

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ШВИДКОСТІ
РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ НА БАЗІ МОДЕЛІ
РОТЕРМЕЛА

AUTOMATED FORECASTING OF FOREST FIRE SPREAD SPEED BASED
ON THE ROTHERMEL MODEL

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВМ - 21
Борейко Ярослав Вікторович

(підпис)

Керівник:
к. т. н., доцент
Гуменюк Павло Олександрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гуменюк П. О.

(підпис)

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Борейка Ярослава Вікторівича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Автоматизоване прогнозування швидкості розповсюдження лісової пожежі на базі моделі Ротермела*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Гуменюк Павло Олександрович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 27 » 06 2025 року N 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: « 1 » 12 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: статистичні дані

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

Статистика, причини та наслідки лісових пожеж. Поділ лісових пожеж: огляд та

класифікація. Вплив рельєфу, палива та погоди на повідінку пожежі. Моделювання

поширення лісових пожеж. Порівняльний аналіз моделей прогнозування поширення

лісових пожеж. Алгоритм та програмна реалізація моделі Ротермела. Прогнозування

швидкості розповсюдження лісової пожежі на базі моделі Ротермела.

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 11 слайдів

АНОТАЦІЯ

Борейко Я. В. Автоматизоване прогнозування швидкості розповсюдження лісової пожежі на базі моделі Ротермела. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, семи розділів, загальних висновків та рекомендацій, переліку використаних джерел та додатків.

У кваліфікаційній роботі досліджується проблематика лісових пожеж, яка стає все більш актуальною в сучасному світі через їх велику кількість та серйозні наслідки для навколишнього середовища та суспільства. Виконано моделювання поширення лісових пожеж з використанням моделі Ротермела та методу Монте-Карло. Виконано аналіз отриманих результатів та їх візуалізації, що дозволяє краще розуміти закономірності та особливості розповсюдження вогню.

Розроблена модель розповсюдження вогню лісових пожеж є важливим інструментом для прогнозування та управління цими небезпечними природними явищами. Вона дозволяє не лише прогнозувати поведінку лісових пожеж, але й розробляти ефективні плани превентивних заходів для їх запобігання та контролю.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 11 слайдів. Обсяг пояснювальної записки становить 95 друкованих сторінок.

Ключові слова: лісові пожежі, моделювання, модель Ротермела, метод Монте-Карло, прогнозування.

ANNOTATION

Boreiko Ya. Automated forecasting of forest fire spread speed based on the Rothermel model. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Automation and computer-integrated technologies" specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University, Lutsk 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, seven chapters, general conclusions and recommendations, a list of references and appendices.

The qualification work investigates the problem of forest fires, which is becoming increasingly relevant in the modern world due to their large number and serious consequences for the environment and society. The modeling of forest fires spreading using the Rothermel model and the Monte Carlo method was performed. The results obtained and their visualization are analyzed, which allows us to better understand the patterns and features of fire spread.

The developed model of wildfire fire spread is an important tool for predicting and managing these dangerous natural phenomena. It allows not only to predict the behavior of forest fires, but also to develop effective preventive measures to prevent and control them.

The volume of the graphic part of the master's thesis is 11 slides. The volume of the explanatory note is 95 printed pages.

Keywords: forest fires, modeling, Rothermel model, Monte Carlo method, forecasting.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 СТАТИСТИКА, ПРИЧИНИ ТА НАСЛІДКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	11
Висновок до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 ПОДІЛ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ: ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ	18
2.1 Види лісових пожеж	19
2.2 Вплив типу лісу на лісову пожежу	22
2.3 Класифікація лісових пожеж за швидкістю розповсюдження	24
2.4 Класифікація лісових пожеж за масштабом поширення	26
Висновок до розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ РЕЛЬЄФУ, ПАЛИВА ТА ПОГОДИ НА ПОВІДІНКУ ПОЖЕЖІ	28
3.1 Вплив рельєфу на розповсюдження лісової пожежі	29
3.2 Вплив палива на розповсюдження лісової пожежі	32
3.3 Вплив погоди на розповсюдження лісової пожежі	37
Висновок до розділу 3	38
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	40
Висновок до розділу 4	44
РОЗДІЛ 5 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ	45
5.1 Модель FLAMMAP	45
5.2 Модель FARSITE	46
5.3 Модель BehavePlus	48
5.4 Модель WFDS	49
5.5 Модель Phoenix Rapidfire	50
5.6 Модель Rothermel	51
5.7 Порівняння моделі Rothermel з іншими моделями	52
Висновок до розділу 5	52

РОЗДІЛ 6 АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ РОТЕРМЕЛА	54
6.1 Визначення залежності швидкості поширення пожежі від навантаження паливом, швидкості вітру та нахилу місцевості	54
6.2 Базова модель Ротермела розповсюдження вогню	62
6.3 Вхідні дані моделі та їх можливі значення	65
6.4 Моделювання еліптичної форми контуру лісової пожежі	77
Висновок до розділу 6	77
РОЗДІЛ 7 ПРОГНОЗУВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ НА БАЗІ МОДЕЛІ РОТЕРМЕЛА	79
Висновок до розділу 7	87
ВИСНОВКИ	89
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТКИ	96

ВСТУП

Лісова екосистема є однією з найважливіших наземних екосистем у світі та важливою частиною глобальної екосистеми. Ліси відіграють важливу роль у підтримці стану води та ґрунту та регулюванні клімату. Лісові пожежі – це природні або антропогенні катастрофи в лісових екосистемах із сильними спалахами та високою випадковістю, з якими надзвичайно важко боротися.

Багато типів лісів еволюціонували, щоб виживати навіть при пожежах високої інтенсивності. Незважаючи на це, наслідки великих пожеж високої інтенсивності є небажаними через вплив на безпеку людей, інфраструктуру, майно, середовище проживання диких тварин, лісове господарство, тощо. Особливо гостро ця проблема постає в контексті зміни клімату, коли високі температури та сухість сприяють поширенню пожеж.

Поведінка лісової пожежі – це загальний описовий термін для позначення того, що робить пожежа, від спалаху до гасіння. Вона включає в себе широкий спектр процесів, які відбуваються від появи вогню до його повного загасання. Враховуючи різноманітність ландшафтів, типів рослинності та кліматичних умов, поведінка пожежі може значно відрізнитися в кожному конкретному випадку.

Пожежа може поширюватися швидко чи повільно, залежно від таких факторів, як швидкість вітру, вологість ґрунту та рослинності, наявність горючих матеріалів. Вогонь може бути місцевим та невеликим, або ж супроводжуватися великими полум'ям та значним тепловим випромінюванням. Пожежі можуть бути локальними, обмеженими невеликими площами, або ж вони можуть охоплювати великі території та тривати довгі періоди часу.

Прогнозування швидкості розповсюдження лісових пожеж є ключовим для ефективного управління ними та мінімізації їхніх наслідків. Модель Ротермела є одним з найпоширеніших інструментів для цього завдання. Вона базується на фізичних та емпіричних принципах та дозволяє передбачати швидкість

розповсюдження пожежі на основі властивостей лісової рослинності, метеорологічних умов та інших факторів.

Метою роботи є програмна реалізація стохастичної моделі Ротермела для прогнозування поширення лісових пожеж.

Актуальність теми зумовлена тим, що автоматизоване прогнозування швидкості розповсюдження лісових пожеж на базі моделі Ротермела має великий потенціал для підвищення ефективності процесу прогнозування та реагування на пожежі. Це дозволить оперативно реагувати на загрози та приймати належні заходи для їхнього контролю та локалізації, що в свою чергу сприятиме зменшенню втрат та покращенню безпеки для людей та природи.

Об'єктом дослідження є лісові екосистеми та їхні особливості, що впливають на поведінку пожеж.

Предметом дослідження є модель Ротермела, яка використовується для прогнозування швидкості розповсюдження лісових пожеж.

Наукова новизна полягає у застосуванні моделі Ротермела для автоматизованого прогнозування швидкості розповсюдження лісових пожеж.

Практична новизна полягає в сприянні покращенню систем моніторингу та попередження пожеж, прогнозування поведінки лісових пожеж, а також для планування превентивних заходів для їх запобігання та контролю.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі:

- 1) розглянути статистику, причини та класифікацію лісових пожеж;
- 2) вивчити основні фактори і їх вплив на лісову пожежу;
- 3) здійснити порівняльний аналіз моделей прогнозування поширення лісових пожеж;
- 4) розробити алгоритм та здійснити програмну реалізацію моделі Ротермела;
- 5) розробити алгоритм та здійснити програмну реалізацію стохастичної моделі Ротермела для прогнозування поширення лісових пожеж.

Апробація результатів дослідження. Основні результати досліджень відображені у науковій статті Борейко Я. В., Гуменюк П. О. Моделювання поширення лісових пожеж з використанням моделі Ротермела. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 18-25.

РОЗДІЛ 1

СТАТИСТИКА, ПРИЧИНИ ТА НАСЛІДКИ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

На відміну від інших природних небезпек, таких як землетруси чи шторми, лісові пожежі, безперечно, є одними з найбільш передбачуваних. Таким чином, це явище, яке, в принципі, має залишати сучасним суспільствам певний ступінь свободи та поле для маневру для впровадження ефективних стратегій протидії. Однак ця можливість не була використана належним чином. Протягом останніх десятиліть лісові пожежі стали предметом дедалі більшого занепокоєння для Європейського регіону. Ліси, пасовища в сільській місцевості або на межі з міськими територіями все ще продовжують горіти, що завдає значних екологічних, соціальних та економічних наслідків, зокрема у разі збільшення частоти пожеж. Хоча європейська статистика показує, що в середньому політика та заходи, пов'язані із запобіганням і придушенням пожеж, були ефективними, екстремальні кліматичні умови (у 2003 році в Західній Європі та в 2007 році в Східній Європі) призвели до катастрофічних пожеж, таких як ті, що зазнали Португалія та Греція. Наслідки таких катастроф є величезними, навіть на політичному рівні.

Протягом 2001-2019 років 119 мільйонів гектарів (27 %) деревного покриву було втрачено в усьому світі через пожежі, тоді як 318 мільйонів гектарів було втрачено через усі інші причини втрати [1].

Статистика лісових пожеж у 2023 році є однією з найгірших у ЄС за це століття. Різке збільшення вигорілих площ було зафіксовано протягом літніх місяців 2023 року, здебільшого торкнувшись Середземноморського регіону. За загальною площею вигорілої поверхні 2023 рік став четвертим найгіршим роком з 2000 року.

