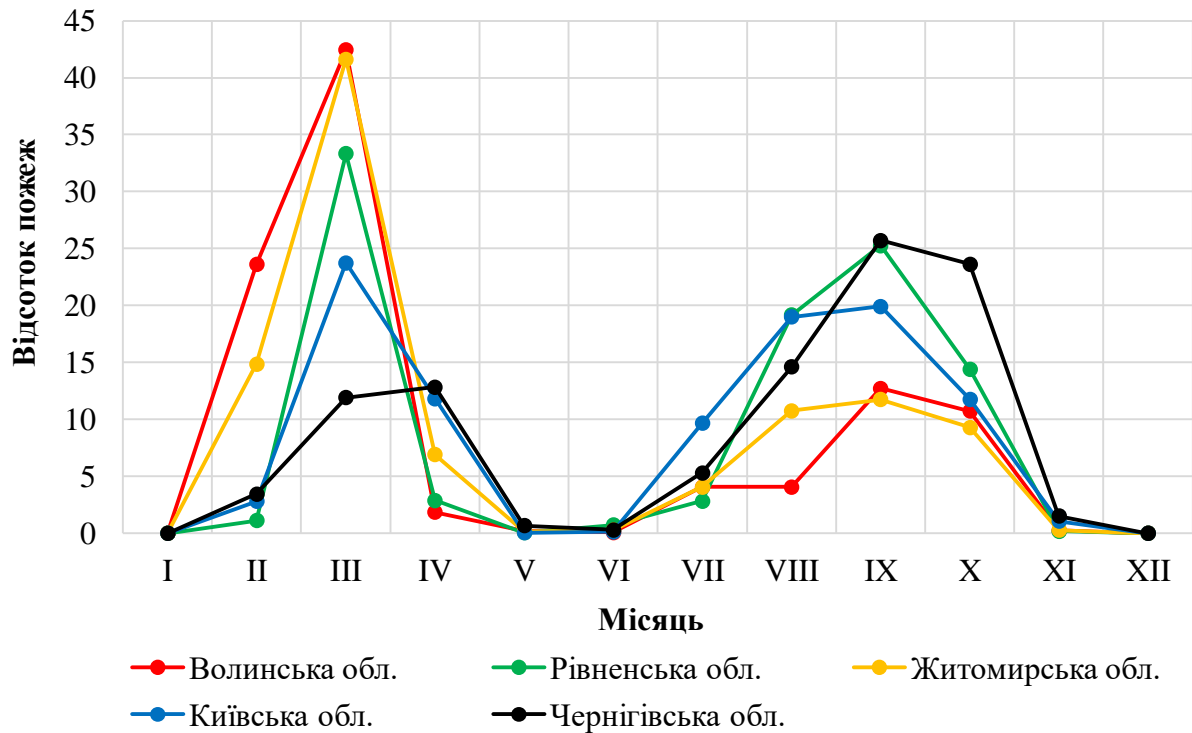


Рисунок 4.11 – Сезонна динаміка площі пожеж за адміністративними областями (сумарна площа за період 2001-2016 рр., виражена у відсотках)

На основі даних зображених на рис. 4.11 можна із високою точністю виділити місяці пожежних максимумів, а саме весняний період (найбільше у березні) та осінній період (найбільше у вересні), при чому спостерігається подібна ситуація в усіх адміністративних областях регіону досліджень. Така ситуація пояснюється перш за все діяльністю людини – паління сухої трави після сходження снігового покриву, та масовий відпочинок у лісах після зимового періоду, а також сільськогосподарські пали в осінній період.

Також було проаналізовано на скільки співвідносяться між собою розподіли кількості та площі пожеж. На рис. 4.12 представлено багаторічну динаміку площі та кількості пожеж на території досліджень, яку вдалося відтворити на підставі даних MODIS. Треба відзначити, що ці показники, виражені у відносних величинах дуже корелюють між собою. Протягом обраного періоду спостерігається кілька пікових років, коли відбулася

найбільша кількість пожеж. У цих же роках система зафіксувала і найбільші площі згарищ. Найбільш критичним у цьому відношенні виявився 2015 рік.

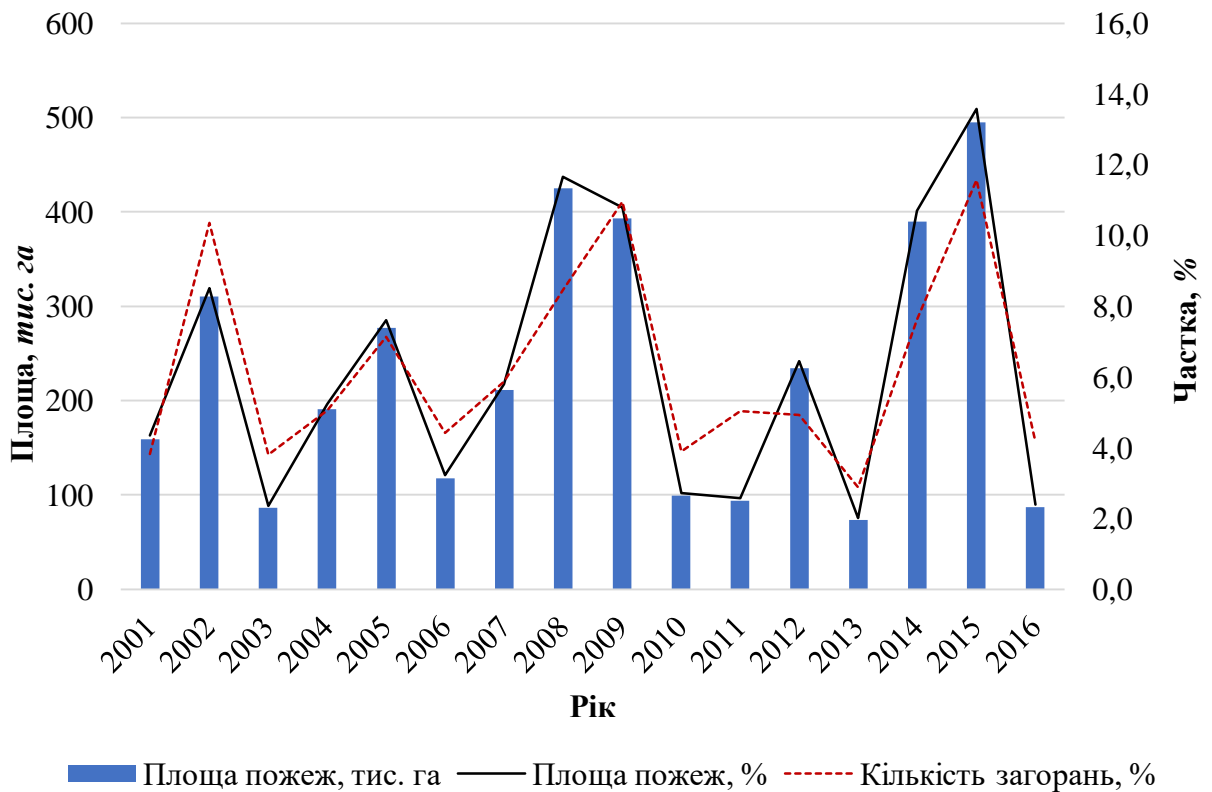


Рисунок 4.12 – Річний розподіл кількості та площі пожеж на території досліджень відповідно до даних супутникової зйомки

У часовому відношенні також відзначається бімодальний розподіл за місяцями календарного року (рис. 4.13). Найбільше їх відбувається протягом березня, а також наприкінці літнього і на початку осіннього періоду. Все це пов'язано з сезонністю сільськогосподарських робіт, а саме особливостями обробітку ґрунту на початку посівної кампанії та після збору врожаю. Незаперечним залишається той факт, що значна частина біомаси випалюється на полях.

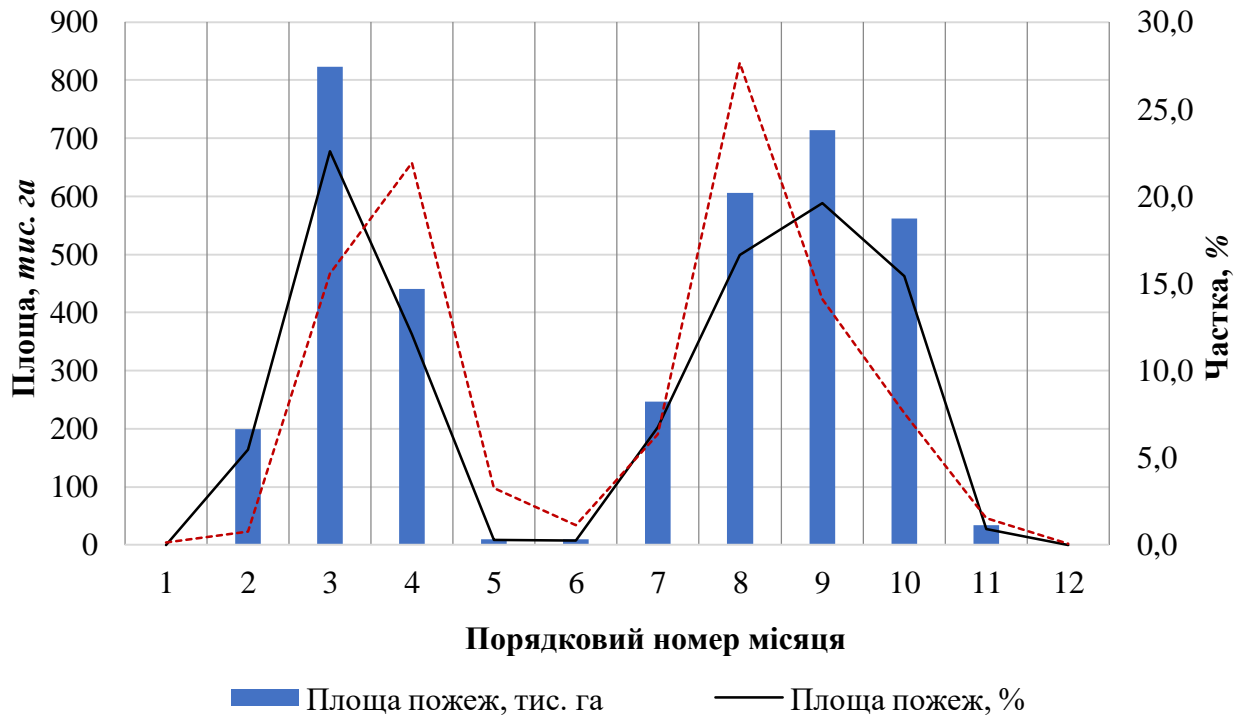


Рисунок 4.13 – Помісячний розподіл кількості та площі пожеж на території досліджень відповідно до даних супутникової зйомки

Представлена динаміка пожеж формує необхідну статистичну основу для контролю якості імітаційного моделювання ризиків, зумовлених природними пожежами. Крім того, вона має важливе пізнавальне значення та може прислужитися під час розробки систем прийняття рішень.

4.3 Валідація площі пожеж за даними супутникових знімків LANDSAT

Валідацію глобального алгоритму картографування згарищ виконано на прикладі Рівненської області із застосуванням супутникових знімків Landsat, які характеризуються істотно більшою детальністю. Алгоритм для GEE складався з таких етапів:

- завантаження для Рівненської області на обраний часовий проміжок даних про термальні аномалії;
- підбір часової серії супутникових спостережень до та після пожежі;

- компонування супутникових знімків у вигляді безхмарних композитних мозаїк;
- створення вручну грубого контуру згарища;
- розрахунок для створеної області інтересу індекса ΔNBR (Normalized Burn Ratio);
- класифікація індексного зображення на чотири класи пошкодження ландшафтів.