У 2024 році сталося майже вдвічі більше середньої кількості пожеж для цієї пори року, але без значного впливу з точки зору вигорілих площ. Аналіз за різними типами рослинності за 2023 рік показує, що 37 % від загальної площі

горіння займали чагарники та вічнозелена рослинність, а 26 % (120 тис. га) становили ліси. Лісові пожежі завдали серйозної шкоди навколишньому середовищу, спричинивши близько 20 мегатонн (Mt) викидів CO₂, за оцінками EFFIS, що еквівалентно майже третині всіх викидів міжнародної авіації в ЄС за один рік. Пожежний сезон 2023 року почався з більшої кількості пожеж у лютому та березні, ніж зазвичай, у результаті чого в ЄС згоріло понад 100 000 га. Деякі більші пожежі сталися в Іспанії ще в березні та травні. Однак справжній пік пожежної активності припав на літні місяці, коли пожежонебезпечні умови стали критичними в Середземноморському регіоні. До кінця року площа вигорілої території, нанесеної на карту EFFIS, досягла 504 002 га, відстаючи від 2017 (988427 га), 2022 (837212 га) і 2007 (588388 га), трьох найгірших років цього століття. Умови високої пожежної небезпеки – сухий ґрунт, низька вологість і сильний вітер – сприяють спалаху лісових пожеж та їх поширенню, що призводить до потенційно критичних лісових пожеж, які іноді називають мегапожежами. Інтенсивність горіння цих пожеж перешкоджає ефективності традиційних методів пожежогасіння з повітря, які не можуть взяти їх під контроль, доки пожежна небезпека не покращиться та не дозволить втручатися наземним групам пожежогасіння. Фактично, у 2023 році сталася найбільша одиночна пожежа в Європі з 1980-х років. Спалахнувши 19 серпня поблизу Александруполі (Греція), ліс вигорів на площі понад 96 тис. га та спричинив численні людські жертви. Виникнення цих типів сильних лісових пожеж пов'язано з умовами дуже високої та екстремальної небезпеки лісових пожеж під час зміни клімату.

У глобальному масштабі 2023 рік ознаменувався безпрецедентними лісовими пожежами в багатьох регіонах світу, зокрема в Канаді, де за оцінками вигоріла площа понад 18 мільйонів га (приблизно вдвічі більше, ніж у Португалії).

У 2024 році в багатьох регіонах світу знову фіксувались посухи та високі температури, які сприяли розгоранню та поширенню лісових пожеж. Служба

зміни клімату Copernicus повідомила, що лютий 2024 року був найтеплішим за всю історію спостережень і дев'ятим найтеплішим місяцем поспіль [2].

Які ж причини спонукають виникненню та розповсюдженню пожеж [3-5]?

1. Основними причинами виникнення лісових пожеж в Україні є загоряння внаслідок російської агресії (45 %).

2. Відмова від обробітку землі. Відмова від обробітку землі призводить до розвитку лісових видів, процес, який призведе до формування лісу. Це породжує найнебезпечніші типи скупчень легкого палива з високим рівнем безперервності в горизонтальному та вертикальному розподілі палива, в якому займання може легко поширюватися, набувати високих швидкостей та інтенсивності та надзвичайно важко контролювати. У цих районах блискавка є основною причиною пожеж. Наприклад, у дедалі більш безлюдних гірських районах Центральної Іспанії кількість пожеж від блискавок становила до 25 % від загальної кількості протягом 1996-2005 років з максимумом у 52 %.

3. Пасовища та використання вогню. Пожежі виникають внаслідок традиційного використання вогню для утримання пасовищ і позбавлення від дерев'янистої рослинності. Загалом законодавство всіх європейських країн забороняє використання відкритого вогню та спалювання сільськогосподарських культур усередині та поблизу лісів (наприклад, 200 м у Франції, 300 м у Португалії та 400 м в Іспанії).

Політика стимулювання ЄС передбачає субсидії на голову овець і кіз незалежно від площі землі, на якій ці тварини пастимуться. Крім того, їм дозволяється сезонна міграція на нові пасовища. Відсутність взаємозв'язку між землевласником і землекористуванням призводить до того, що пастухи використовують вогонь у більш неконтрольований спосіб, що спричиняє лісові пожежі.

4. Визначення заповідних територій для збереження природи. При оголошенні регіону особливо заповідним (національний парк, природний парк тощо) виникають певні обмеження, спрямовані на збереження або відновлення

природних ресурсів. Це безпосередньо впливає на життя місцевих громад і може вступати в протиріччя з їх використанням і звичаями. Може виникнути конфронтація, симптомом якої є лісова пожежа.

«Порубай і спали» для сільськогосподарських потреб або систематичне спалювання сільськогосподарських відходів. Перший конфлікт виникає через використання вогню для знищення лісової рослинності та її подальшої заміни сільськогосподарськими культурами. Однак наразі спостерігається тенденція до зменшення цього конфлікту через відсутність попиту на створення нових сільськогосподарських площ, окрім місць, де можливе зрошення. Очевидно, що площа зрошуваних земель дуже обмежена в просторі через наявність води. Крім того, політика ЄС щодо запобігання надлишків, спрямована на зменшення надлишків сільського господарства, стримує подальші поселення на лісових угіддях, які зазвичай є низькопродуктивними землями через їх якість або схил. Другий конфлікт стосується використання вогню для знищення пожнивних залишків (випалювання стерні) та підготовки землі до подальшого посіву, що є традиційною операцією на землях вирощування зернових. Виконується також для видалення підліску, бур'янів і всього, що заважає землеробству.

Іншою проблемою, яка виникає внаслідок занедбаності землі, є закриття смуг, стежок і другорядних доріг, заселених природною рослинністю. Підпалити, щоб відкрити їх – новий конфлікт сільського походження.

5. Перехід землекористування в містобудування. Проблема виникає зі швидким поширенням міських територій, які займають прикордонні сільськогосподарські угіддя, а потім переходять у більш віддалені лісові угіддя. Доступний індивідуальний і громадський транспорт до міських районів означає, що навіть більша частка землі має потенціал розвитку міста. Дехто каже, що цілеспрямоване випалювання рослинних земель полегшить отримання дозволів на зміну цільового призначення землі для будівництва житлових масивів.

Можна встановити зв'язки між просторовим розподілом точок спалаху пожежі та міськими зонами. Декілька досліджень показали, що приблизно три

чверті осередків займання розташовані в цих зонах, і більшість із них розташовані в зонах, що характеризується високим скупченням рослинності та високою щільністю будинків. Крім того, коли спалахують пожежі, пріоритет у гасінні вогню буде логічно віддаватися захисту людей і будинків, залишаючи ліс для згорання.

6. Розширення рекреаційного використання лісової території. Проблема виникає внаслідок захоплення лісових територій для рекреаційних заходів, таких як походи та полювання. Постійно зростаюча присутність людей у лісі збільшує ймовірність недбалого використання вогню під час приготування їжі на відкритому повітрі або курцями. Деякі мисливці можуть навіть використовувати його, щоб змусити тварин показати себе. Сучасна тенденція полягає в посиленні правил, посиленні нагляду та обмеженні подорожей у лісі. Від іншої практики, притаманної до 1980-х років – створення в лісі майданчиків для барбекю, відмовляються. Ті території, які вже існують, демонтуються, а розведення вогню на відкритому повітрі в лісах заборонено.

7. Утилізація сміття вогнем. Величезні обсяги сміття у великих містах спричинили великі інвестиції в обладнання для обробки. Однак у середніх і малих містах його все ще накопичують і ліквідують шляхом спалювання. Позбавлення від сміття може обернутися лісовою пожежею.

Інші причини пожеж не пов'язані безпосередньо з використанням землі, а скоріше з людською поведінкою (помста, правопорушення, піроманія) або неналежним управлінням.

Помста може бути спрямована на окремих осіб або на суспільство, і вогонь є одним із багатьох використаних засобів. Причини різні: від розчарування мисливця, який не може знайти місце для полювання, до сварок між окремими громадянами. Терористичні акти також можна віднести до цієї категорії, хоча достовірної інформації небагато. Правопорушення часто пов'язують із використанням вогню для приховування іншого правопорушення або для допомоги в його вчиненні браконьєрами, контрабандистами та хуліганями.

Навмисне підпалювання можуть влаштовувати тимчасові працівники лісу, які бажають зберегти свою роботу. Інші причини пов'язані з поганою практикою управління, наприклад військовими навчаннями, громадськими роботами з використанням вибухівки, погано обслуговуваними лініями електропередач та управлінням рослинністю [4-5].

Лісові пожежі мають великий вплив на різні сфери життя, включаючи економічні, соціальні та екологічні аспекти.

Лісові пожежі можуть призвести до знищення будинків та інших споруд у лісових місцевостях, що призведе до значних матеріальних збитків та загрози для життя і здоров'я людей.

Великі лісові пожежі видають значні обсяги диму та шкідливих речовин, таких як вуглеводні та сажа. Це може призвести до погіршення якості повітря, що може викликати проблеми здоров'я, зокрема, проблеми з диханням, алергічні реакції та інші захворювання.

Лісові пожежі можуть змусити евакуювати мешканців прилеглих населених пунктів, що може призвести до стресу, збитків та змін у їхньому житті.

Пожежі можуть пошкодити або знищити цінні культурні та історичні об'єкти, такі як пам'ятки археології, храми, палаци тощо, що призводить до втрати культурної спадщини.

Лісові пожежі можуть призвести до обмеження руху транспорту через дим, обвали доріг або інші небезпечні умови на дорогах, що може вплинути на економічну активність та транспортні мережі.

Пошкодження ґрунтів, вододілів і водопостачання може вплинути на сільське господарство та життя місцевого населення.

Витрати на гасіння лісових пожеж можуть бути значними, включаючи затрати на техніку, паливо, працюючий персонал і так далі.

Лісові пожежі призводять до значних втрат лісових ресурсів, таких як деревина, ягоди, гриби та інші корисні продукти, що може мати негативний вплив на економіку регіону.

Лісові пожежі можуть збільшити вартість страхування для мешканців та підприємств у зоні ризику.

Пошкодження закладів відпочинку може мати великий вплив на туристичну індустрію та економіку регіону.

Пожежі можуть знищити природні місця мешкання диких тварин та рослин, що може призвести до зменшення біорізноманіття та екологічної різноманітності.

Лісові пожежі можуть викидати великі обсяги вуглецю в атмосферу, що призводить до збільшення викидів парникових газів та зміни клімату.

Після пожежі необхідно проводити реабілітацію та реставрацію лісових екосистем, що також вимагає значних витрат коштів та ресурсів.

Ці аспекти демонструють, що лісові пожежі мають комплексний вплив на економіку, соціум та екологію, і потребують комплексного підходу до їх управління.

Висновок до розділу 1

У 2023 році загальна площа вигорілих лісів посіла четверте місце з початку 2000-х років. Ці пожежі у 2023 році призвели до викидів CO₂, еквівалентних майже третині річних викидів авіації в ЄС і завдали значної шкоди екосистемам та здоров'ю людей. У 2024 році кількість пожеж майже вдвічі перевищила середній показник для цього періоду. Причинами цих пожеж були недбале використання вогню для утримання пасовищ, відсутність обробки ґрунту, блискавки у віддалених гірських районах та екстремальні погодні явища, такі як посуха та високі температури. Наслідки цих пожеж мають вплив на різні сфери життя, включаючи економічні, соціальні та екологічні аспекти.

РОЗДІЛ 2

ПОДІЛ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ: ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Лісові пожежі є однією з найсерйозніших загроз сучасності, спричиняючи значні збитки для природи, економіки та суспільства. Кожен вогонь в лісі має потенціал спровокувати ланцюжок негативних наслідків, які ставлять під загрозу біорізноманіття, здоров'я людей, економічне благополуччя та стабільність екосистем.

Економічні втрати від лісових пожеж можуть бути значними. Вони охоплюють знищення лісових ресурсів, які є джерелом деревини та інших корисних матеріалів, а також втрати доходів для місцевих господарств та підприємств. Крім того, великі суми коштів витрачаються на боротьбу з пожежами та відновлення пошкоджених територій.

Пожежі також призводять до змін клімату через викиди та поглинання вуглекислого газу. Це може призвести до збільшення концентрації парникових газів у атмосфері та посилення глобального потепління.