Для оцінювання наслідків пожеж за даними ДЗЗ прийнято використовувати термін «burn severity», який відображає ступінь пошкодження рослинного покриву та ґрунту. В основу розрахунку цього показника за матеріалами супутникової зйомки покладено аналіз взаємозв'язку ступеня пошкодження рослинності, який можна встановити в природі. Після пожежі відбувається зміна спектральних характеристик рослинного покриву, що зумовлює зменшення значень спектральної яскравості в ближньому інфрачервоному діапазоні (*NIR*) та збільшення – в короткохвильовому інфрачервоному (*SWIR*). У порівнянні з іншими каналами зміни в зазначених діапазонах спектру є найбільш відчутними, а їхня комбінація забезпечує найточнішу ідентифікацію територій, пройдених пожежами.

Із метою кількісного оцінювання ступеня пошкодження вогнем територій використовують часові ряди індексу NBR (Normalized Burn Ratio), на основі яких обчислюють індекс ΔNBR (delta NBR):

$$\Delta NBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire}, \quad (4.1)$$

де $NBR_{prefire}$ та $NBR_{postfire}$ – значення індексу NBR , розраховані за даними супутникових знімків відповідно до та після пожежі.

Індекс NBR базується на даних ближнього та короткохвильового інфрачервоного каналів знімків Landsat (для даних Landsat 8 OLI це канали 5 – *NIR* (0,85-0,88 мкм) та 7 – *SWIR 2* (2,11-2,29 мкм)):

$$NBR = 1000 \cdot (NIR - SWIR 2)/(NIR + SWIR 2). \quad (4.2)$$

Результатом розрахунків є неперервна карта зі значеннями індексу $dNBR$, які можна відповідним чином класифікувати за рівнем інтенсивності пожежі (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Оцінювання інтенсивності пожежі за значенням індексу $dNBR$

Інтенсивність пожежі (Burn Severity)	Значення індексу $dNBR$
Enhanced regrowth, high	-500÷-251
Enhanced regrowth, low	-250÷-101
Unburned	-100÷99
Low	100÷269
Moderate-Low	270÷439
Moderate-High	440÷659
High	660÷1300

Використовуючи описані принципи, було оцінено наслідки пожеж, які відбувалися на території Рівненської області протягом 2015 року. Супутникові знімки Landsat 8 OLI оброблялися на базі платформи GEE. Певні методичні особливості цієї роботи відображено на рис. 4.14.

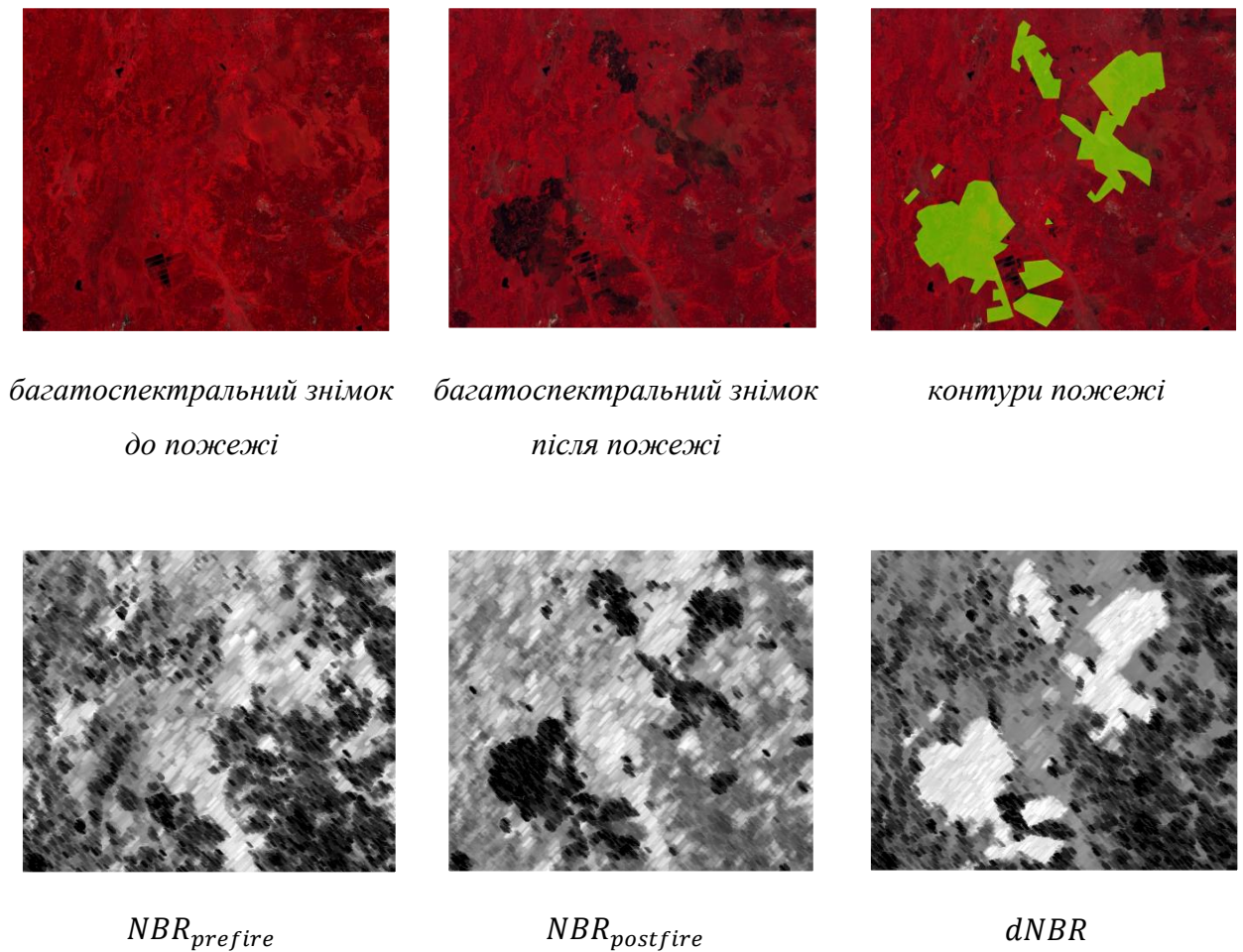


Рисунок 4.14 – Методика картографування згарищ за часовими серіями знімків Landsat 8 OLI

За цією методикою були визначені фактично всі контури згарищ, окрім тих, які через велику хмарність території встановити було дуже складно. Не вдалося розрахувати площі пожеж за грудень, січень, лютий та листопад, оскільки в цей період відсутній трав'яний покрив, що в свою чергу не дозволяє застосувати індекс *NBR*. Також через відсутність якісних знімків Landsat 8 OLI за травень, виявити площі в цьому місяці також не вдалося. У результаті розрахунків одержано контури всіх пожеж, що сталися на території Рівненської області протягом 2015 року (рис. 4.15).

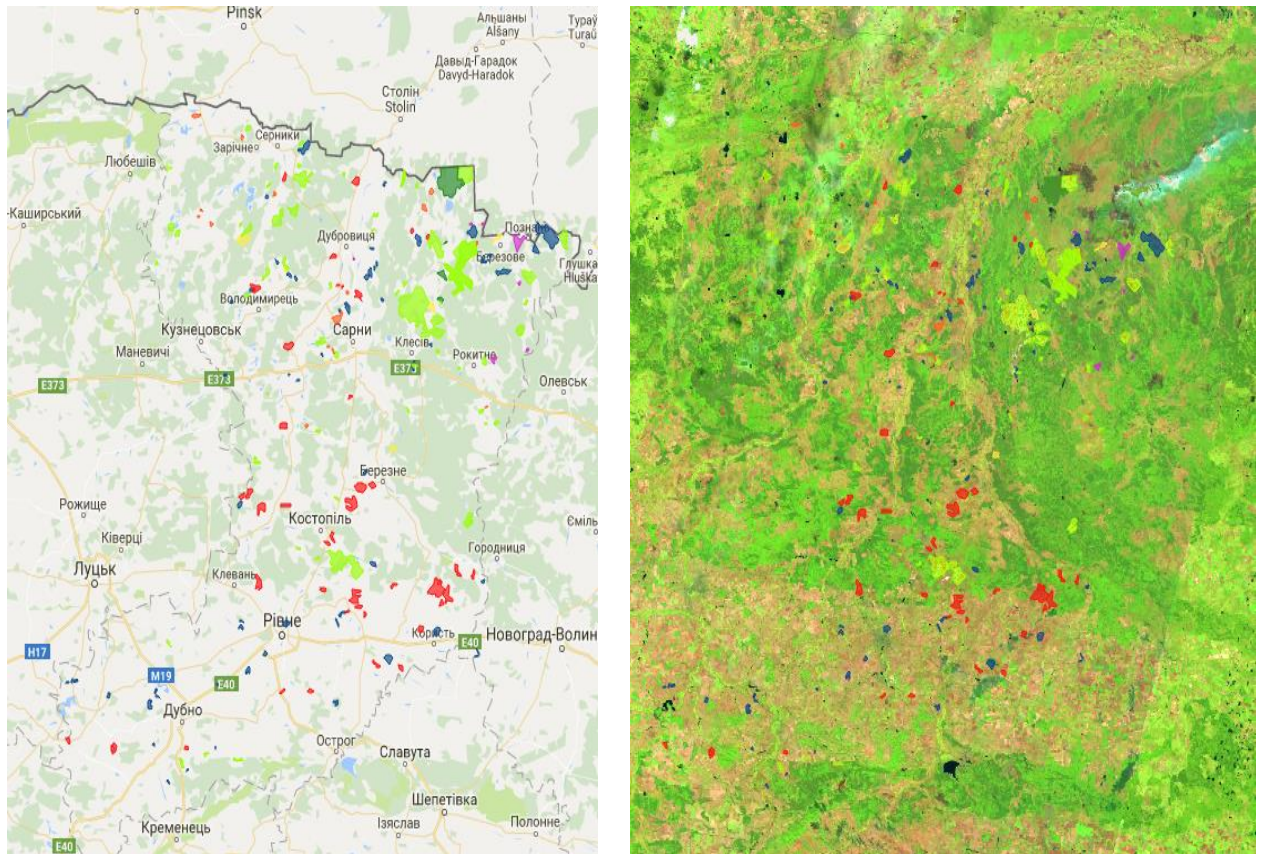


Рисунок 4.15 – Контури пожеж на території Рівненської області,
що сталися в 2015 році

Наступним етапом після визначення контурів згарищ стало обчислення їхньої площі. Відповідний алгоритм також вдалося реалізувати на базі платформи GEE. Для цього застосовувалася спеціальна функція `ee.Image.pixelArea`, яка забезпечує попиксельну оцінку площі згарищ незалежно від типу проєкції знімків. За своєю природою алгоритм був багатоітераційним та значною мірою базувався на експертній оцінці точності картографування. Основний критерій якості дешифрування згарищ полягав у візуальній оцінці відповідності контурів згарищ на супутниковому знімку та відповідній тематичній карті (рис. 4.16).

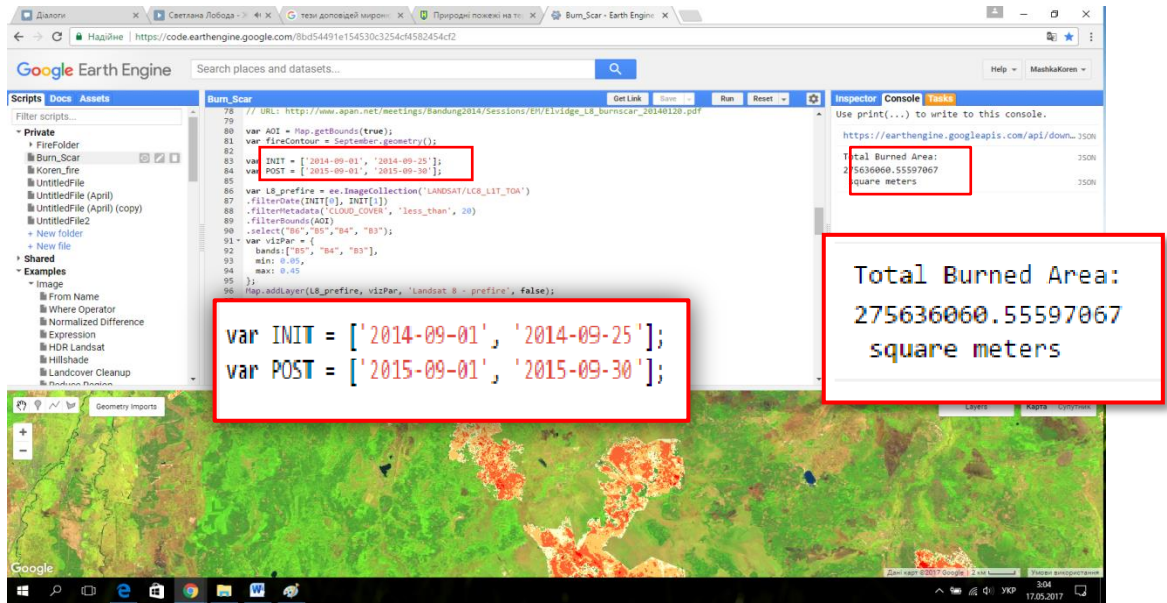


Рисунок 4.16 Інтерфейс платформи *Google Earth Engine*

(1 – вибір дати (*prefire, postfire*); 2 – площа пожеж)

Одночасно з загальною площею пожеж за шкалою інтенсивності (табл. 4.2) оцінювалася площа чотирьох рівнів інтенсивності пожеж. На рис. 4.17 відображено результати картографування наслідків пожеж, які відбулися у вересні 2015 року, за ступенем пошкодження.

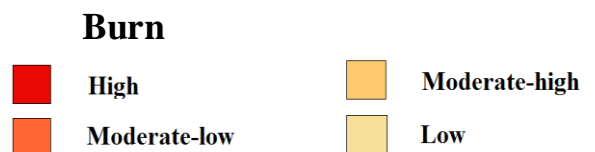
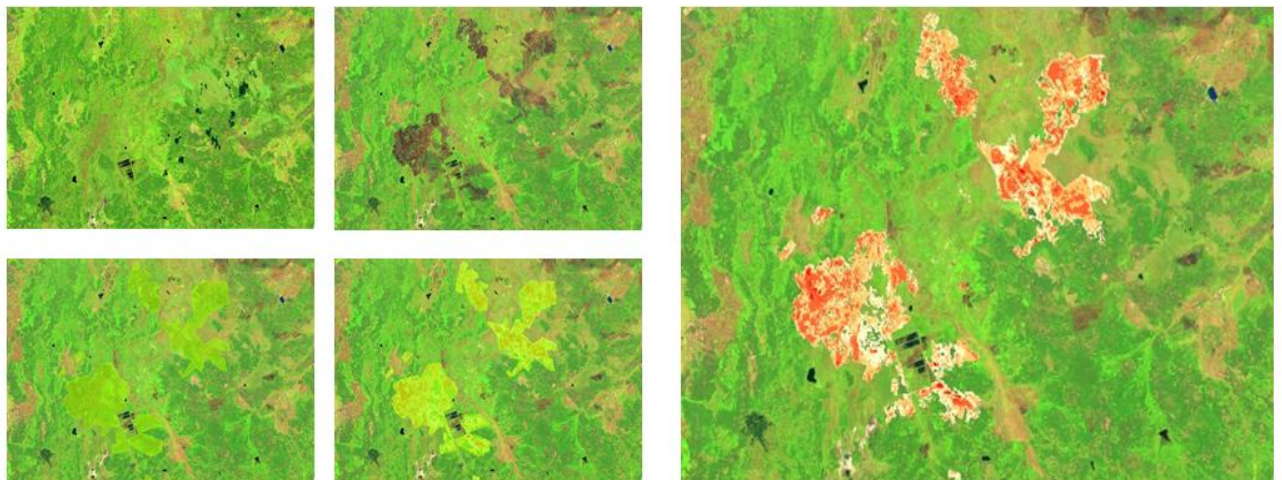


Рисунок 4.17 – Оцінювання наслідків пожеж за даними Landsat 8 OLI

У результаті виконаних досліджень було оцінено наслідки пожеж, які відбулися на території Рівненської області протягом 2015 року (табл. 4.3). Поряд із загальною площею згарищ було визначено ступінь пошкодження природних ландшафтів за чотирма рівнями інтенсивності пожеж.

Таблиця 4.2 – Площі пожеж на території Рівненської області за 2015 рік

Місяць	Кількість пожеж	Інтенсивність пожежі (Burn Severity)	Площа, га
Березень	75		12775
		Low	563
		Moderate-low	1568
		Moderate-high	6708
Квітень	47	High	3936
		Low	1903
		Moderate-low	191
		Moderate-high	561
Червень	10	High	932
		Low	219
		Moderate-low	812
		Moderate-high	202
Липень	11	High	400
		Low	199
		Moderate-low	11
		Moderate-high	837
Серпень	67	High	238
		Low	205
		Moderate-low	255
		Moderate-high	139
		High	6081
		Low	2144
		Moderate-low	2463
		Moderate-high	1439
		High	35

Продовження таблиці 4.2

Місяць	Кількість пожеж	Інтенсивність пожежі (Burn Severity)	Площа, га
Вересень	63		20747
		Low	-
		Moderate-low	11785
		Moderate-high	8340
		High	622
Жовтень	12		3803
		Low	2196
		Moderate-low	1199
		Moderate-high	406
		High	2
Разом			46958

Загальна площа згарищ виявилася достатньо узгодженою із відповідною оцінкою за 2015 рік, встановленою на основі глобального продукту MCD64A1 (додаток А). Розходження у площі пожеж за окремими місяцями пояснюється складністю формування часових серій супутникових знімків Landsat за помісячним принципом, які мають невисоке (8–16 днів) темпоральне розрізнення. Як наслідок, деякі пожежі були помилково приписані іншим місяцям. Беззаперечною перевагою картографування згарищ за знімками Landsat є можливість оцінки не тільки загальної площі пожежі, а ступеня її інтенсивності. Щоправда, достовірні результати такої оцінки можуть бути одержані після виконання комплексу локальних наземних спостережень.

За рис. 4.18 можна проаналізувати розподіл площ пожеж за ступенем інтенсивності та місяцями року. Так, найбільша частка припадає на групу пожеж середньої інтенсивності (moderate-high – 18279 га та moderate-low – 18181 га), основна частка всіх пожеж припадає на вересень та березень (44,2 % і 27,2 % відповідно).

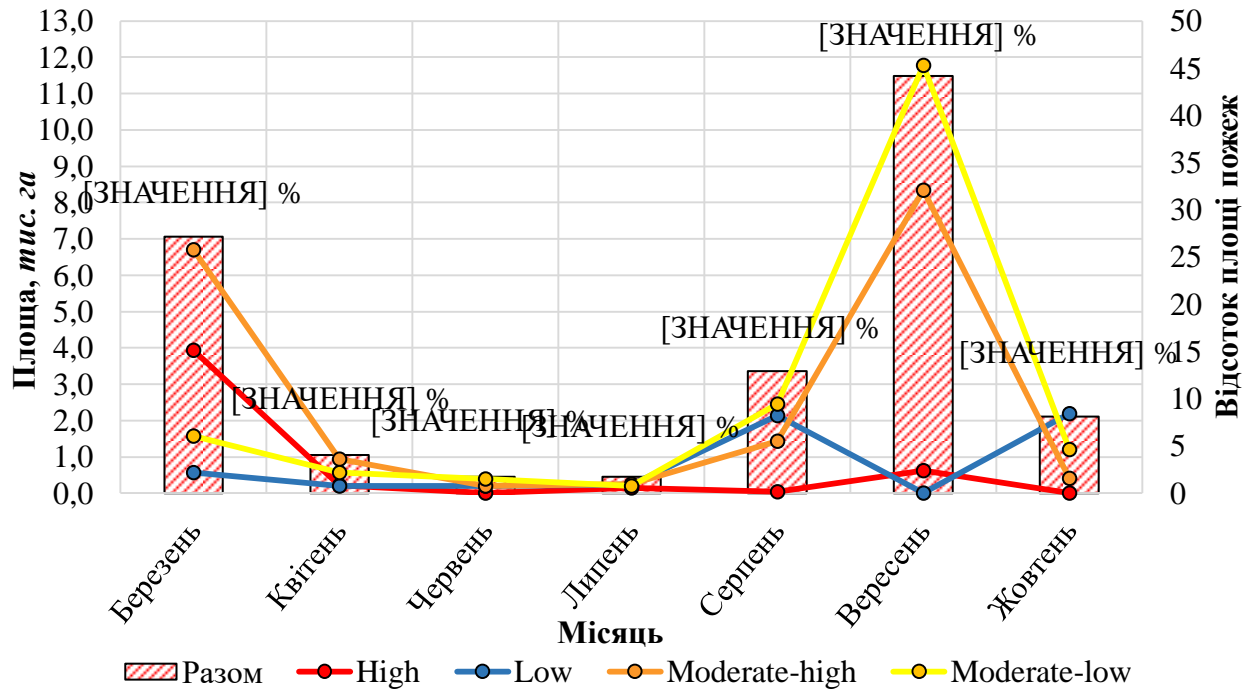


Рисунок 4.18 – Розподіл площ пожеж на території Рівненської області за інтенсивністю пожеж (*Burn Severity*)

Загальна площа пожеж, які вдалося зафіксувати сенсором Landsat 8 OLI в 2015 році становить близько 47 тис. га. Найбільші площі згарищ зафіксовані у вересні – понад 20 тис. га та у березні – майже 13 тис. га. Істотно менша частка площ пожеж припала на серпень – близько 6 тис. га. Найменші площі згарищ зафіксовано в червні та липні. Отже, весняний пік припав на березень, а літньо-осінній відбувся у серпні-вересні. Також, треба відзначити, що значна частка пожеж у березні не була зафіксована алгоритмом MCD64A1.

5 ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ РОЗРОБКИ ГЕОПОРТАЛУ

Протягом останнього десятиріччя зроблено значний крок у напрямі розвитку безкоштовних систем управління геобазами даних та геоінформаційних систем. Існує значна кількість WEB-технологій для публікації різноманітних даних у мережі Internet. Розроблено також методичні підходи та програмні застосунки для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж. Таким чином, існують всі передумови для розробки геопорталу, за допомогою якого можна підвищити ефективність реагування на пожежі та особливо їх попередження шляхом оптимальної організації території.