Знищення ґрунту та ерозія також є серйозними наслідками лісових пожеж. Вони можуть призвести до втрати родючого шару ґрунту та забруднення водних ресурсів, що має серйозні наслідки для якості ґрунту та водних екосистем.

Крім того, пожежі можуть призвести до втрати майна та інфраструктури, а також до руйнування місцевих спільнот. Вони можуть знищити будинки, дороги, мости та інші споруди, що призводить до значних економічних збитків та соціального розшарування.

Знищення лісів, втрата біорізноманіття, ерозія ґрунту, забруднення повітря та водних ресурсів – це лише кілька аспектів негативного впливу лісових пожеж..

Розуміння та ефективне вирішення проблеми лісових пожеж стає неминучою необхідністю в сучасному світі. Для прогнозування та керування цими пожежами використовуються різноманітні моделі, які допомагають аналізувати та передбачати їхнє поширення та наслідки.

Ліс, за сучасними уявленнями, є складною системою, в якій взаємодіють живі та неживі складові, обмінюючись речовинами та енергією. Фітоценоз лісу охоплює різноманітні види рослин, такі як дерева, кущі, трава, мохи, лишайники та інші. Неживі елементи включають мертві рослинні залишки, такі як гілочки, листя, а також суху траву та гілки.

Ліс зазвичай складається з кількох ярусів: від високих дерев, що виростають понад 6 метрів, до низькорослих трав'янистих рослин від 0,1 до 0,8 метра, а також шару хворосту і лишайників. Верхній шар ґрунту називається підстилкою, а рослинний покрив на землі – підстилковим покривом. Саме дерева формують верхній ярус, який називається пологом деревостою [6].

Різнманітність лісу пояснюється наявністю різних видів та вікових груп дерев і кущів. Лісові пожежі – це природні явища, коли відбувається горіння рослин та інших матеріалів, і відбувається перенесення енергії через конвекцію, випромінювання та кондукцію.

Під зоною пожежі розуміється частина природного середовища, де параметри відрізняються від звичайних значень через термічні зміни, що виникають під час пожежі.

2.1 Види лісових пожеж

2.1.1 Ґрунтові лісові пожежі

Ґрунтові лісові пожежі, також відомі як наземні пожежі – це тип лісових пожеж, які переважно горять в органічному шарі ґрунту в межах лісових екосистем. На відміну від типових лісових пожеж, де полум'я охоплює надземну рослинність, під час ґрунтових лісових пожеж горіння відбувається під поверхнею, часто підживлюючись шарами органічної речовини, що розкладається, наприклад, опалим листям, гілками та іншими рослинними рештками.

Ґрунтові лісові пожежі зазвичай починаються від різних джерел займання, таких як удари блискавки, людська діяльність, наприклад, розведення багаття або викинуті цигарки, або навіть самозаймання від накопичення тепла в органічних матеріалах, що розкладаються.

Після займання вогонь тліє і поширюється через органічний шар ґрунту, часто непомітно, доки не вийде на поверхню або не піде дим. Полум'я може бути невидимим над землею, але вогонь може бути інтенсивним під поверхнею, досягаючи високих температур, які можуть поглинати коріння дерев та органічні речовини. Через повільну і підступну природу ґрунтових пожеж вони можуть тривати тривалий час, що ускладнює їх виявлення і гасіння.

Причинами виникнення є удари блискавки. Крім того, накопичення тепла внаслідок тривалої сухої погоди може призвести до самозаймання в органічному шарі ґрунту. Неправильна утилізація легкозаймистих матеріалів у лісових масивах може сприяти підвищенню ризику. Посуха та високі температури підвищують вразливість лісових екосистем до ґрунтових пожеж через висушування органічного матеріалу, що робить його більш схильним до займання та горіння.

Ґрунтові лісові пожежі поводяться інакше, ніж верхові. Вони часто горять повільно і стабільно, проникаючи крізь органічний шар ґрунту. Вогонь може поширюватися в бік, слідуючи за кореневими системами дерев та іншої рослинності, а також підземними каналами, утвореними внаслідок розкладання органічних речовин. Інтенсивне тепло, яке генерує вогонь, може пошкодити або вбити коріння дерев, що в кінцевому підсумку призведе до падіння дерев і втрати лісового шатра. Ґрунтові пожежі можуть тліти протягом тривалого часу, знову запалюючи поверхневу рослинність або поширюючись на сусідні території, коли умови стають сприятливими, наприклад, під час періодів низької вологості або посилення вітру.

2.1.2 Низові лісові пожежі

Низові лісові пожежі, також відомі як поверхневі пожежі, зазвичай охоплюють нижній рівень рослинності, включаючи трав'яний покрив, підлісок, чагарники, опале листя та гілки. Такі пожежі часто виникають у лісових масивах, де на рівні землі є значні запаси палива. Вогонь може поширюватися по лісовій підстилці, створюючи суцільну ділянку палаючої рослинності. За розміром низова лісова пожежа, що поширюється на площі 0,5 гектара або більше, утворює чітку форму, що часто нагадує коло або овал, окреслену зовнішньою межею кромки пожежі, відомою як контур пожежі.

Низинні лісові пожежі можуть бути спричинені природними явищами, такими як удари блискавки. Діяльність людини, включаючи розведення багать, викинуті цигарки, спалювання сміття або навмисні підпали, також може спричинити низові лісові пожежі. Посуха, високі температури, низька вологість і сильний вітер підвищують ймовірність займання і сприяють швидкому поширенню вогню через суху рослинність.

Низинні лісові пожежі зазвичай горять на рівні землі або поблизу неї, охоплюючи поверхневу рослинність, лісову підстилку та повалені уламки. Основними горючими матеріалами є трав'яний покрив, підлісок і чагарники.

Ці пожежі можуть поширюватися відносно швидко, особливо за сприятливих погодних умов, таких як суха і вітряна погода, які забезпечують достатню кількість палива і кисню для підтримання горіння.

Поведінка низових лісових пожеж може змінюватися залежно від таких факторів, як вологість палива, топографія, напрямок вітру та інтенсивність пожежі. Схили та особливості рельєфу можуть впливати на поведінку вогню, причому пожежі швидше поширюються в гору через посилення повітряних потоків і попереднє нагрівання рослинності.

Лісові пожежі в низинах можуть демонструвати цілий ряд характеристик поведінки вогню, включаючи полум'яне горіння, тління і плямистість, коли

палаючі вуглики разносяться вітром і запалюють нові вогнища перед основним фронтом пожежі.

2.1.3 Верхові лісові пожежі

Верхові пожежі – це тип лісових пожеж, які вражають насамперед лісовий покрив або верхні рівні рослинності. На відміну від низових лісових пожеж, які охоплюють поверхневу рослинність, або ґрунтових пожеж, які тліють під землею, верхові пожежі поширюються через верхні шари лісового покриву. Ці пожежі створюють унікальні виклики через висоту і густоту рослинності, а також рельєф місцевості і умови навколишнього середовища.

Верхові пожежі в першу чергу впливають на лісовий покрив, поширюючись через верхні рівні рослинності, такі як високі дерева, гілки та листя. Вогонь може запалити верхівки дерев або крону, що призводить до розвитку верхової пожежі, яка може швидко поширюватися і демонструвати екстремальну пожежну поведінку.

Верхові пожежі можуть спричиняти сильне нагрівання та утворювати велику кількість диму, що створює значні труднощі для пожежогасіння та контролю якості повітря. Полум'я може перестрибувати з дерева на дерево під впливом вітру і топографічних чинників, створюючи динамічний і швидко рухомий фронт вогню.

Такі пожежі можуть демонструвати нестабільну поведінку через такі фактори, як напрямок і швидкість вітру, крутизна схилу і вологість палива [7].

2.2 Вплив типу лісу на лісову пожежу

2.2.1 Хвойні ліси

Хвойні ліси є особливо схильними до верхових пожеж через кілька основних причин, серед них відмітимо високий вміст смол та летких органічних сполук у хвойних породах дерев.

Хвойні дерева, такі як сосна, ялиця та інші, мають високий вміст смоли та інших летких органічних сполук, які легко випаровуються та загоряються. Це робить їх особливо вразливими до швидкого поширення вогню.

Також важливу роль відіграє характер верхнього шару лісу. Верхній шар хвойних лісів часто складається з сухої хвої та гілля, які не є вогнестійкими. Під впливом вітру та сприятливих умов, пожежа може швидко розповсюджуватися через цей верхній шар.

Ще одним з визначальних факторів є конструкція хвойних дерев. Самі по собі хвойні дерева мають особливу конструкцію, яка сприяє швидкому поширенню вогню. Їх гілки та конуси мають схильність до згорання та легко вигорають, що створює сприятливі умови для верхових пожеж.

Ці фактори роблять хвойні ліси особливо вразливими до верхових пожеж, які можуть поширюватися дуже швидко та інтенсивно. Інтенсивність та швидкість поширення верхових пожеж у хвойних лісах часто роблять їх особливо небезпечними для людей, тварин та навколишнього середовища.

2.2.2 Листяні ліси

У листяних лісах переважно виникають низові пожежі. У листяних лісах сухе листя, опале гілля та інше можуть накопичуватися на ґрунті. Цей матеріал стає легкою здобиччю для вогню, що може спричинити низові пожежі.

Листяні матеріали зазвичай горять повільніше, ніж смолисті дерева та хвоя, які характеризуються високим вмістом смол. Це часто призводить до того, що низові пожежі в листяних лісах рухаються повільніше.

Незважаючи на те, що низові пожежі можуть рухатися повільніше та менш інтенсивно, вони все ж можуть призвести до серйозних наслідків. Вони можуть пошкодити дерева, рослини, ґрунти та спричинити великі збитки екосистемі.

Низові пожежі в листяних лісах можуть також перетворитися в верхові пожежі, особливо якщо вони досягають сухого лісового покриву або дерев, що мають сухі гілки та листя.

Взагалі, низові пожежі в листяних лісах, хоч і рухаються повільніше, все одно можуть бути небезпечними, особливо в сухих та спекотних умовах, коли вогонь легко поширюється через сухий матеріал на ґрунті.

2.2.3 Змішані ліси

У змішаних лісах можуть бути обидва типи пожеж – як верхові, характерні для хвойних лісів, так і низові, які частіше спостерігаються в листяних лісах. Тип пожежі буде залежати від складу дерев, умов вологості, швидкості вітру та інші факторів навколишнього середовища.

Залежно від того, які породи дерев переважають, пожежа може виявитися більш спрямованою до верхових (якщо переважають хвойні дерева з високим вмістом смол) або до низових (якщо переважають листяні породи з більш сухими листям і гілками).

У змішаних лісах умови вологості можуть варіюватися від одного регіону до іншого та залежати від сезону. Вологі умови можуть уповільнювати поширення пожежі, тоді як сухий період може сприяти її швидкому поширенню.

Людська діяльність, така як вирубка лісу, спалювання відходів, або необережне поводження з вогнем, може спричинити пожежу в будь-якому типі лісу, включаючи змішані.

На поширення пожежі може значно впливати швидкість вітру. Сильний вітер може сприяти швидкому поширенню верхової пожежі через крони дерев, тоді як слабкий вітер може більше сприяти низовій пожежі на ґрунті [8].

2.3 Класифікація лісових пожеж за швидкістю розповсюдження

Лісові пожежі можна поділити за швидкістю їхнього розповсюдження на кілька типів залежно від швидкості та інтенсивності поширення вогню.

– Швидкі пожежі характеризуються швидким та інтенсивним поширенням вогню через лісовий масив. Вони можуть виникнути внаслідок сильного вітру, сухості, низької вологості повітря або інших сприятливих умов.