Основу геопорталів складають його функціональні можливості. За основу їх переліку може бути взято IV главу Директиви INSPIRE (Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE), 2007), де Web-служби для наборів просторових даних та зв'язаних з ними послуг об'єднані у п'ять груп:

- пошукові сервіси, які дозволяють знаходити набори просторових даних та геосервіси на основі відповідних метаданих;
- сервіси візуалізації, які забезпечують можливості перегляду даних, навігації по зображенням, їх скролінгу, масштабування і графічного накладення шарів, а також відображення легенд карт і відповідної інформації, що міститься у метаданих;
- сервіси для завантаження інформації, що дозволять копіювати набори просторових даних або їх фрагменти або навіть надавати доступ до самих даних;
- сервіси перетворення даних, які надають можливість трансформувати набори просторових даних з метою забезпечення їх взаємодії з іншими системами;

- сервіси, які забезпечують доступ до відкритих джерел даних, які розташовано на серверах сторонніх організацій.

Всі вказані сервіси повинні враховувати вимоги користувачів та забезпечувати простоту експлуатації, доступ через мережу Інтернет та інші телекомунікаційні засоби. Крім того цей мінімальний набір функцій, часто доповнюється системами авторизованого доступу та засобами здійснення проводки електронних платежів.

Розглянемо основні складові створення веб-порталу.

5.1 Веб-дизайн

Веб-дизайн (англ. web design) — галузь веб-розробки, що охоплює цілий ряд напрямів і дисциплін із створення та супроводу сайтів або веб-застосунків, таких як графічний веб-дизайн, проектування інтерфейсів, авторинг (у т. ч. стандартизований код і ліцензоване програмне забезпечення), інтенсивність використання та оптимізація для пошукових систем. Найчастіше виконання різних етапів процесу веб-дизайну забезпечують відповідні спеціалісти (менеджер проекту, дизайнер, веб-програміст, веб-майстер тощо), хоча деякі веб-дизайнери можуть виконувати усе самостійно. Термін веб-дизайн зазвичай використовують для опису проектування й реалізації клієнтської частини веб-сайту, включаючи верстку.

Верстка виконується з використанням мови розмітки (HTML, XHTML, XML, CSS). Часто використовуються спеціальні редактори, а також розвинені інструментарії, такі як Twitter Bootstrap. Twitter Bootstrap використовує найсучасніші напрацювання в галузі CSS і HTML, тому необхідно бути уважним при підтримці старих браузерів. Головні переваги Twitter Bootstrap:

- економія часу - Bootstrap дозволяє заощадити час і зусилля, використовуючи шаблони дизайну і класи, і сконцентруватися на інших розробках;

- висока швидкість - динамічні макети Bootstrap масштабуються на різні пристрої і розміри екрану без будь-яких змін в розмітці;
- гармонійний дизайн - всі компоненти платформи Bootstrap використовують єдиний стиль і шаблони за допомогою центральної бібліотеки. Дизайн і макети веб-сторінок узгоджуються один з одним.

Twitter Bootstrap обирається як найпопулярніший HTML, CSS, JavaScript - framework (набір бібліотек), також він прекрасно підходить і для створення мобільних версій ресурсу. По суті - це вільний набір інструментів для створення сайтів і веб-додатків. Включає в себе HTML і CSS шаблони оформлення для типографіки, веб-форм, кнопок, міток, блоків навігації і інших компонентів веб-інтерфейсів, включаючи JavaScript розширення.

5.2 Системи управління базами даних

Центральним джерелом власних даних геопорталу є просторова база даних. Вона являє собою базу даних, оптимізовану для збереження та виконання запитів щодо даних про просторові об'єкти. На відміну від традиційних баз даних, які можуть зберігати та обробляти числову і символічну інформацію, просторові бази даних дозволяють зберігати цілісний просторовий об'єкт, у якому окрім традиційних числових і символічних даних зберігаються також і геометричні дані. Просторові бази даних дозволяють виконувати запити, які містять у собі просторові оператори для аналізу просторово-логічних відношень об'єктів (пересічення, торкання, належність і т. і.). Серед систем управління базами даних (СУБД), які підтримують просторові бази даних слід відзначити:

- Boeing's Spatial Query Server (розширення Sybase ASE);
- Oracle Spatial;
- MS SQL Server з версії 2008;
- DB2 Spatial Extender;
- Informix Spatial Blade;

- PostgreSQL – некомерційний продукт що використовує просторове розширення PostGIS для реалізації просторових типів даних і просторових запитів;
- MySQL – некомерційний продукт, який дуже популярний за простоту у використанні.

не є комерційним продуктом. Він був випущений у 2001 р. як вільний програмний продукт з відкритим вихідним кодом. У таблиці нижче наведено порівняння деяких просторових СУБД. Як видно з таблиці 5.1 PostgreSQL мало у чому поступається найбільш популярним комерційним СУБД та є фактично лідером серед некомерційних СУБД.

5.3 Мови веб-програмування

Дуже важливим кроком у розробці веб-сайту є вибір мови програмування. Мови веб-програмування умовно поділяються на клієнтські та серверні.

Клієнтські мови виконуються на комп'ютері користувача (клієнта). Точніше висловлюючись вони виконуються інтернет-браузером. Оператори клієнтської мови вбудовуються в HTML-код веб-сторінки. Це створює головну проблему клієнтських мов – результат виконання програми залежить від браузера користувача. З іншої сторони, якщо програміст має намір знизити навантаження на сервер, то він може це зробити за рахунок програм, які виконуються на стороні клієнта. Найбільш розповсюдженими клієнтськими мовами є JavaScript та VisualBasicScript (VBS). У таблиці 5.2 наводяться порівняння деяких характеристик цих мов.

Таблиця 5.1 – Порівняння чотирьох найбільш популярних систем управління базами даних

Показник	Microsoft SQL Server	MySQL	Oracle	PostgreSQL
Характеристика	Реляційна СУБД Microsoft	Реляційна СУБД широкого застосування з відкритим кодом	Реляційна СУБД широкого застосування	Реляційна СУБД широкого застосування з відкритим кодом
Первинна модель БД	Реляційна СУБД	Реляційна СУБД	Реляційна СУБД	Реляційна СУБД
Secondary database models	<u>Документо-орієнтована</u> <u>Графова СУБД</u> <u>База даних ключ-значення</u>	<u>Документо-орієнтована</u> <u>База даних ключ-значення</u>	<u>Документо-орієнтована</u> <u>Графова СУБД</u> <u>База даних ключ-значення</u> <u>RDF store</u>	<u>Документо-орієнтована</u> <u>База даних ключ-значення</u>
<u>DB-Engines Ranking Trend Chart</u>	Score 1051.55 Rank #3 Overall #3 <u>Relational DBMS</u>	Score 1159.89 Rank #2 Overall #2 <u>Relational DBMS</u>	Score 1301.11 Rank #1 Overall #1 <u>Relational DBMS</u>	Score 440.24 Rank #4 Overall #4 <u>Relational DBMS</u>
Website	www.microsoft.com/en-us/sql-server	www.mysql.com	www.oracle.com/database	www.postgresql.org
Технічна документація	docs.microsoft.com/en-ie/sql/sql-server/sql-server-technical-documentation	dev.mysql.com/doc	docs.oracle.com/en/database	www.postgresql.org/docs/manuals

Продовження таблиці 5.1

Показник	Microsoft SQL Server	MySQL	Oracle	PostgreSQL
Розробник	Microsoft	Oracle	Oracle	PostgreSQL Global Development Group
Перший випуск	1989	1995	1980	1989
Поточний випуск	SQL Server 2017, October 2017	8.0.12, July 2018	18 (18.1), February 2018	11.1, November 2018
Ліцензія	комерційна	відкритий код	комерційна	відкритий код
Тільки хмарна	ні	ні	ні	ні
Мова розробки	C++	C та C++	C та C++	C
Серверна операційна система	Linux Windows	FreeBSD Linux OS X Solaris Windows	AIX HP-UX Linux OS X Solaris Windows z/OS	FreeBSD HP-UX Linux NetBSD OpenBSD OS X Solaris Unix Windows
Схема даних	так	так	так	так
Типизація	так	так	так	так
Підтримка XML	так	так	так	так
Вторинні індекси	так	так	так	так

Продовження таблиці 5.1

Показник	Microsoft SQL Server	MySQL	Oracle	PostgreSQL
SQL	так	так	так	так
API та інші методи доступу	OLE DB Tabular Data Stream (TDS) ADO.NET JDBC ODBC	Proprietary native API ADO.NET JDBC ODBC	ODP.NET Oracle Call Interface (OCI) JDBC ODBC	native C library streaming API for large objects ADO.NET JDBC ODBC
Мови програмування, що підтримуються	C# C++ Delphi Go Java JavaScript (Hide.js) PHP Python R Ruby Visual Basic	Ada C C# C++ D Delphi Eiffel Erlang Haskell Java JavaScript (Hide.js) Objective-C OCaml Perl PHP Python Ruby	C C# C++ Clojure Cobol Delphi Eiffel Erlang Fortran Groovy Haskell Java JavaScript Lisp Objective C OCaml Perl	.Net C C++ Delphi Java JavaScript (Hide.js) Perl PHP Python Tcl

Продовження таблиці 5.1

Показник	Microsoft SQL Server	MySQL	Oracle	PostgreSQL
Мови програмування, що підтримуються		Scheme Tcl	Perl PHP Python R Ruby Scala Tcl Visual Basic	
Процедури на стороні серверу	Transact SQL, .NET languages, R, Python and (with SQL Server 2019) Java	yes	PL/SQL	PL/pgSQL Perl, Python
Тригери	так	так	так	так
Методи партиціонування	таблиці можуть бути розподілені на декілька файлів (горизонтальне партиціонування); розділення шляхом віртуалізації	горизонтальне партиціонування, розділення MySQL Cluster або MySQL Fabric	горизонтальне партиціонування	партиціонування за рангом, списком та (з версії PostgreSQL 11) за хешем
Методи реплікації	так в залежності від редакції SQL-Server	реплікація Master – Master реплікація Master-slave	реплікація Master – Master реплікація, Master-slave	реплікація Master-slave

Продовження таблиці 5.1

Показник	Microsoft SQL Server	MySQL	Oracle	PostgreSQL
MapReduce	ні	ні	ні	ні
Концепції цілісності	негайна цілісність	негайна цілісність	негайна цілісність	негайна цілісність
Зовнішні ключі	так	так	так	так
Transaction concepts	ACID	ACID	ACID	ACID
Конкурентний доступ	так	так	так	так
Довговічність	так	так	так	так
Оперування у пам'яті	так	так	так	ні
Концепції доступу користувача	деталізовані права доступу згідно з SQL-стандартом	концепція деталізованих прав дшоступу користувачів	деталізовані права доступу згідно з SQL-стандартом	деталізовані права доступу згідно з SQL-стандартом

Таблиця 5.2 – Порівняння клієнтських мов програмування

Характеристика	JavaScript	VisualBasicScript
Об'єктна модель	Генерація об'єктів класу динамічна	Повна підтримка об'єктної моделі. Класи об'єктів створюються окремо
Можливість налагодження коду програми	Обмежена	Повна підтримка налагодження у інтегрованому середовищі
Підтримка браузерів	Internet Explorer, Google Chrome, Opera, Mozilla та інші	Тільки Internet Explorer
Підтримка кросплатформності	Виконується на всіх розповсюджених операційних системах	Тільки Windows

Незважаючи на те, що в VBS реалізовано повну підтримку об'єктної моделі, перевагу отримує JavaScript завдяки його можливості його виконання в різних браузерах на різних операційних системах.