Швидкі пожежі можуть бути особливо небезпечними через швидкість, з якою вони розповсюджуються, та важкість контролю над ними. Швидкі пожежі, які характеризуються швидким та інтенсивним поширенням вогню через лісовий масив, можуть бути особливо характерними для лісів з хвойними породами дерев.

– Помірно швидкі пожежі розповсюджуються трохи повільніше, зі швидкістю від 5 до 10 кілометрів на годину. Інтенсивність їх може бути помірною, але все ж вони можуть швидко поширюватися через ліс, особливо в умовах сприятливого вітру та сухості. Помірно швидкі пожежі можуть бути характерними для різних типів лісів, але вони частіше спостерігаються у змішаних лісах. В цих лісах помірно швидкі пожежі можуть виникати внаслідок поєднання різних факторів, таких як вміст смоли, вологість ґрунту та інші.

– Повільні пожежі рухаються дуже повільно, зі швидкістю менше 5 кілометрів на годину. Ці пожежі можуть тривати довгий час, поширюючись через сухі листя, гілки та інші матеріали на ґрунті. Інтенсивність їхнього поширення може бути низькою, але вони все одно можуть становити загрозу для лісу та навколишнього середовища. Повільні пожежі можуть бути характерними для листяних лісів, де сухе опале листя та гілки можуть накопичуватися на ґрунті. У просіках лісів або у міських парках, де можуть накопичуватися сухі гілки, листя та інші рослинні відходи, повільні пожежі можуть виникати через розпалювання цих матеріалів на ґрунті.

– Інтермітентні пожежі – це пожежі, які виявляють нестабільний характер у своєму поширенні та інтенсивності. Пожежі можуть змінювати свою інтенсивність та швидкість розповсюдження від одного моменту часу до іншого, що ускладнює контроль та ліквідацію. Пожежі можуть гаснути на деякий час, а потім знову спалахувати через певний період часу. Це може бути внаслідок зміни умов навколишнього середовища або через відновлення джерела пального [9].

2.4 Класифікація лісових пожеж за масштабом поширення

Лісові пожежі також можна класифікувати за їхніми розмірами на кілька категорій.

– Малий масштаб пожеж, які обмежуються досить невеликими площами, зазвичай менше одного гектара. Вони можуть бути локальними, швидко загасають і не завдають значних збитків екосистемі.

– Лісові пожежі середнього масштабу, які впливають на більші площі, зазвичай від одного до десяти гектарів. Вони можуть вимагати значно більших зусиль для гасіння і можуть мати помірний вплив на екосистему.

– Пожежі великого масштабу охоплюють великі території, зазвичай більше десяти гектарів. Вони можуть бути складними для гасіння та можуть мати серйозний вплив на лісові екосистеми, включаючи великі втрати дерев і біорізноманіття.

– Мегапожежі – це надзвичайно великі пожежі, які охоплюють великі регіони або навіть країни. Вони можуть мати дуже серйозний вплив на середовище, економіку та загрози для життя людей та тварин [9].

Висновок до розділу 2

Загалом, лісові пожежі можна класифікувати за кількома критеріями, такими як тип лісу, швидкість та інтенсивність поширення вогню, розмір пожежі та інші фактори.

Пожежі можуть бути верховими (поширюються через верхній шар лісу) або низовими (поширюються на рівні землі або нижній рослинній покрив). Верхові пожежі частіше виникають у хвойних лісах через їхню конструкцію та вміст смол, тоді як низові пожежі частіше спостерігаються у листяних лісах. Вони можуть бути швидкими, помірно швидкими або повільними, залежно від умов погоди, типу лісу та інших факторів. Швидкі пожежі частіше характерні

для хвойних лісів, де вони можуть швидко поширюватися через крони дерев. За розмірами пожежі можуть бути малими, середніми, великими або навіть мегапожежами, залежно від території, яку вони охоплюють. Масштаб пожежі може визначати складність боротьби з нею та вплив на екосистему.

Залежно від цих факторів, лісові пожежі можуть мати різний вплив на лісові екосистеми, включаючи збитки для дерев, рослинності, ґрунту та тваринного світу.

РОЗДІЛ 3

ВПЛИВ РЕЛЬЄФУ, ПАЛИВА ТА ПОГОДИ НА ПОВЕДІНКУ ПОЖЕЖІ

Фактори, що впливають на поведінку пожежі, можуть бути як природними, так і антропогенними. Поведінка пожежі – це описовий термін, який використовується для позначення того, що вогонь робить і як він поводить себе. Він оцінює, що зробить пожежа, і пов'язаний з інтенсивністю, полум'ям і швидкістю поширення конкретної пожежі. Фактори навколишнього середовища, які взаємодіють один з одним, включають деревину, рельєф, погоду та вогонь. Інтенсивність і швидкість, з якою поширюється пожежа, залежить від кількості та розташування дрібнодисперсного мертвого палива, вмісту вологи в мертвому паливі, швидкості вітру поблизу осередку полум'я, місцевості та схилу [10]. Поведінка пожежі, що поширюється, визначається такими факторами, як погода, рельєф, кількість палива та вологість палива. У [9] представлено концепцію середовища пожежі – навколишні умови, впливи та модифікуючі сили, які визначають поведінку пожежі.

Зміна станів кожного з компонентів середовища; рельєф, деревина і погода та їх взаємодія один з одним, а також сама пожежа визначають характеристики та поведінку пожежі в будь-який момент. Зміни поведінки пожежі в просторі та часі відбуваються у зв'язку зі змінами компонентів навколишнього середовища. З точки зору природних пожеж, рельєф не змінюється з часом, але може сильно змінюватися в просторі. Паливна складова змінюється як у просторі, так і в часі. Погода є найбільш мінливим компонентом, який швидко змінюється як у просторі, так і в часі [9].

3.1 Вплив рельєфу на розповсюдження лісової пожежі

Лісові пожежі, як правило, горять набагато швидше на підйомах, ніж на рівній землі, через попередньо нагріту деревину. Ці ж фактори діють проти пожежі, коли вона горить від вершини до низу (рис. 3.1).

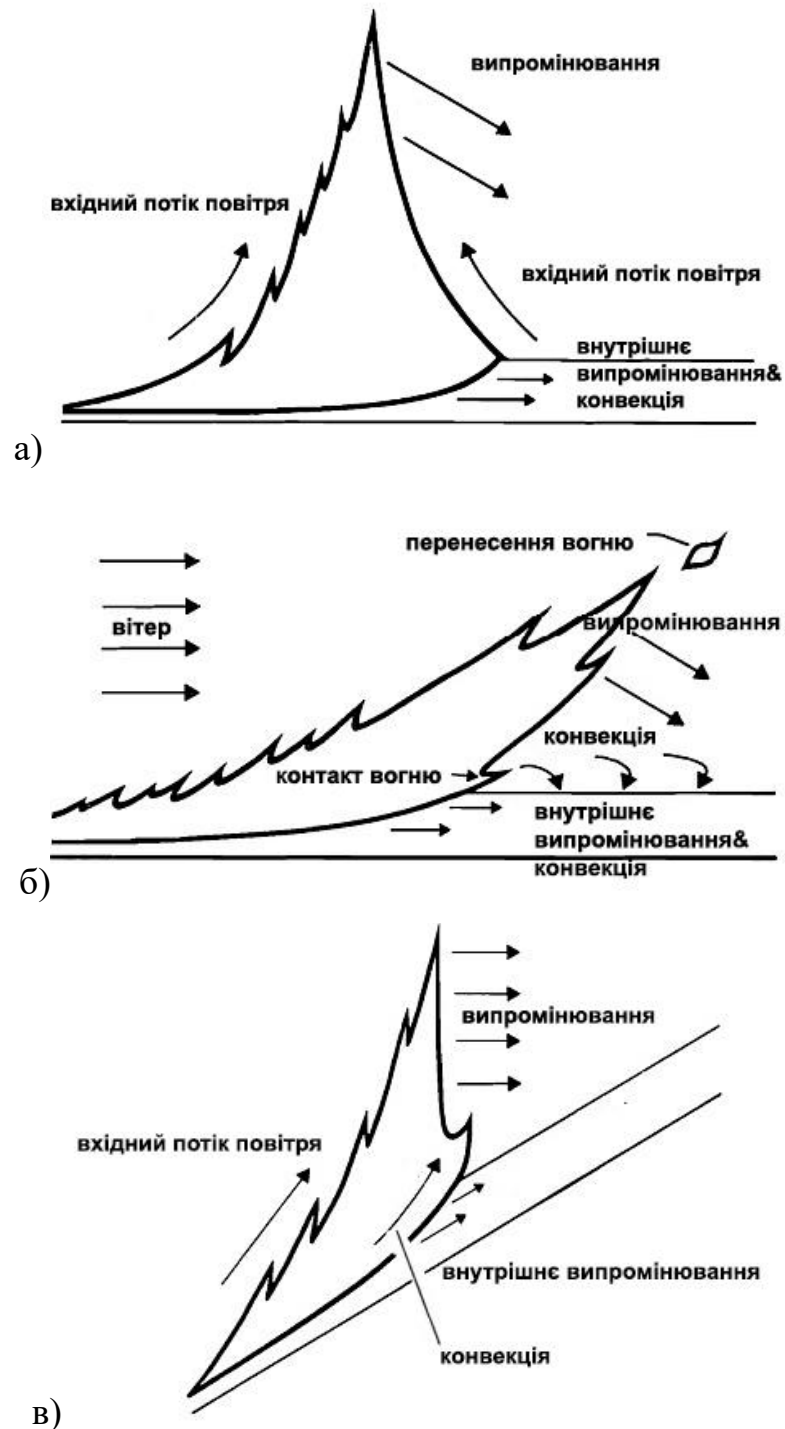


Рисунок 3.1 – Вплив схилу на розповсюдження вогню [11]

Хоча вогонь зазвичай не рухається вниз швидко, серйозна проблема щодо пожежі, що спалахує вниз по крутих схилах, полягає в можливості горіння матеріалу, що котиться вниз, який може запалити ліс нижче, спричинивши нову пожежу.

Схил стосується нахилу будь-якої земельної маси – незалежно від того, чи вона природна, чи побудована руками людини (наприклад борти греблі). За відсутності вітру пожежі зазвичай рухаються швидше вгору, ніж вниз, тому чим крутіший схил, тим швидше рухається пожежа.

Збільшення швидкості поширення лісової пожежі зумовлене кількома факторами:

- полум'я знаходиться ближче до палива, висушуючи, попередньо нагріваючи та раніше запалюючи його, ніж у випадку, якщо воно було б на рівній місцевості,

- вітрові потоки зазвичай рухаються вгору протягом дня і мають тенденцію підштовхувати тепло та полум'я до нових видів палива,

- пожежі на підйомах створюють протяг, збільшуючи швидкість розповсюдження вогню.

Кут схилу визначає вплив сонячного тепла на рослини і дерева схилу, температуру повітря і вологість ґрунту. Сонячне випромінювання може впливати на поведінку вогню, впливаючи на вологість палива та точки запалення.

- Північні схили. На північних схилах зазвичай більше тіні. Як наслідок, схили, спрямовані на північ, мають важче паливо, нижчу температуру, вищу вологість і вищу вологість палива. Північні схили матимуть меншу пожежну активність, ніж південні схили.

- Східні схили. Східне та південно-східне розташуванням схилів приблизно однаково нагріваються сонцем, оскільки сонце рухається по небу зі сходу на захід. Зі сходом сонця східні схили нагріватимуться раніше, але також раніше охолоджуватимуться.

– Західні схили. Подібно до східних і південно-східних схилів, південно-західне та західне розташування схилів приблизно однаково нагріваються сонцем, коли сонце рухається по небу зі сходу на захід. Західні схили нагріватимуться та охолоджуються пізніше протягом дня.

– Південні схили. Схили, звернені на південь, отримують прямі сонячні промені та стають більш гарячими, ніж схили, звернені в будь-якому іншому напрямку. Вища температура на південному розташуванні призводить до нижчої вологості, швидкої втрати палива та вологи в ґрунті, а також більш сухого, легшого палива, такого як трава. Усе це разом робить південні схили більш вразливими до пожеж, ніж північні.

Деякі особливості ландшафту також відіграють значну роль у розвитку пожеж. Серед них необхідно відмітити яри і долини.

Яри та долини можуть різко прискорювати пожежі, змінювати напрямок та швидкість вітрів, викликаючи нестабільну поведінку пожежі. Навіть за відсутності вітру ці утворення можуть змінювати швидкість і напрямок розповсюдження пожежі, діючи як димарі та буквально розганяючи вогонь, наче крізь пічну трубу.

Спрямування вітру є прямим наслідком природних особливостей, таких як долини та яри. Подібно до вітру, конвективне повітря та перегріті газидуть шляхом найменшого опору. Долини та яри, а також вузькі ущелини виступають як димові канали. Особливо це стосується глибоких ущелин. Швидкість поширення пожежі у глибоких ущелинах може бути високою через високі температури та інтенсивне випромінювання тепла та жару, які накопичуються в цьому обмеженому просторі.

Поведінка пожежі може змінюватись від виду ущелин. Пожежі, які починаються біля основи коробкових ущелин та вузьких ущелин, можуть реагувати подібно до вогню в дерев'яній пічці або каміні. Повітря буде втягуватися знизу ущелини, створюючи дуже сильні вітри, що направлені вгору.

Ці вітри можуть прискорити розповсюдження вогню вгору по ущелині, що може призвести до екстремальної поведінки вогню та бути небезпечним.

Вогонь у крутій, вузькій ущелині легко може розповсюджуватися на паливо на протилежному боці через випромінювання та попадання попелу.

В широких ущелинах напрямок або орієнтація ущелини може змінювати напрям вітру. Сильні відмінності в поведінці вогню будуть відбуватися на північних та південних частинах ущелини. Поширення пожеж через широкі ущелини не є поширеним явищем, за винятком сильних вітрів.

Вогонь, що горить вздовж бічних гребнів, може змінювати напрямок, коли доходить до місця, де гребінь опускається в западину. Ця зміна напрямку викликана потоком повітря в западині. Коли повітря опускається в низину, атмосферний тиск зростає, що призводить до стиснення та нагрівання повітря.

Ще одним елементом рельєфу, який впливає на розповсюдження пожежі, є бар'єри.

Бар'єр можна визначити як будь-яку перешкоду для поширення вогню, як правило, територію або смугу, де немає горючого палива. До природних бар'єрів належать річки, озера, скельні виходи або гірки, вигорілі ділянки та болота. Штучні бар'єри включають дороги, водосховища, вогняні лінії, побудовані вогняними ресурсами.

Коли горючі елементи розділені природними або створеними людиною бар'єрами, випромінюваного тепла може бути недостатньо для попереднього нагрівання або запалювання навколишніх елементів.

3.2 Вплив палива на розповсюдження лісової пожежі

Знання характеристик лісових горючих елементів та їх впливу на ймовірність запалення – ще один прогностичний показник поведінки вогню.

Живе паливо та мертво паливо – це два типи матеріалів, які можуть сприяти поширенню лісових пожеж.

Живе паливо – це живі рослини, такі як дерева, кущі, трави, чагарники тощо, які можуть підтримувати горіння. Ці рослини можуть бути зеленими і мати живі тканини, такі як листя, гілки та стебла. Живі рослини зазвичай містять вологу, яка може гасити пожежу або ускладнювати горіння.

Мертве паливо – це матеріали, які вже не мають живих тканин, такі як опале листя, сухі дерева, гілки, суха трава тощо. Мертве паливо має високу легкозаймистість, оскільки воно втратило вологу та може швидко сприяти розповсюдженню пожежі.

Незалежно від типу палива чи його комбінації, поведінка вогню залежить від певних характеристик палива.

– Навантаження. Паливне навантаження відноситься до кількості як живого, так і мертвого палива в певній області. Іноді паливне навантаження називають об'ємом палива. Зазвичай паливне навантаження задається в тонах на гектар (т/га). Наприклад, трава може коливатися від 0,56 т/га до 2,20 т/га; для лісоматеріалів це може становити в середньому 1320 т/га. За рівності всіх інших факторів, що впливають на поведінку пожежі, зони з більшим навантаженням палива вироблятимуть більше тепла, ніж зони з меншим навантаженням палива.

– Співвідношення площі поверхні до об'єму. Знання співвідношення площі поверхні до об'єму палива також допоможе передбачити, наскільки швидко паливо буде висихати та горіти. В загальному, дрібні палива мають більше співвідношення площі поверхні до об'єму, ніж важкі палива.

– Вологість. Вміст вологи в лісових паливах постійно змінюється внаслідок наявності води в середовищі. Вологість палива – це кількість води в паливі, виражена у відсотках від загальної сухої маси цього палива.

– Температура. Земля нагріває як оточуюче повітря, так і лісові палива, знижуючи їх вологість та наближаючи до їх температури горіння.

Розмір і форма палива є характеристиками, які впливають на поведінку пожежі. Розмір впливає на швидкість тепловіддачі та зміну вмісту вологи. Передача тепла і вологи між паливом і навколишнім середовищем відбувається

на поверхні палива. Чим більша поверхня палива, тим більша тепло- і вологовіддача.

Залежно від погодних умов ця передача енергії призводить або до підвищення, або до зниження температури та вмісту вологи в паливі. У свою чергу, зміна температури впливає на процес горіння.

За розміром види палива можна поділити на легке, середнє, важке.

– Легке паливо є поверхневим і його також називають дрібним паливом. Легке паливо вбирає та віддає вологу швидше, ніж важке паливо. Прикладами легкого палива є низькі трави та легкі кущі або кущі до 0,6 м, які горять швидко та з високою інтенсивністю. Температура палива, вітри та рельєф сильно впливають на швидкість поширення вогню у легкому паливі. За рівних атмосферних умов легке паливо дає відносно високу швидкість розповсюдження вогню.

– До середніх видів палива належать чагарники заввишки до 1,8 м і трав'яний підлісок. Величезна кількість елементів, що містяться в середньому паливі, можуть спричинити горіння від середньої до дуже високої інтенсивності, але з відносно меншою швидкістю, ніж легке паливо. Загалом середнє паливо має тенденцію помірної швидкості розповсюдження вогню.

– Важке паливо складається з суцільних кущів або кущів заввишки понад 1,8 м і деревини. Характеристики згорання цього палива включають високу інтенсивність горіння, але, як правило, від низької до помірної швидкості розповсюдження вогню.

Кількість вологи, що міститься в паливі має величезний вплив на поведінку вогню. Наскільки добре паливо буде займатися і горіти, залежить від його вологості. Через різні розміри та характеристики різне паливо в одній зоні матиме різний рівень вологості. Подібне паливо на великій території матиме різний рівень вологості залежно від отриманих опадів, а також періодів теплої сухої погоди.

Сухе паливо запалюється та горить легше, ніж таке ж паливо, коли воно вологе. Це паливо має низький вміст вологи через тривале перебування на сонці, сухі вітри, посуху або низьку відносну вологість.

Мокре паливо має високий вміст вологи через вплив опадів або високу відносну вологість. Ця волога повинна випаруватися, перш ніж паливо загориться. Зі збільшенням вологи в паливі кількість тепла, необхідного для займання та горіння палива, також збільшується.

Вік і вид рослин впливають на кількість вологи, яку вони утримують. Старі рослини зазвичай сухіші, ніж молоді. Молода, активно зростаюча зелена рослинність вбирає воду, яка циркулює по всіх частинах рослини. Як наслідок, живе паливо зазвичай має відносно високий вміст вологи (від 35 % до 100 % від їх зневодненої ваги).

Мертві рослини зазвичай мають нижчий вміст вологи (від 1,5 до 30 %), ніж живі рослини.

Таким чином, рослинність, яка є мертвою та сухою, легше запалюється та горить інтенсивніше, ніж рослинність, яка є зеленою та вологою.

Розмір і форма палива впливають на швидкість, з якою вони поглинають і втрачають вологу. Наприклад, дрібна дерев'яна стружка запалюється легше, ніж великі поліна, оскільки стружка має набагато більше співвідношення площі поверхні до маси. Тому деревна стружка втрачає вологу швидше, ніж колода. Так само зміни вологості впливають на траву та соснову хвою більше, ніж на колоди, через їх розмір і форму. Але незалежно від розміру та форми, на всі види палива впливають щоденні та сезонні зміни вологості.

Коли температура вночі падає, навіть мертво паливо вбирає вологу з роси. Однак сонячне проміння вдень призводить до випаровування вологи з палива. Таким чином, паливо, що лежить на сонці, може містити на 8 % менше вологи, ніж таке ж паливо, що лежить у тіні. Наприклад, висушена трава може взагалі не горіти рано вранці, оскільки вона містить дуже багато вологи. Але коли

температура підвищується протягом дня, трава втрачає вологу і швидко горить, якщо її підпалити.

Система прогнозування поведінки пожежі базується на погодних циклах і типах палива. Вона класифікує мертве паливо відповідно до часу, необхідного для вирівнювання вмісту вологи в навколишньому повітрі, також відомого як категорія затримки часу або рівноважний вміст вологи. Ця система класифікує види палива як: 1-годинне; 10-годинне; 100-годинне; 1000-годинне. Простіше кажучи, 1-годинне паливо – це таке, якому знадобиться одна година, щоб вологість у ньому зрівнялася з кількістю вологи в навколишньому повітрі. Ці категорії затримки часу для палива також враховують середній діаметр мертвих палив для оцінки вологості палива.

1-годинне паливо. Якщо дивитись на паливо, яке менше 6 мм у діаметрі, як соснова хвоя, можна передбачити, що знадобиться приблизно одна година, щоб вологість у соснових гілках вирівнялася з вологою навколишнього повітря.

10-годинне паливо. Для палива діаметром 6-25 мм, наприклад невеликої гілки, знадобиться приблизно 10 годин, щоб вологість у гілці вирівнялася з вологістю навколишнього середовища.

100-годинне паливо. Для палива діаметром від 25 до 76 мм, наприклад мертвої гілки дерева, можна передбачити, що знадобиться приблизно 100 годин, щоб вологість мертвої гілки вирівнялася з вологою в навколишньому повітрі.

1000-годинне паливо. Якщо розглядати паливо діаметром від 76 до 203 мм, як колоду, можна передбачити, що знадобиться приблизно 1000 годин, щоб вологість колоди вирівнялася з вологістю навколишнього повітря. Під час спалювання дуже сухого 1000-годинного палива може вивільнитися велика кількість енергії і її важко контролювати. Оскільки 1000 годин дорівнює 42 дням, ця категорія зазвичай не змінюється між періодами. Однак 1000-годинна категорія може вказувати на тривалу посуху або тривалі вологі періоди. Після тривалого періоду теплої сухої погоди деревина може стати сухішою, ніж пиломатеріали, висушені в печі.