Самою важливою функцією серверних мов веб-програмування це генерація HTML для відображення у веб-сторінці. Крім того, вони забезпечують взаємодію користувача і бази даних. До серверних мов відносяться PHP, Perl, Python, Ruby, будь-яка .Net мова (технологія ASP.NET), Java, Groovy [18]. Нижче наведено таблицю переваг на недоліків PHP, Ruby і Python (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Порівняння серверних мов веб-програмування

Серверна мова	Переваги	Недоліки
PHP	<ul style="list-style-type: none"> - вільне програмне забезпечення, що розповсюджується під особливою ліцензією (PHP license); - легкий для засвоєння на всіх етапах; - підтримується великою спільнотою користувачів і розробників; - має розвинену підтримку баз даних; - має значну кількість бібліотек і розширень мови; - може використовуватись в ізольованому середовищі; - пропонує власні засоби організації веб-сесій; - розширений програмний інтерфейс; - досить повна заміна пропрієтарного середовища ASP (Active Server Pages) від Microsoft; - може бути розгорнутий майже на якому завгодно сервері; - підтримується на більшості платформ і операційних систем 	<ul style="list-style-type: none"> - не підходить для створення настільних застосунків або системних компонентів; - має досить слабкі засоби для роботи з виключеннями; - глобальні параметри конфігурації впливають на базовий синтаксис мови; - об'єкти передаються за значенням, а не за посиланням як у більшості інших мов; - веб-застосунки дуже часто мають проблеми з безпекою.

Серверна мова	Переваги	Недоліки
Ruby	<ul style="list-style-type: none"> - відкрита розробка; - працює на багатьох платформах - може бути вбудований у HTML-розмітку; - відноситься до мов програмування надвисокого рівня (VHLL), тобто володіє високим рівнем абстракції і предметним підходом в реалізації алгоритмів; - реалізує концептуально чисту об'єктно-орієнтовану парадигму; - надає покращені методи оперування рядками і текстом; - легко поєднується з високопродуктивними серверами баз даних (DB2, MySQL, Oracle и Sybase); - завдяки VHLL програми на Ruby добре масштабуються і легко супроводжуються; - простий і чистий синтаксис значно полегшує програмістам перші кроки в оволодінні цієї мови; 	<ul style="list-style-type: none"> - навчання цій мові вище початкового рівня може мати труднощі; - недостатня кількість інформаційних ресурсів, що присвячено Ruby; - Ruby менш продуктивний у порівнянні до багатьох інших мов, що застосовується у веб-розробці; - відносно повільна розробка і розвиток;

Продовження таблиці 5.3

Серверна мова	Переваги	Недоліки
Ruby	<ul style="list-style-type: none"> - простий і чистий синтаксис значно полегшує програмістам перші кроки в оволодінні цієї мови; - простий програмний інтерфейс для створення багатопоточних застосунків; - має поліпшені засоби для роботи з масивами; - можливості мови можливо розширити за допомогою бібліотек, написаних на C; - зарезервовані слова можуть бути ідентифікаторами, якщо це не створює неоднозначності для парсеру; - додаткові можливості для забезпечення безпеки; - вбудований відгадчик 	
Python	<ul style="list-style-type: none"> - відкрита розробка; - відносно простий у вивченні, особливо на початковому етапі; - особливості синтаксису стимулює написання код, гарно читається; 	<ul style="list-style-type: none"> - не дуже вдала підтримка багатопочності; - створено не дуже багато якісних проектів у порівнянні з Java; - відсутність комерційних засобів розробки;

Серверна мова	Переваги	Недоліки
Python	<ul style="list-style-type: none"> - надає засоби для швидкого прототипування і динамічної семантики; - численна спільнота, що позитивно настроєна відносно до новачків; - множина корисних бібліотек та розширень мови, що можливо використовувати у проектах завдяки край уніфікованому механізму імпорту і програмним інтерфейсам; - механізми модульності добре продумані і можуть бути легко використані; - абсолютно все в Python є об'єктами у сенсі об'єктно-орієнтованої парадигми, але при цьому об'єктний підхід не нав'язується програмісту. 	<ul style="list-style-type: none"> - початкова обмеженість засобів для роботи з базами даних.

Після аналізу переваг та недоліків вказаних мов програмування для створення геопорталу обрано Python за наступними показниками:

1. Python на відміну від PHP є більш універсальною мовою і дозволяє створювати крім веб-застосунків, настільні застосунки для персональних комп'ютерів, а також для мобільних пристроїв.
2. Python забезпечує взаємодію з такими популярними ГІС як ArcGIS, MapNIK, QGIS та інші.
3. Велика кількість літератури та форумів.
4. Краща читабельність коду.
5. Значна продуктивність виконання коду як для мов, що інтерпретуються.

5.4 Веб-сервер

Веб-сервер – сервер, який приймає HTTP-запити від клієнтів, звичайно веб-браузерів і який віддає у HTTP-відповіді, як правило разом з HTML-сторінкою, зображенням, файлом медіа-потокком та іншими даними.

Існує багато веб-серверів. Сьогодні найпоширенішими є:

- NCSA HTTPd – один із перших веб-серверів, розроблений Робертом Маккулом (англ. *Robert McCool*) та іншими у компанії NCSA.
- Apache HTTP-Server — найпоширеніший у світі веб-сервер з ВІДКРИТИМ КОДОМ
- IIS – веб-сервер компанії Microsoft, розповсюджується з ОС сімейства Windows NT
- lighttpd — open-source веб-сервер.
- Google Web Server — веб-сервер, створений на основі Apache компанією Google.
- Resin — open-source сервер для застосувань java.
- Cherokee — вільний багатоплатформовий веб-сервер, написаний на C.
- Rootage — багатоплатформовий веб-сервер, написаний на java.

- THHTTPD — простий, маленький, швидкий, переносний і добре захищений веб-сервер, розроблений для Unix-систем.
- GlassFish — Java EE сервер застосунків з відкритим кодом, розроблений компанією Sun Microsystems

Рейтинг використання веб-серверів наведено у таблиці і діаграмі нижче.

Таблиця 5.4 – Рейтинг використання веб-серверів

Apache	55,30%
Nginx	26,90%
Microsoft-IIS	12,40%
LiteSpeed	2,30%
Google Servers	1,40%
Інші	1,70%

На рис. 5.1 – 5.3. наведено порівняння продуктивності трьох веб-серверів Apache, Nginx, Lighttpd (Сравнение web-серверов под нагрузкой (Apache, Nginx, Lighttpd), 2011).