3.3 Вплив погоди на розповсюдження лісової пожежі

Сонячне випромінювання є основним винуватцем температури лісу, землі та повітря. Однак у менших масштабах великі пожежі можуть спричинити спеку та температуру вище середнього.

У середовищі лісових пожеж пряме сонячне світло та висока температура можуть призвести до попереднього нагрівання палива і наближають їх до точки займання, тоді як нижчі температури мають протилежний ефект. Вищі температури землі та листя роблять паливо більш сприйнятливим до займання, а листя під прямими сонячними променями може бути на 10 °C тепліше, ніж листя в тіні.

Температура повітря впливає на кількість вологи, яку повітря може утримувати. Більше вологи означає, що більше шансів контролювати лісову пожежу. Менше вологи в повітрі ускладнює це. Повітря може або додавати вологу до горючих матеріалів, або видаляти її з них, залежно від відносної вологості. Якщо відносна вологість висока, повітря додає воду до сухостою, зволожуючи його, тим самим зменшуючи ймовірність його горіння. Але коли відносна вологість низька (менше 30 %), повітря поглинає вологу з палива, зневоднює його та робить його більш чутливим до займання.

Оскільки температура повітря пізно вночі та рано вранці зазвичай нижча, ніж температура вдень і ввечері, матеріали (особливо легке, 1-годинне паливо) зберігають більше вологи. У ці періоди пожежі зазвичай менш активні, що дає більше часу, щоб краще контролювати пожежу.

Велика кількість опадів за короткий час не підвищить вологість лісу так сильно, як менша кількість опадів протягом тривалого періоду часу, коли дерева можуть поглинути більше вологи, перш ніж вона зникне.

Двома найважливішими погодними факторами, що впливають на поведінку природних пожеж, є вітер і вологість деревини. З них вітер найбільш мінливий і найменш передбачуваний. Вітер може швидко перенести вогонь у різні боки.

Вітер можна описати за трьома характеристиками: напрямком, швидкістю та турбулентністю. На приземні вітри сильно впливає рельєф і місцеве нагрівання й охолодження.

Швидкість і напрямок поширення пожежі в основному залежать від швидкості та напрямку вітру.

Безпосередній вплив вітру виникає, коли вітер посилює горіння, збільшуючи кількість кисню, доступного для вогню. Згладжує полум'я, попередньо нагріває та сушить деревину, роблячи її більш сприйнятливою до займання. Може переносити іскри на відстань понад 1,5 км попереду пожежі в незгорілий ліс, що призводить до точкових пожеж і збільшення швидкості розповсюдження пожежі.

Непрямий вплив вітру спостерігається наступним чином. Сильні сухі вітри поглинають вологу з деревини. Проте прохолодний вітер може допомогти дереву зберегти свою вологість. Оскільки швидкість і напрямок вітру можуть швидко змінюватися, поведінка пожежі, викликана вітром, також може швидко змінюватися. Вітер впливає на тривалість перебування полум'яного фронту вогню в зоні (так званий час перебування) та впливає на кількість спожитого вогнем палива. Чим сильніший вітер, тим коротший час перебування і менше витрачається палива.

Висновок до розділу 3

Розвиток лісової пожежі залежить від різних факторів, серед яких основні це рельєф, паливо та погода. Розглянуто вплив цих факторів на швидкість лісової пожежі.

Схил грає важливу роль у поширенні пожежі. Лісові пожежі поширюються швидше вгору, ніж вниз, особливо на крутих схилах, через попередньо нагріте паливо та можливість горіння матеріалу, що котиться вниз.

Вплив палива на розповсюдження пожежі визначається його характеристиками, такими як живе та мертве паливо, навантаження, співвідношення площі поверхні до об'єму, вологість та температура.

Висока температура палива, спричинена сонячними променями, може сприяти його запаленню, тоді як вітер може посилювати горіння шляхом поширення полум'я та перенесення іскор на великі відстані.

Розуміння взаємодії цих факторів дозволяє розробляти ефективні стратегії моделювання та управління лісовими пожежами. При цьому важливо враховувати їх взаємодію та вплив на розвиток пожежі для прогнозування та мінімізації її наслідків.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Лісові пожежі є частиною природного циклу життя в рослинних регіонах. Очевидне збільшення розміру та частоти пожеж останніх років відображає спадщину землеустрою, розширення людської діяльності та зміни кліматичних умов.

Традиційно наука про лісові пожежі та моделювання зосереджені на техніці протипожежної безпеки, стратегіях боротьби з лісовими пожежами та викидах диму та частинок в атмосферу.

Ранні дослідження поведінки вогню проводилися лісниками, а потім інженерами, які працювали з лісниками. Цей ранній підхід був емпіричним. Він почався з безпосереднього вимірювання вологості палива, а потім перейшов до визначення швидкості висихання палива шляхом кореляції зі спостережуваними значеннями приладів метеостанції.

Паливо було розділено на категорії залежно від рослинності та розміру та розташування, як, наприклад, у Канадській системі інформації про лісові пожежі (CWFIS) і Національній системі оцінки пожежної небезпеки (NFDRS). Традиційний підхід включав тепло від споживання палива, але не було диференціації різних типів теплопередачі, таких як випромінювання та конвекція. Наступними розробками було поєднання категорій палива з топографією та вітром для прогнозування поширення пожежі. Основна увага приділялася поведінці, а не механізмам горіння та теплопередачі.

Кількісні прогнози та оцінка наслідків лісових пожеж є важливими для формулювання методів управління землею (і паливом) для пом'якшення несприятливих наслідків великих лісових пожеж і розробки стратегій відновлення ландшафтів, уражених пожежами. Удосконалення моделей лісових пожеж із наявністю високопродуктивних обчислювальних засобів і прямих зв'язків із моделями погоди та цілим набором можливостей спостереження

пропонують нове розуміння цього природного (і встановленого) явища з безпрецедентним рівнем деталізації.

Існує багато варіантів класифікації моделей поширення лісових пожеж. За одним із варіантів розглядають емпіричні, напівемпіричні та фізичні моделі [12] (рис. 4.1).

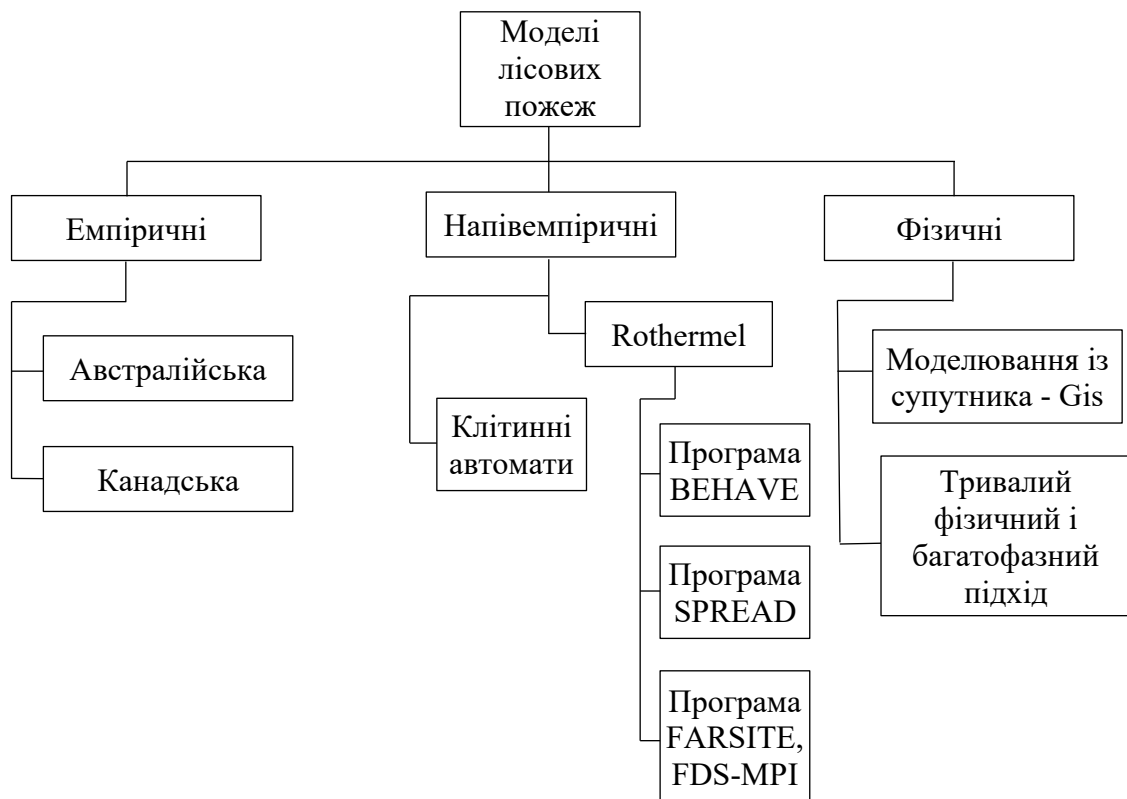


Рисунок 4.1 – Варіант класифікації моделей лісових пожеж

Інший варіант класифікації моделей поширення лісових наступний [13]: дистанційне зондування, фізичні та алгоритмічні моделі.

Технологія дистанційного зондування може надати необхідну інформацію про навколишнє середовище, необхідну для моніторингу та прогнозування поширення пожежі. У моделях дистанційного зондування ГІС (геоінформаційна система) зазвичай використовується для дослідження моделі просторового розподілу лісових пожеж [14]. Дані ГІС були використані для аналізу характеристик просторового та часового розподілу факторів, які впливають на

лісові пожежі в різних регіонах. Показано, що ГІС доступна для побудови систем моделювання лісових пожеж та рятування при формуванні відповідних протипожежних заходів для місцевих лісництв.

На основі безперервних досліджень багатьох дослідників було розроблено багато фізичних моделей поведінки лісових пожеж, заснованих на складних механізмах, оскільки концепція моделей поширення лісових пожеж вперше з'явилася в 1946 році. FIRETEC і WFDS (Wildland Fire Dynamics Simulator) [15], модель Meso-NH у Португалії [16] і FIRESTAR у Франції [17] є прикладами широкого використання фізичних моделей. Через нестабільність лісових пожеж важко отримати результати вимірювань параметрів, необхідних для деяких моделей у неконтрольованих умовах. Таким чином, якщо фізична модель спирається на великомасштабні дані про навколишнє середовище, її обчислювальна вартість і складність унеможливають практичне використання.

Існують також емпіричні моделі та напівемпіричні моделі, які були розроблені на основі фізичних та емпіричних моделей, і вони в основному базуються на статистичному аналізі існуючих подій реальних даних [18]. Американські вчені висунули модель Ротермела в 1972 році шляхом польових і лабораторних експериментів у поєднанні з законом збереження енергії. Модель Ротермела має в цілому 11 тестових параметрів, які використовуються для прогнозування швидкості та інтенсивності поширення пожежі. Незважаючи на те, що вона має складну структуру моделі та вимагає великих вхідних даних, вона широко використовується у моделюванні пожеж [19]. З розвитком дослідження моделей були запропоновані емпіричні моделі, включаючи модель Мак-Артура та CFRRS (Канадська система оцінки ризику пожежі), які також зараз широко використовуються.