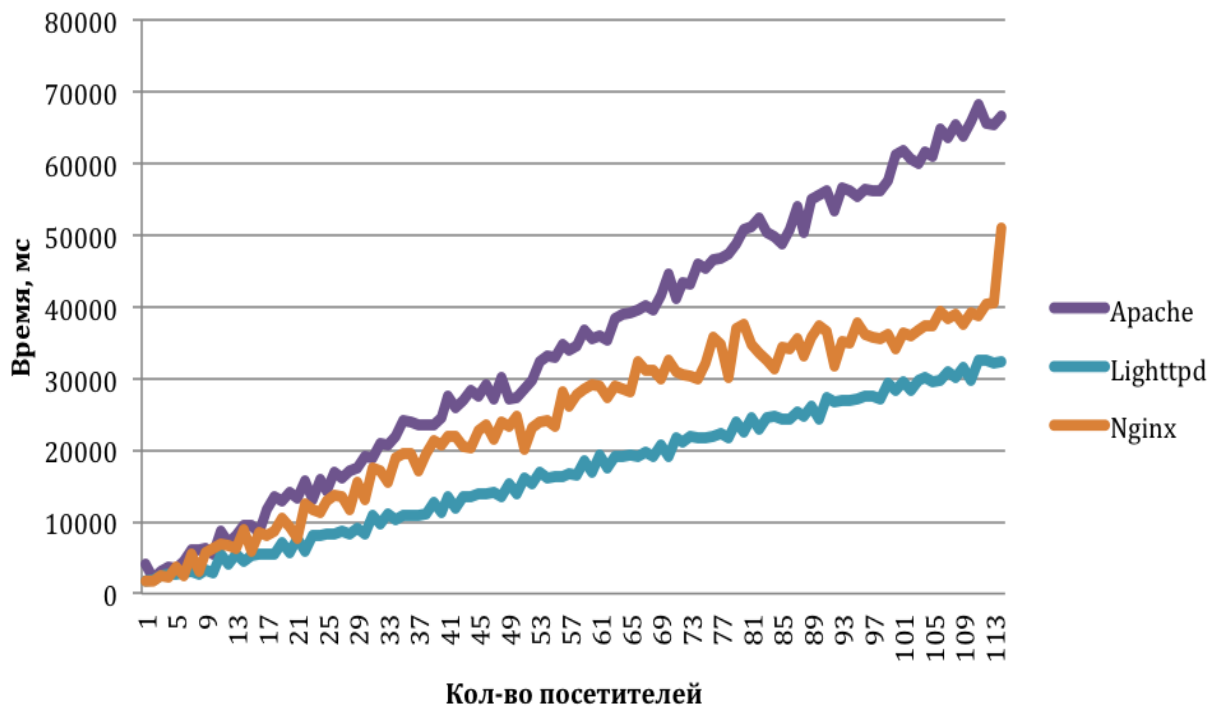


Рисунок 5.1 – Час роботи з обробки запитів

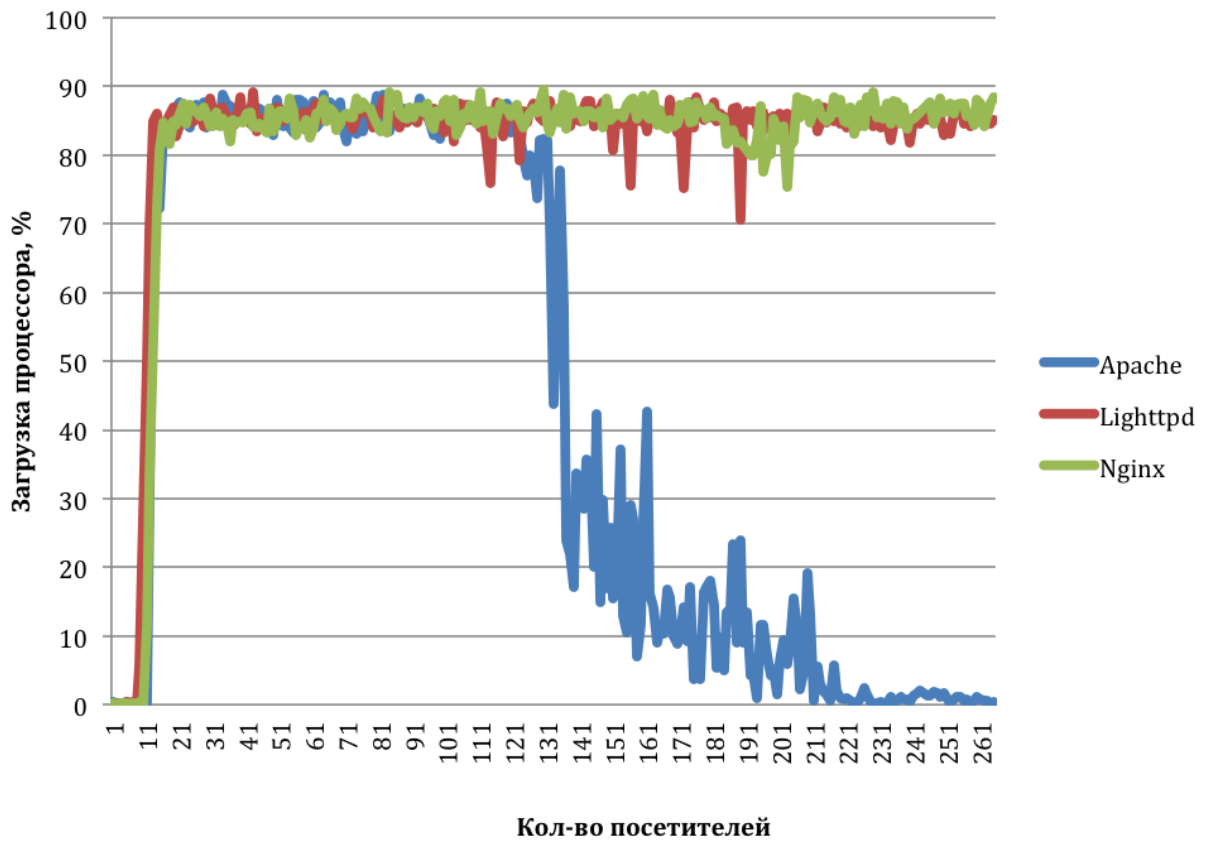


Рисунок 5.2 – Завантаження процесору

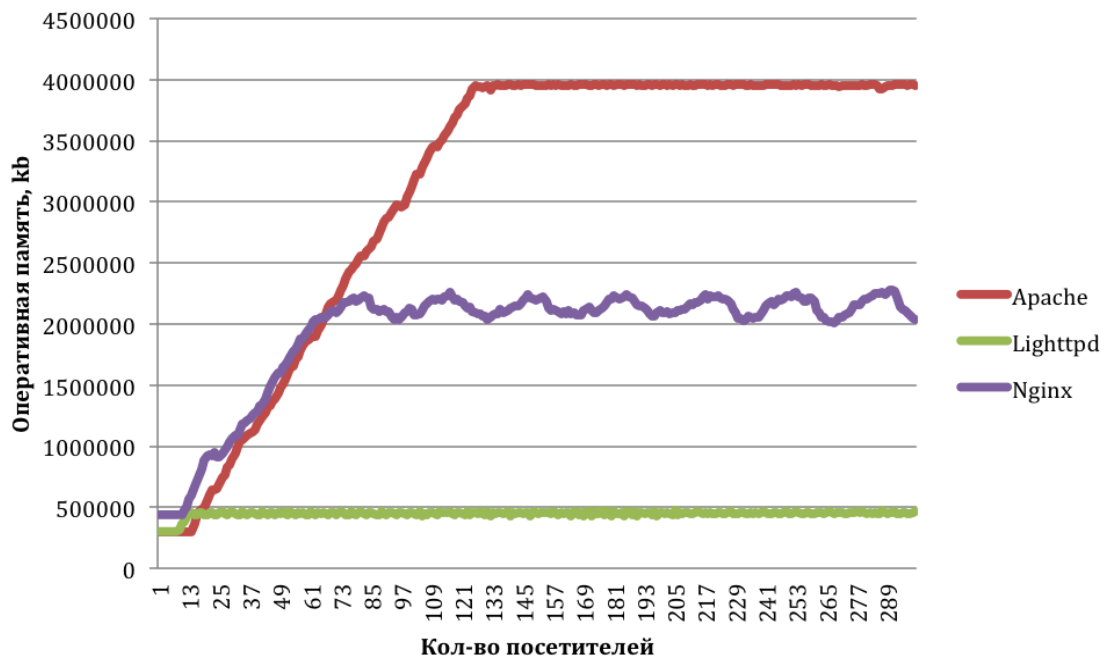


Рисунок 5.3 – Витрати оперативної пам'яті

З графіків видно, що Lighttpd та Nginx демонструє більшу продуктивність у порівнянні з найбільш популярним Apache. Крім того,

Apache перестав зовсім функціонувати якщо кількість користувачів перевищує 111 при об'ємі оперативної пам'яті 4 Гб. Перевага віддається Nginx, тому що значно більш розповсюджений ніж Lighttpd, хоч і показує трохи меншу продуктивність.

5.5. Засоби відображення карти на веб-сторінці

Існує декілька бібліотек, розроблених з використанням JavaScript, які можна використовувати для відображення карт, що надаються WMS, WFS серверами (наприклад GeoServer, Qgis, MapServer, ArcIMS). Таким чином можна завантажити геопросторові дані, які зберігаються у базі даних PostgreSQL або на файловому сервері у форматі Mbtiles. Проведемо порівняння двох найбільш популярних бібліотек OpenLayers та Leaflets.

Таблиця 5.5 – Порівняння бібліотек картографування

Показник/Бібліотека	OpenLayers	Leaflets
WMS	так	так
WMTS	так	Ні
Вектор		
- полілінії	так	так
- полігони	так	так
- коло	так	так
- колові маркери	так	так
маркери	так	так
спливаюче меню	так	так
<u>Анімація</u>		

Показник/Бібліотека	OpenLayers	Leaflets
Анімація панорамування - кінетична анімація - Tile loading fade animation	так (IE7+) ні	так (немає підтримки IE) так (немає підтримки IE)
Zoom Animation (resize)	так (IE7+)	так (немає підтримки IE)
<u>Картографічні елементи управління</u>		
Перемикач шарів	так	так
Кнопки зміну масштабу	так	так
Навігаційна панель	так	ні
Лінійка	так	ні
Клавіатура	так	ні
Креслення	так	ні
Панель редагування	так	ні

Слід відмітити, що код, створений за допомогою Leaflets, завантажується швидше завдяки розподілу функцій між декількома модулями (плагінами). Але OpenLayers вибирається як більш перспективна бібліотека завдяки швидших темпів розвитку і значно більшій спільноті користувачів.

6 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СКЛАД СТОРІНОК ГЕОПОРТАЛУ

6.1 Призначення геоportалу

Геоportал бути вирішувати такі задачі.

- завантаження, введення, перегляд та аналіз багаторічних даних, пов'язаних з оцінюванням ризику, прогнозуванням та попередженням природних пожеж, а саме
 - даних дистанційного зондування Землі або їх похідних;
 - даних моделей горючих матеріалів;
 - метеорологічних даних за минулі роки;
 - даних по минулим пожежам.
- доступ до відкритих або корпоративних веб-джерел або баз даних, а саме:
 - поточних метеорологічних даних та даних метеопрогнозу Гідрометцентру України;
 - даних лісовпорядкування з відомчого геоportалу «Ліси України»;
 - даних пожежного впорядкування;
 - відкритих даних ДЗЗ: Landsat, MODIS, Sentinel тощо;
 - даних таких сервісів, як Google, Bing, Open Street Map тощо;
- завантаження та візуалізація цифрових моделей рельєфу та її похідних: карти ухилів та експозиції схилів;
- генерація похідних прогнозних карт за минулими, поточними та прогнозними метеоданими (температура, вологість, напрямок та швидкість вітру, комплексний показник пожежної небезпеки);
- генерація, вибірка або завантаження та відображення вихідних даних для оцінки ризику пожеж на задану територію (лісогосподарське підприємство, лісництво, група кварталів або прямокутник заданий координатами його кутів):

- вибір моделей горючих матеріалів відповідно до атласу (Scott & Burgan, 2005);
 - грід ймовірності загорання;
 - гріди висот над рівнем моря, ухилів та експозицій схилу;
 - грід зімкнутості деревостанів;
 - грід моделей горючих матеріалів;
 - грід висоти деревостанів;
 - грід висоти початку крони;
 - грід щільності горючих матеріалів крони;
 - грід погодних умов.
- генерація комплексного показника та карт для оцінки ризику пожеж, а саме
- карта ймовірності вигорання;
 - карта згенерованих пожеж.

6.2. Склад веб-сторінок геопорталу

У таблиці 6.1 наводиться засіб виклику та коротка характеристика сторінок геопорталу.

Таблиця 6.1 – Опис сторінок геопорталу

№ п.п.	Пункт	Підпункт	Призначення
1.	Лісовпорядкування	Таксаційний опис	Можливість перегляду таксаційного опису за вибраним підприємством, лісництвом, кварталом і виділом.
		Тематичні карти	Можливість перегляду лісовпорядної карти за вибраним підприємством, лісництвом, кварталом і виділом в умовних позначеннях лісовпорядного планшету або плану лісонасаджень.

Продовження таблиці 6.1

№ п.п.	Пункт	Підпункт	Призначення
2	Метеорологічні дані	Дані за минулі роки	Залучення минулих метеоданих у табличному вигляді на заданий час. Виклик функції побудови ґридів температури, відносної вологості, напрямку та швидкості вітру. Перегляд минулих метеоданих у табличному вигляді та на карті на заданий час.
		Прогнозні дані	Завантаження тривимірного прогнозного ґриду у форматі NETCDF4. Виклик функції побудови двовимірних ґридів температури, відносної вологості, напрямку та швидкості вітру. Перегляд майбутніх метеоданих на карті на заданий час.
3	Залучення даних ґрид	Космічні знімки Landsat	Інтерфейс для завантаження з вказанням дати зйомки
		Знімки сенсору Modis	Інтерфейс для завантаження з вказанням дати зйомки
		Цифрова модель рельєфу	Інтерфейс для завантаження з подальшою побудовою ґридів ухилів та експозиції схилів
4	Статистика пожеж	Дані про випадки пожеж	Інтерфейс для введення даних про випадки пожеж та їх перегляд
		Побудова ґриду ймовірності загорання	Інтерфейс для перебудови ґриду ймовірності загорання
5	Оцінка ризику пожеж	Дані моделей горючих матеріалів	Перегляд та вибір моделей горючих матеріалів

Продовження таблиці 6.1

№ п.п.	Пункт	Підпункт	Призначення
		Розрахунок ризику пожеж	<p>Вибір території розрахунку. Побудова або екстракція ґридів у межах зазначеної території, а саме: ґрид ймовірності загорання; ґриди висот над рівнем моря, ухилів та експозицій схилу; ґрид зімкнутості деревостанів; ґрид моделей горючих матеріалів; ґрид висоти деревостанів; ґрид висоти початку крони; ґрид щільності горючих матеріалів крони; ґрид погодних умов.</p> <p>Виклик процедури розрахунку ризику пожеж з подальшою візуалізацією карти ймовірності вигорання та карти пожеж.</p>

ВИСНОВКИ

1) Серед існуючих у світі класифікацій ЛГМ, розроблена у США класифікація, яка базується на часі втрати горючими матеріалами 63% вологості (1год., 10 год.,100 год.,1000 год.) та наборі моделей горючих матеріалів є найбільш розповсюдженою для цілей моделювання запасів, структури та вологості на рівні регіону та у глобальному масштабі. Перевагою використання даної класифікації є наявність цілого ряду безкоштовних програмних продуктів. Отже для розробки геопорталу доцільно використовувати класифікацію США.

2) Аналіз існуючих у світі систем прогнозування пожежної небезпеки та відповідних веб-платформ свідчить, що їх ефективність залежить від наявності достатньої кількості просторових шарів з вихідною пірологічною інформацією, точних регіональних моделей ЛГМ та пожежної погоди, обсягу та густоти ґрідів з якого регулярно використовуються польові дані. Отже успішне функціонування пірологічного геопорталу в Україні можливо тільки за умови підключення його в систему державного екологічного та синоптичного моніторингу.