Останнім часом застосування алгоритмічних моделей набуває все більшого поширення в галузі прогнозування лісових пожеж [20]. Наприклад, модель ARMA (авторегресійна ковзаюча середня) була використана для прогнозування та моделювання площі пошкодження лісовими пожежами, і було

виявлено, що лісові пожежі демонструють цикл спалаху [21]. Використовуючи дані про лісові пожежі в регіоні Daxinganling з 1990 по 2009 рік і на основі принципу SVM (машина опорних векторів), була отримана модель прогнозування ризику лісових пожеж для місцевих відділів лісового господарства [22]. Метод опорних векторів за методом найменших квадратів є вдосконаленим методом на основі SVM для прогнозування лісових пожеж з використанням історичних даних про лісові пожежі [23]. Для моделювання та прогнозування можливих причин лісових пожеж та аналізу взаємодії між цими можливими причинами також використовувалася Байєсова мережа [24]. Показано, що використання моделі зі схемою самонавчання має вищу точність, ніж модель без цієї схеми [25].

Крім того, безперервний розвиток моделей поширення вогню з 1970-х років сприяв появі та застосуванню програмного забезпечення моделювання зростання вогню, такого як Prometheus і Farsite, які є важливими інструментами управління пожежами для прогнозування майбутніх меж пожеж і пов'язану з цим поведінку при поширенні вогню.

Для динамічного моделювання просторово-часової еволюції складних систем добре підходять клітинні автомати, також вони застосовуються для відтворення еволюції природних явищ, таких як поширення епідемій і в екологічних та моделювання зростання міст [26].

Дослідження показали, що поширення лісових пожеж є складним процесом, пов'язаним з різними факторами. Факторами, які головним чином впливають на поширення лісових пожеж, є фактор горючих матеріалів, метеорологічний фактор і топографічний фактор, які є надто складними для аналізу за допомогою звичайних підходів і потребують моделювання паралельної обробки, евристики та інтелектуальних процесів мислення [27].

Висновок до розділу 4

Застосування дистанційного зондування обмежується областю, для якої створюється модель. Алгоритмічні моделі не мають цього обмеження, але вони рідко використовуються, оскільки такий детальний підхід вимагає, щоб вхідні дані були точними. Обчислення у цих моделях зазвичай повільні та надлишкові. Тому для реалізації найчастіше обирають напівемпіричні моделі. Для автоматизованого прогнозування швидкості розповсюдження лісової пожежі обираємо модель Ротермела.

РОЗДІЛ 5

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Проведемо аналіз найбільш вживаних моделей лісових пожеж. Розглянемо можливості та обмеження кожної моделі, а також порівняємо їхню продуктивність у різних сценаріях. Аналіз буде зосереджено на таких аспектах, як реалізація, особливості, області застосування, позитивні та негативні сторони.

5.1 Модель FLAMMAP

Модель FLAMMAP (Flame Length and Rate of Spread Model) – це програмне забезпечення для ПК, що працює лише в 64-бітній операційній системі Windows. FLAMMAP використовує інтерфейс користувача з графічним відображенням та наборами інструментів для введення даних, налаштування параметрів та візуалізації результатів.

FLAMMAP використовує фізичні та математичні моделі для прогнозування швидкості розповсюдження вогню та довжини полум'я в лісових масивах [28]. Модель враховує численні фактори, що впливають на поведінку вогню, такі як, тип та щільність палива. FLAMMAP класифікує та описує різні типи палива (трав'яний покрив, чагарники, ліс) та їх щільність. Модель враховує нахил, експозицію та інші особливості рельєфу, які впливають на динаміку вогню. FLAMMAP використовує дані про температуру, вологість повітря, швидкість вітру та інші метеорологічні параметри для моделювання впливу погоди на поведінку вогню. Модель враховує вологість палива, яка значно впливає на його горючість та швидкість розповсюдження вогню.

FLAMMAP може генерувати карти прогнозованої швидкості розповсюдження вогню, довжини полум'я та інших параметрів, що допомагає візуалізувати потенційну небезпеку та планувати заходи з гасіння.

Області застосування моделі FLAMMAP:

- планування лісового господарства – використовується для оцінки ризиків лісових пожеж, планування лісозахисних заходів та оптимізації лісового господарства,

- прогнозування поширення та поведінки лісових пожеж, що допомагає фахівцям з лісових пожеж планувати евакуацію, розподіляти ресурси та приймати тактичні рішення щодо гасіння,

- вивчення динаміки лісових пожеж, впливу різних факторів на їх поведінку та розробка нових методів прогнозування та гасіння.

Позитивні сторони: FLAMMAP має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та набори інструментів, що робить його доступним для фахівців з різним рівнем підготовки. Модель ґрунтується на фізичних принципах та наукових дослідженнях, що забезпечує її точність та надійність. FLAMMAP може моделювати різні типи лісових пожеж в широкому діапазоні умов навколишнього середовища.

Негативні сторони: FLAMMAP потребує детальних даних про тип та щільність палива, топографію, погоду та вологість палива для точного моделювання.

Модель має обмеження моделювання: вона не може враховувати всі фактори, що впливають на поведінку вогню, такі як вплив диму, зміни напрямку вітру та непередбачувані дії людини.

5.2 Модель FARSITE

Модель FARSITE (Fire Area Simulation Tool – інструмент для моделювання лісових пожеж) – це система моделювання поширення лісових пожеж, розроблена Службою лісів США. Вона використовується для прогнозування поведінки лісових пожеж та оцінки їх впливу на навколишнє середовище.

FARSITE – це фізична модель, яка враховує такі фактори, як топографія, тип рослинності, метеорологічні умови та дії з гасіння пожежі [29].

Модель FARSITE складається з декількох компонентів:

- модель поширення вогню, яка описує, як вогонь поширюється через різні типи рослинності. Її основа – це модифікована модель Rothermel, яка враховує такі фактори, як швидкість вітру, ухил, вологість палива та щільність палива,

- компонент моделювання погоди, яка прогнозує метеорологічні умови, що впливають на поведінку вогню. Її основа – це модель MC3, яка враховує такі фактори, як температура, вологість, швидкість вітру та напрямок вітру,

- компонент моделювання дій з гасіння пожежі, яка описує, як дії з гасіння пожежі впливають на поведінку вогню. Її основа – це модель BEHAVE, яка враховує такі фактори, як тип та метод гасіння пожежі, а також кількість та розміщення пожежних бригад.

FARSITE має ряд особливостей, які роблять її цінним інструментом для прогнозування та управління лісовими пожежами, головною з яких є висока точність. FARSITE є однією з найточніших моделей прогнозування лісових пожеж. Модель можна використовувати для моделювання лісових пожеж у широкому діапазоні умов, включаючи різні типи рослинності, метеорологічні умови та дії з гасіння пожежі. FARSITE має зручний інтерфейс користувача, який робить її доступною для широкого кола користувачів.

Області застосування моделі FARSITE:

- прогнозування поведінки лісових пожеж – FARSITE можна використовувати для прогнозування того, як лісова пожежа буде поширюватися, ґрунтуючись на поточних метеорологічних умовах та типі рослинності,

- планування дій з гасіння пожежі для максимального підвищення ефективності та безпеки,

- оцінка ризику лісових пожеж у певній місцевості,

– вивчення поведінки лісових пожеж та розробка нових методів прогнозування та управління ними.

Позитивні сторони: FARSITE є однією з найточніших моделей прогнозування лісових пожеж, доступних сьогодні. Її можна використовувати для моделювання лісових пожеж у широкому діапазоні умов, включаючи різні типи рослинності, метеорологічні умови та дії з гасіння пожежі. Модель має зручний інтерфейс користувача, який робить її доступною для широкого кола користувачів.

Негативні сторони: для користування моделлю FARSITE може знадобитися певний рівень експертизи та знань про пожежі та їхній вплив. Модель потребує точних вхідних даних, включаючи дані про паливо, метеорологічні умови та топографію, що може бути складним в деяких випадках.

5.3 Модель BehavePlus

Реалізація BehavePlus – це система моделювання поведінки вогню, розроблена Службою лісів США. Вона використовується для прогнозування того, як вогонь буде поширюватися та поводитися в різних умовах. BehavePlus – це фізична модель, яка враховує такі фактори, як топографія, тип рослинності, метеорологічні умови та дії з гасіння пожежі [30].

Модель BehavePlus складається з таких компонентів: компонент, що враховує вплив типів рослинності на поширення вогню – він враховує швидкість вітру, ухил, вологість палива та щільність палива; компонент, що враховує вплив метеорологічних умов на поведінку вогню – він враховує температуру, вологість, швидкість вітру та напрямок вітру; компонент, що враховує вплив дій з гасіння пожежі на поведінку вогню – він враховує методи гасіння пожежі, кількість та розміщення пожежних бригад.

BehavePlus є однією з найточніших моделей прогнозування спонтанних пожеж, доступних сьогодні. Її можна використовувати для моделювання пожеж

у широкому діапазоні умов, включаючи різну топологію, тип рослинності, метеорологічні умови та дії з гасіння пожежі.

Області застосування:

- прогнозування поведінки лісових пожеж,
- планування гасіння пожежі,
- вивчення поведінки лісових пожеж та розробка нових методів

прогнозування та управління ними.

Позитивні сторони: BehavePlus має точність, достатню для прогнозування лісових пожеж. BehavePlus має зручний інтерфейс користувача, який робить її доступною для широкого кола користувачів. BehavePlus безкоштовно доступна для публічного використання.

Негативні сторони: BehavePlus може бути складною для використання, особливо для початківців.

5.4 Модель WFDS

WFDS (Wildland Fire Dynamics Simulator) – це система моделювання пожежі, розроблена Центром досліджень лісових пожеж Університету Юти. Вона використовується для прогнозування поширення та поведінки пожеж у тривимірному просторі. WFDS – це модель, яка враховує такі фактори, як топографія, тип рослинності, метеорологічні умови, динаміка горіння та дії з гасіння пожежі [31].

Модель WFDS складається з декількох компонентів. Її основа – це модифікована модель Rothermel, яка враховує такі фактори, як швидкість вітру, ухил, вологість палива та щільність палива. Також модель MC3, яка враховує такі фактори, як температура, вологість, швидкість вітру та напрямок вітру. Модель моделювання динаміки горіння. Модель моделювання дій з гасіння пожежі, яка враховує такі фактори, як тип та метод гасіння пожежі, а також кількість та розміщення пожежних бригад.

WFDS може моделювати поширення вогню в тривимірному просторі, що робить її більш точною, ніж інші моделі, які обмежуються двовимірним моделюванням. WFDS може генерувати реалістичні візуалізації диких пожеж, що може допомогти у кращому розумінні їх поведінки.

Області застосування моделі WFDS:

- прогнозування того, як вогонь буде поширюватися та поводитися, ґрунтуючись на поточних метеорологічних умовах, типі рослинності та топографії,

- планування дій з гасіння пожежі для максимального підвищення ефективності та безпеки.

До позитивних особливостей слід віднести тривимірне моделювання: WFDS може моделювати поширення вогню в тривимірному просторі.

5.5 Модель Phoenix Rapidfire

Модель Phoenix Rapidfire реалізується у вигляді комп'ютерної програми, яка використовує дані про ландшафт, метеорологічні умови та інші фактори для прогнозування розповсюдження лісових пожеж. Вона може бути доступна як веб-сервіс або самостійний програмний продукт.