3) Найбільш розповсюдженою у світі моделлю для прогнозування ризиків виникнення та розвитку пожежі є модель Ротермеля, яка покладена в основу комп'ютерної системи прогнозу пожеж BehavePlus. Для прогнозу інтенсивності горіння на фронті пожежі доцільно використовувати модель Байрама. Базовими показниками моделювання повинні бути ймовірність займання, ймовірність вигорання та ключові параметри горіння (швидкість поширення, довжина полум'я, теплотворна здатність та інші), які є основою прогнозування виду пожежі та тактики її гасіння.

4) Аналіз пожежної погоди Українського Полісся свідчить про її відносну подібність, відсутність екстремальних погодних умов. Встановлено незначний широтний градієнт розподілу середньодобової температури

повітря, а також швидкості вітру. Максимальна швидкість вітру у регіоні становить $15-16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

5) Регіон досліджень характеризується рівнинним рельєфом, який не буде суттєво впливати на швидкість та поведінку пожежі. На рівні мезорельєфу пришвидшення розвитку пожежі можливо у ділянках соснових лісів, що розташовані на піщаних дюнах та на переходах від заплави до першої та другої борової тераси. Висота над рівнем моря в регіоні досліджень коливається від 90-170 м у Придніпровській низовині до 300 м в районі Овруцько-Словечаського кряжу.

6) Для регіону досліджень та подальшого застосування у геопорталу визначено 11 типів горючих матеріалів, які узгоджено з найбільш розповсюдженими типами земного покриву, які можуть бути класифіковані шляхом обробки часових серій супутникових знімків Landsat із достатньою для задач точністю.

7) Розроблений алгоритм класифікації території регіону за типами земного покриву та горючих матеріалів базується на знімках Landsat, алгоритму навчання Random Forest, результатах польових вибіркового досліджень, доступних наборах геопросторової інформації, зокрема даних інвентаризації лісів, алгоритму радіометричної корекції знімків LEDAPS, геометричної корекції та валідації результатів.

8) Джерелами опорних даних для класифікації супутникових знімків та оцінки тематичної точності кінцевого продукту будуть слугувати сервіси Google Earth, Google Earth Engine, OpenForis за параметрами *land cover* та *land use* з використанням продукту Global Forest Change.

9) Аналіз горимості регіону досліджень виконаний за даними сенсору MODIS та алгоритму MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies за 2001-2016 рр. та із застосування розробленими у рамках даного проекту Java-скриптами, що забезпечували включення у вибірку пожеж з імовірністю вище 30% та системи GEE. На основі даних про розподіл пожеж створений

один з ключових просторових шарів геопорталу – карта ймовірності загорань (burn probability grid).

10) Встановлено, що площа пожеж у Поліссі України коливається в межах 100-500 тис. га щорічно. Роками пожежних максимумів були 2002 рік (310 тис. га), 2008-2009 рр. (425- 393 тис. га), 2014-2015 рр. (390-495 тис. га) відповідно. Протягом періоду 2001-2016 рр. найбільш небезпечними є березень (823 тис. га), квітень (440 тис. га), серпень (606 тис. га), вересень (714 тис. га) та жовтень (562 тис. га). Найбільші площі пожеж у 2015 році встановлені у Сарненському та Рокитнівському районах Рівненської області.

11) Обґрунтований дизайн геопорталу, який включає наступні компоненти: редактор Twitter Bootstrap для HTML, CSS, JavaScript – framework, систему управління базами даних PostgreSQL з розширенням PostGIS, клієнтську мову програмування JavaScript з можливістю його застосування в різних браузерях і операційних систем, мову програмування Python, що дозволяє створювати веб-застосунки, настільні застосунки для персональних комп'ютерів, а також для мобільних пристроїв і забезпечувати взаємодію з ArcGIS, MapNIK, QGIS та іншими, веб-сервером Nginx, бібліотек картографування OpenLayers. Сформульовано призначення геопорталу, перелік задач, які будуть вирішуватись, склад сторінок геопорталу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management / [R. E. Keane, S. A. Drury, E. C. Karau at all.]. // *Ecological Modelling*. – 2010. – P. 2–18.
2. A project for monitoring trends in burn severity / [J. Eidenshink, B. Schwind, K. Brewer at all.]. // *Fire Ecology*. – 2007. – P. 3–21.
3. Ager A. A comparison of landscape fuel treatment strategies to mitigate wildland fire risk in the urban interface and preserve old forest structure / A. Ager, N. Vaillant, M. Finney. // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – P. 166–167.
4. Anderson H. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior / Hal E. Anderson. – Ogden, UT 84401: Forest Service, 1982. – 22 p.
5. Anderson H. E. Tenth Symposium (International) on Combustion / H. E. Anderson, R. C. Rothermal. // The Combustion Institute, Pittsburgh. – 1965. – P. 1009–1019.
6. Breiman L. Random forests / Leo Breiman. // Statistics Department University of California Berkeley. – 2001. – P. 1–33.
7. Cohen J. D. The National Fire-Danger Rating System: basic equations. / J. D. Cohen, J. E. Deeming. – London, Toronto: Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1985. – 16 p.
8. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). // European Parliament and of the Council of the European Union. – 2007.
9. Finney M. A computational method for optimising fuel treatment locations / M. Finney. // *International Journal of Wildland Fire*. – 2007. – №16. – P. 702–711.
10. Finney M. A. Fire growth using minimum travel time methods / M. A. Finney. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2002. – C. 1420–1424.

11. Fried J. S. Analysing initial attack on wildland fires using stochastic simulation / J. S. Fried, J. K. Gilles, J. Spero. // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – №15. – P. 137–146.
12. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change / [P. Olofsson, G. Foody, M. Herold at all.]. // Remote Sensing of Environment. – 2014. – №148. – P. 42–57.
13. He H. Learning from Imbalanced Data / H. He, E. A. Garcia. // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2009. – №21. – P. 1263–1284.
14. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada / [B. S. Lee, M. E. Alexander, B. C. Hawkes at all.]. // Computers and Electronics in Agriculture. – 2002. – P. 185–198.
15. Loboda T. V. Assessing the risk of ignition in the Russian far east within a modeling framework of fire threat / T. V. Loboda, I. A. Csiszar. // Ecological Applications. – 2007. – №17. – C. 791–805.
16. Matthews1 S. A comparison of fire danger rating systems for use in forests / Stuart Matthews1. // Australian Meteorological and Oceanographic Journal. – 2009. – №58. – P. 41–48.
17. McArthur A. G. Fire behavior in eucalypt forests / A. G. McArthur. – Australia: Canberra: Forestry and Timber Bureau, 1967. – 36 p.
18. PHP, Ruby, Python – краткая характеристика трёх языков программирования. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.internet-technologies.ru/articles/php-ruby-python-harakteristika-yazykov-programmirovaniya.html>.
19. Rollins M. G. LANDFIRE: a nationally consistent vegetation, wildland fire, and fuel assessment / M. G. Rollins. // International Journal of Wildland Fire. – 2009. – №18. – P. 235–249.
20. Rothermel R. C. A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels / R. C. Rothermel, C. Richard. – Ogden: Department of Agriculture, Forest Service: USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972.

– 40 p.

21. Scott J. H. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model / J. H. Scott, R. E. Burga. – Department of Agriculture, Forest Service, Rocky M: Rocky Mountain Research Station: Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO, 2005. – 72 p.

22. Taylor S. W. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience / S. W. Taylor, M. E. Alexander. // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – №15. – P. 121–135.

23. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product / [L. Giglio, L. Boschetti, D. Roy at all.]. // Remote Sensing of Environment. – 2018. – P. 72–85.

24. The National Fire-Danger Rating System. J.E. Deeming [et al.] N.-Y.; London; Toronto; USDA., Forest Service, 1972. 165 p.

25. Trabaund L. Fuel mapping helps forest fire- fighting in Southern France // Fire Management Notes. 1978. N 1. P. 14–17.

26. Trabaund L. Fuel mapping helps forest fire- fighting in Southern France / L. Trabaund. // Fire Management Notes. – 1978. – P. 14–17.

27. Transcriptomic Profiling Suggests That Promysalin Alters the Metabolic Flux, Motility, and Iron Regulation in *Pseudomonas putida* KT2440 / [K. Giglio, C. Keohane, P. Stodghill at all.]. // Marine Policy. – 2018. – №96. – P. 13–17.

28. Weber R. O. Modelling fire spread through fuel beds / R. O. Weber. // Progress in Energy and Combustion Science. – 1991. – P. 67–82.

29. Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Софронов М.А. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979. 198 с.

30. Волокитина А.В. Классификация растительных горючих материалов / А.В. Волокитина, М.А. Софронов // Лесоведение. – 1996. – № 3. – С. 38–44.

31. Волокитина А. В. Классификация и картографирование растительных горючих материалов: монография / А. В. Волокитина, М. А. Софронов. – Новосибирск: СО РАН, 2002. – 306 с

32. Волокитина А. В. Среднемасштабное картографирование растительных горючих материалов в Нижнем Приангарье / А. В. Волокитина // География и природ. ресурсы. – 1995. – № 2. – С. 146–152.

33. Вонский С. М. Влияние осадков на изменение влажности и горимости лесного напочвенного покрова и подстилки / С. М. Вонский // Лесные пожары и технические средства борьбы с ними: сб. ст.: труды ЛенНИИЛХа. – Л., 1974. – Вып. 19. – С. 66 – 72.

34. Ворон В. П. Параметри горіння підстилки соснових лісів Українського Полісся / В. П. Ворон, В.Г. Борисенко, О.М. Ткач, В.К. Мунтян, І.О. Барабаш // Лісівництво і агролісомеліорація. – 2016. – Вип. 129. – С. 130–138.

35. Ворон В. П. Тенденції у післяпожежному розвитку сосняків Рівненщини / В. П. Ворон, О. М. Ткач, С. Г. Сидоренко // Лісівництво і агролісомеліорація. – 2014. – Вип. 125. – С. 181–187.

36. Горшенин, Н. М. Лесная пирология / Н. М. Горшенин, Н. А. Диченков, А. И. Швиденко. – Львов: Вища школа; Изд-во при Львовском ун-те, 1981. – 160 с.

37. Гуменюк В. В. Вплив низової пожежі на деревостан та наземні лісові горючі матеріали в соснових лісах Центрального Полісся України [Електронний ресурс] / В. В. Гуменюк, С. В. Зібцев, А. А. Борсук // Національний університет біоресурсів і природокористування України. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: http://ejournal.studnubip.com/zhurnal-6/ukr/humenyuk_zibtsev_borsuk/.

38. Жданович, С. А. Высшие сосудистые растения, произрастающие на крупных древесных остатках / С. А. Жданович, И. Н. Вершицкая // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: материалы Всероссийской науч. конф., Санкт-Петербург, 20–24 сент. 2011 г.: в 2 т. / Учреждение Российской академии наук «Ботанический институт им. В. Л. Комарова» и Русское Ботаническое Общество; редкол.: В. Т. Ярмишко [и др.]. – Санкт-Петербург, 2011. – Т. 2. – С. 344–347.

39. Жданович, С. А. Заращение мертвой древесины различной степени разложения под пологом леса / С. А. Жданович // Леса Евразии – Русский Север: материалы VII Междунар. науч. конф. молодых ученых, посвящ. 140-летию со дня рожд. проф. Г. Ф. Морозова, Петрозаводск, 9–17 июля 2007 г. / Петр. гос. ун-т; редкол.: А. М. Боронин [и др.]. – М., 2007. – С. 139–141.

40. Жданович, С.А. Критическая оценка валежа сосны и ели как лесного горючего материала в хвойных лесах Беларуси / С.А. Жданович, А.В. Пугачевский // Экологический вестник. – 2017. - № 2(40). - С. 58-61.

41. Комплексы напочвенных горючих материалов и возможность их регулирования в профилактике лес-ных пожаров /В.В. Фуряев, Л.П. Злобина, В.И. Заболотский [и др.] // Лесн. хоз-во. – 2007. – № 1. – С. 43–44.

42. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 239 с.

43. Кузик А. Д. Пожежонебезпечні властивості лісових горючих матеріалів / А. Д. Кузик // Науковий вісник НЛТУ України. - 2014. - Вип. 24.4. - С. 214-218. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2014_24.

44. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов / Н. П. Курбатский // Вопросы лесной пирологии. – ИЛИД СО АН СССР. – Красноярск, 1970. – С. 5–58.

45. Лісові горючі матеріали [Текст]: навчальний посібник / В. В. Левченко, О. А. Борсук, А. А. Борсук; За ред. С. В. Зібцева ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. – К.: НУБіП України, 2015. – 237 с.

46. Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары: монография / И. С. Мелехов. – Архангельск: ОГИЗ, 1947. – 60 с.

47. Мелехов И. С. Лесная пирология: учебное пособие для студентов лесохозяйственных факультетов / И. С. Мелехов. – М.: МЛТИ, 1983. – 59 с.

48. Мелехов, И. С. Лесная пирология: учебное пособие / И. С. Мелехов, С. И. Душа-Гудым, Е. П. Сергеева. – Москва: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 296 с.

49. Михалев, Ю.А. Пирологическая классификация лесов Сибири // Вестник КрасГАУ. – 2014. – №9. – С. 125–132.
50. Молчанов А. А. Влияние лесных пожаров на древостой / А. А. Молчанов // Тр. ин-та леса. – М.: АН СССР, 1954. – Т. 16. – С. 314–335.
51. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы её определения: монография / В. Г. Нестеров. – М.: Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
52. Пугачевский, А. В. Запасы, размерная структура и степень разложения древесных остатков в некоторых типах сосновых, еловых и березовых лесов / А. В. Пугачевский, С. А. Жданович // Труды БГТУ. Сер. I. Лесн. хоз-во. Минск, 2007. – Вып. 15. – С. 366–370.
53. Рипачек, В. Биология дереворазрушающих грибов / В. Рипачек. – Москва: Лесная промыш-ленность, 1967. – 274 с.
54. Рыхтэр, І. Э. Лясная піралогія з асновамі радыээкалогіі: вучэбны дапаможнік / І. Э. Рыхтэр. – Мінск: БДТУ, 1996. – 290 с.
55. Софронов М. А. Методика обследования и описания лесных участков, пройденных пожарами / М. А. Софронов, А. В. Волокитина. – Новосибирск, 2007. – 71 с. – (Институт леса им. В. Н. Сукачова СО РАН).
56. Софронов М. А. Пирологическое районирование в таежной зоне / М. А. Софронов, А. В. Волокитина – Новосибирск: Наука, Сиб. Отд-ние, 1990. – 204 с.
57. Фуряев В. Комплексы напочвенных горючих материалов и возможность их / В. Фуряев, Л. Злобина, В. Заболотский. // Лесн. хоз-во.. – 2007. – С. 43–44.
58. Шешуков М. А. Биоэкологические и зонально-географические основы охраны лесов от пожаров на Дальнем Востоке: автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра с.-х. наук: 06.03.03 03 «лесоведение, лесоводство, лесные пожары и борьба с ними» / Шешуков М. А. – Красноярск: 1988. – 46 с.

59. Шешуков М. А. Некоторые принципы составления планов противопожарного устройства / М. А. Шешуков, В. В. Нешатаев, И. Б. Найкруг // Лесное хозяйство. – 1973. – № 6. – С. 48–53.

60. Шешуков М.А. Пирогенез – важнейший фактор формирования лесов // Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1984. С. 99–100.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця 1 – Часовий розподіл площі пожеж на території досліджень за адміністративними областями відповідно до даних MCD64A1, га

Область / Рік	Порядковий номер місяця												Разом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Волинська	0	24248	43612	1900	187	93	4173	4175	13090	11024	254	0	102757
2001	0	0	78	126	0	0	0	0	366	0	0	0	570
2002	0	0	538	0	0	0	93	444	1750	31	0	0	2857
2003	0	0	4230	0	0	0	96	572	1491	530	0	0	6920
2004	0	0	711	0	0	0	0	143	2248	348	0	0	3450
2005	0	0	758	0	0	0	111	238	2978	1095	93	0	5273
2006	0	0	16	0	125	0	0	0	190	604	0	0	934
2007	0	0	998	32	0	0	0	0	0	0	0	0	1029
2008	0	0	0	0	0	0	1598	427	254	746	0	0	3025
2009	0	0	5197	1633	0	0	364	79	698	0	0	0	7970
2010	0	0	1283	0	0	0	540	63	79	1439	145	0	3550
2011	0	0	601	48	0	0	0	0	0	95	0	0	743
2012	0	23983	13372	0	0	0	0	0	776	254	0	0	38384
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	265	14863	62	0	0	76	5	1115	1731	0	0	18117
2015	0	0	0	0	63	93	807	1217	711	4058	15	0	6965
2016	0	0	968	0	0	0	489	987	434	93	0	0	2971

Продовження таблиці 1

Область / Рік	Порядковий номер місяця												Разом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Рівненська	0	2279	67931	5909	127	1476	5767	39061	51470	29358	422	0	203799
2001	0	0	498	0	0	0	0	32	0	0	0	0	529
2002	0	0	1847	0	127	47	1969	14153	20588	281	0	0	39011
2003	0	0	7437	0	0	0	0	63	48	62	0	0	7610
2004	0	0	625	634	0	0	0	175	1224	788	0	0	3446
2005	0	0	176	0	0	0	0	111	1224	1138	0	0	2649
2006	0	0	4182	16	0	0	669	0	175	557	0	0	5598
2007	0	0	774	0	0	0	26	334	318	0	0	0	1451
2008	0	0	0	0	0	0	493	2497	287	2080	191	0	5547
2009	0	0	2687	4372	0	0	175	3384	2846	63	0	0	13526
2010	0	0	350	0	0	270	73	207	1699	355	214	0	3168
2011	0	0	1379	317	0	222	111	143	3204	532	0	0	5907
2012	0	281	37443	0	0	0	0	652	1032	135	0	0	39542
2013	0	0	0	239	0	0	273	429	0	0	0	0	941
2014	0	141	7503	206	0	0	176	830	438	8025	16	0	17334
2015	0	1856	788	126	0	875	1404	13972	12150	13383	1	0	44556
2016	0	0	2244	0	0	62	399	2081	6238	1961	0	0	12984
Житомирська	0	87064	243761	40498	1042	1649	23858	63118	68812	54501	1596	0	585898
2001	0	0	506	175	0	0	2712	5352	259	477	0	0	9481

Продовження таблиці 1

Область / Рік	Порядковий номер місяця												Разом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2002	0	0	20469	79	0	687	5277	2147	7534	0	0	0	36193
2003	0	0	9979	1635	31	501	0	0	620	16	0	0	12783
2004	0	0	61	1548	0	194	223	1479	1678	162	0	0	5345
2005	0	0	32	4036	0	0	453	236	4316	7056	0	0	16129
2006	0	0	10273	645	0	0	63	367	2666	1357	0	0	15371
2007	0	288	24284	141	0	32	1274	1394	1155	48	0	0	28616
2008	0	11211	0	0	287	0	3036	15430	13335	257	16	0	43573
2009	0	0	10311	16096	16	0	3431	14186	13023	4823	0	0	61885
2010	0	0	15624	81	0	47	755	1855	1372	1402	0	0	21136
2011	0	0	2214	3763	16	0	129	1941	2661	3456	611	0	14791
2012	0	80	65112	357	32	0	1570	388	933	129	0	0	68600
2013	0	0	1386	2859	291	0	258	2826	0	0	0	0	7620
2014	0	3273	19578	475	0	0	1729	2410	3703	29544	449	0	61160
2015	0	72212	54885	8610	368	188	1854	6856	8608	4305	520	0	158406
2016	0	0	9047	0	0	0	1092	6250	6951	1468	0	0	24809
Київська	0	31387	266748	132742	573	1629	108673	213320	223625	132357	12101	0	1123155
2001	0	0	4846	14509	0	0	14195	26722	17349	6675	0	0	84296
2002	0	0	62904	236	0	64	8361	17697	5702	80	0	0	95044
2003	0	0	4442	17315	221	0	745	598	7995	1126	0	0	32442

Продовження таблиці 1

Область / Рік	Порядковий номер місяця												Разом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2004	0	0	435	7926	0	0	2908	14527	28764	2991	144	0	57695
2005	0	0	7565	34251	0	0	10359	5424	22228	14149	0	0	93976
2006	0	0	2606	18321	129	258	5249	4247	12586	4155	0	0	47551
2007	0	1123	61692	370	0	723	7204	4290	8695	1439	0	0	85535
2008	0	2917	127	96	0	0	30564	73594	61851	5191	300	0	174642
2009	0	0	8164	13351	49	28	12950	34774	19823	13356	0	0	102496
2010	0	0	5851	1608	0	0	1887	2649	13535	8575	1146	0	35250
2011	0	0	15272	3437	0	80	353	2784	1679	6977	5721	0	36303
2012	0	0	39112	420	0	48	2788	1645	2905	2844	0	0	49762
2013	0	0	1680	8062	80	48	1012	5934	32	3561	0	0	20411
2014	0	4434	8180	174	0	0	3708	4013	11669	43747	3162	0	79088
2015	0	22913	36663	12566	94	299	4616	5248	6047	13261	1628	0	103336
2016	0	0	7208	100	0	80	1773	9174	2764	4231	0	0	25329
Чернігівська	0	36762	126552	136407	7078	3186	56243	154990	272949	250913	16169	0	1061249
2001	0	0	9956	6506	0	0	2108	7580	5068	6267	0	0	37486
2002	0	185	31840	739	0	0	8372	4686	7717	0	0	0	53539
2003	0	0	730	4095	317	126	206	2060	7664	95	0	0	15294
2004	0	0	202	14650	0	0	2798	17125	39847	7851	0	0	82473
2005	0	0	7122	16514	95	0	5541	6384	18958	22201	31	0	76847

Продовження таблиці 1

Область / Рік	Порядковий номер місяця												Разом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2006	0	0	4722	9578	214	173	1088	1997	8994	4433	0	0	31199
2007	0	125	23630	480	1440	1590	1708	10554	19893	5057	0	0	64476
2008	0	657	251	157	32	0	6537	51116	67408	4180	2346	0	132684
2009	0	0	5619	55240	1523	655	7629	16827	26910	21486	0	0	135890
2010	0	0	548	651	95	219	3182	4266	7449	7300	35	0	23745
2011	0	0	4690	1027	0	15	324	4079	4279	11305	713	0	26433
2012	0	0	3602	914	1536	0	3735	2141	10164	8109	0	0	30200
2013	0	0	523	15901	1746	0	849	7072	4061	4347	0	0	34499
2014	0	13418	8540	1836	48	126	5348	10262	22383	98517	5323	0	165801
2015	0	22377	22419	8119	32	281	2394	4117	20954	47330	7721	0	135743
2016	0	0	2156	0	0	0	4425	4726	1201	2433	0	0	14942
Разом	0	199280	822694	440452	9838	9678	246493	605554	713887	561987	33580	0	3643444