Phoenix Rapidfire спеціалізується на швидкому прогнозуванні розповсюдження лісових пожеж та видачі інформації для оперативного реагування [32]. Модель може використовувати актуальні дані про ландшафт та метеорологічні умови для більш точних прогнозів. Phoenix Rapidfire може бути використана для оперативного прогнозування розповсюдження вогню та видачі інформації для екстреного реагування на пожежу. Модель може допомагати визначити оптимальні стратегії для боротьби з пожежами та захисту екосистем та майна.

Позитивні сторони: модель дозволяє швидко отримувати прогнози розповсюдження пожежі, що робить її корисною для оперативного управління

пожежами. Phoenix Rapidfire може використовувати актуальні дані для більш точних прогнозів.

Негативні сторони: швидкість прогнозування може бути досягнута за рахунок спрощень у моделюванні, що може призвести до менш точних результатів порівняно зі складнішими моделями. Модель може бути менш гнучкою або не мати всіх функцій, які присутні в складніших програмах моделювання пожеж.

5.6 Модель Rothermel

Модель Rothermel реалізується через математичні рівняння, які враховують фізичні процеси, що відбуваються під час розповсюдження лісових пожеж. Ці рівняння враховують такі фактори, як тип палива, його вологість, щільність, швидкість вітру, температуру повітря, вологість та топографічні особливості ландшафту [33].

Модель Rothermel базується на фізичних принципах та експериментальних даних, що робить її досить точною в прогнозуванні розповсюдження лісових пожеж. Вона враховує широкий спектр факторів, включаючи характеристики палива, метеорологічні умови та топографію місцевості.

Області застосування: прогнозування швидкості розповсюдження вогню в лісових масивах; оцінка інтенсивності лісових пожеж та їхніх наслідків; планування стратегій протидії лісовим пожежам та управління ними.

Позитивні сторони: модель Rothermel базується на фізичних принципах та експериментальних даних, що робить її досить точною в прогнозуванні розповсюдження лісових пожеж. Модель враховує багато різних факторів, що впливають на розповсюдження вогню, що робить її досить повною.

Негативні сторони: модель вимагає точних вхідних даних про характеристики палива, метеорологічні умови та топографію, що може бути складно отримати в деяких випадках.

5.7 Порівняння моделі Rothermel з іншими моделями

FLAMMAP має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та набори інструментів, але потребує детальних даних про тип та щільність палива, топографію, погоду та вологість палива для точного моделювання.

FARSITE є однією з найточніших моделей прогнозування лісових пожеж, доступних сьогодні, але потребує певного рівня експертизи та знань про пожежі та їхній вплив.

BehavePlus має точність достатню для прогнозування лісових пожеж, але може бути складною для використання, особливо для початківців.

WFDS може моделювати поширення вогню в тривимірному просторі, що робить її більш точною, ніж інші моделі, які обмежуються двовимірним моделюванням, але вона може бути складною для використання та потребує значних обчислювальних ресурсів.

Phoenix Rapidfire дозволяє швидко отримувати прогнози розповсюдження пожежі, але може бути менш точним, ніж інші моделі.

Висновок до розділу 5

Проаналізовано найбільш вживані моделі лісових пожеж, звертаючи увагу на їхні можливості та обмеження. Описано унікальні характеристики кожної моделі, такі як врахування кліматичних чинників, рельєфних особливостей або інших факторів. Визначено сфери, в яких кожна модель може бути найбільш ефективною, наприклад, прогнозування ризику пожеж, виявлення та моніторинг існуючих пожеж, чи розробка стратегій протидії. Виділено переваги кожної моделі, такі як точність прогнозування, швидкість реакції на нові дані, чи здатність до адаптації до різних умов. Виявлено обмеження та недоліки кожної моделі, такі як вимоги до обчислювальних ресурсів, обмежена область застосування, чи недостатня точність в певних сценаріях.

Для програмної реалізації обрано модель Rothermel, як найбільш придатну модель, оскільки вона є однією з найбільш широко використовуваних моделей у прогнозуванні поведінки лісових пожеж. Її велика популярність базується на кількох ключових факторах. Ця модель має високу точність у визначенні швидкості та напрямку розповсюдження пожежі, що дозволяє ефективно планувати та виконувати протипожежні заходи. Також, модель Rothermel враховує широкий спектр факторів, включаючи географічні та кліматичні особливості, що дозволяє застосовувати її в різних умовах.

РОЗДІЛ 6

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ РОТЕРМЕЛА

Модель поширення лісової пожежі відноситься до математичної моделі, створеної зі спрощеними умовами без впливу на точність моделі. Ця модель може допомогти виявити кількісний зв'язок між різними факторами, які впливають на швидкість розповсюдження пожежі. Поширення лісового вогню є процесом взаємодії між факторами, які описують горючі речовини, клімат та рельєф місцевості.

Модель Ротермела є математичною моделлю, заснованою на теорії і досвіді експерименту з лісовими пожежами. З урахуванням закону збереження енергії ця модель може вивести рівняння середньої температури в процесі теплового випромінювання від ґрунту пожежі. Потім у поєднанні з фізичними параметрами отримано швидкість поширення вогню (ROS).

Перевага моделі Ротермела полягає в тому, що вона одночасно враховує процес фронтального поширення вогню і безперервне горіння в зоні горіння. Оскільки ця модель описує поширення лісових пожеж у макромасштабі то параметри паливного пласта і рельєфу повинні безперервно розподілятися і безперервно змінюватися в просторі, а параметри середовища не можуть змінюватися занадто швидко. В якості основних параметрів в цю модель вводяться маса, площа поверхні, об'єм висушеної горючої речовини, вологість горючої речовини, швидкість вітру, напрямок вітру, рельєф місцевості, ухил.

6.1 Визначення залежності швидкості поширення пожежі від навантаження паливом, швидкості вітру та нахилу місцевості

Розглянемо спрощений варіант моделі Ротермела. Послідовність розрахунку швидкості розповсюдження вогню (ROS) з використанням вхідних даних і формул (6.1-6.7), що наведені у функції ROS [34].

1. Обчислення площ для мертвого та живого палива:

$$a_{dead} = \frac{s[0] \cdot w[0]}{rho_p},$$

$$a_{live} = \frac{s[1] \cdot w[1]}{rho_p}. \quad (6.1)$$

2. Обчислення загальної площі:

$$a_{tot} = a_{dead} + a_{live}. \quad (6.2)$$

3. Обчислення характеристичної площі поверхні до об'єму (sigma_tot):

$$\sigma_{tot} = \frac{a_{dead} \cdot s[0] + a_{live} \cdot s[1]}{a_{tot}}. \quad (6.3)$$

4. Обчислення коефіцієнта вітру (fw).

Розрахунок параметрів C, B, E:

$$C = 7,47 \cdot e^{-0,133 \cdot \sigma_{tot}^{0.55}},$$

$$B = 0,02526 \cdot \sigma_{tot}^{0.54},$$

$$E = 0,715 \cdot e^{-3,59 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{tot}}. \quad (6.4)$$

Обчислення fw:

$$f_w = C \cdot (wind_speed^B) \cdot (rpr^{-E}). \quad (6.5)$$

5. Обчислення коефіцієнта нахилу (fs):

$$f_s = 5,275 \cdot slope^2. \quad (6.6)$$

6. Обчислення швидкості розповсюдження вогню (ROS):

$$r = \frac{0,3048 \cdot 0,1893 \cdot \sigma_{tot}^{1,5} \cdot (1 + f_w + f_s)}{\rho_{hop}}. \quad (6.7)$$

Вхідними параметрами моделі є:

- w – навантаження паливом (fuel loading), тобто кількості палива на одиницю площі ($\text{кг}/\text{м}^2$);
- s – площа поверхні до об'єму (surface area-to-volume ratio), тобто відношення площі поверхні палива до його об'єму ($\text{м}^2/\text{м}^3$);
- slope – нахил місцевості [%];
- u середня швидкість вітру [$\text{м}/\text{с}$];
- grg – відношення швидкості розповсюдження вогню до швидкості вітру.

У моделі Ротермела вектори w і s містять дві компоненти для різних типів палива: мертва (dead) та жива (live).

Таким чином, послідовність розрахунку включає в себе обчислення площ палива, характеристичної площі поверхні до об'єму, коефіцієнта вітру, коефіцієнта нахилу та, нарешті, швидкості розповсюдження вогню (ROS).

В програмній реалізації будемо використовувати наступні позначення.

1. Обчислення площ для мертвого та живого палива:

- $s[0]$ – площа для мертвого палива, вказана як один з елементів списку s ,
- $w[0]$ – вага для мертвого палива, вказана як один з елементів списку w ,
- $s[1]$ – площа для живого палива, вказана як другий елемент списку s ,
- $w[1]$ – вага для живого палива, вказана як другий елемент списку w ,
- ρ_{hop} – повітряна густина палива, яка становить $32 \text{ кг}/\text{м}^3$ (передбачено в кодї).

2. Обчислення загальної площі:

- a_{dead} – площа для мертвого палива, перерахована в кількість квадратних метрів відповідно до ваги і площі,

– a_{live} – площа для живого палива, перерахована в кількість квадратних метрів відповідно до ваги і площі,

– a_{tot} – загальна площа, яка складається з суми площ для мертвого та живого палива.

3. Обчислення характеристичної площі поверхні до об'єму (σ_{tot}):

– σ_{tot} – відношення загальної площі поверхні до об'єму до загальної площі.

Виражає структуру покриву.

4. Обчислення коефіцієнта вітру (f_w):

– $wind_speed$ – швидкість вітру (м/с), передбачена як вхідний параметр функції,

– ρ_r – відносна густина палива, передбачена як вхідний параметр функції.

5. Обчислення коефіцієнта нахилу (f_s):

– $slope$ – нахил, передбачений як вхідний параметр функції.

6. Обчислення швидкості розповсюдження вогню (ROS):

– ρ_{ob} – насипна густина, яка обчислюється як сума ваг мертвого і живого палива,

– r – швидкість розповсюдження вогню (м/с), яка обчислюється за допомогою попередньо обчислених значень та формул.

Програмна реалізація представленого алгоритму приведена в Додатку А.

Для оцінки впливу різних факторів на швидкість розповсюдження вогню перейдено до нормалізованих вхідних даних і нормалізованих результатів швидкості розповсюдження.

Для нормалізації вхідних параметрів було використано наступний підхід.

Вхідні вектори w (навантаження паливом) та s (площа поверхні до об'єму) були нормалізовані шляхом поділу на їх загальну суму. Це забезпечує, що сума всіх елементів вектора буде рівна 1, що робить їх безрозмірними. Нормалізовані значення векторів w_{norm} та s_{norm} отримані таким чином, щоб їх сума дорівнювала 1.

Для нахилу місцевості та середньої швидкості вітру було використано відношення до їх максимальних можливих значень. Наприклад, якщо максимальний нахил місцевості становить 100 %, а максимальна швидкість вітру 100 м/с, то значення для нормалізації можуть бути вибрані відповідно до цих максимальних значень. Таким чином, якщо нахил місцевості складає 10 %, відповідне нормалізоване значення буде 0,1. Те ж саме стосується і швидкості вітру.

Ці підходи забезпечують безрозмірність вхідних параметрів, що дозволяє отримувати безрозмірні результати швидкості розповсюдження вогню.

Щоб розрахувати швидкості пожежі для різних значень $w_norm[0]$ та $w_norm[1]$ від 0 до 1, потрібно провести ітерацію по цих значеннях та обчислити швидкості пожежі для кожного випадку.

Залежність швидкості поширення пожежі від зміни співвідношень живого та мертвого палива наведена на рисунку 6.1.

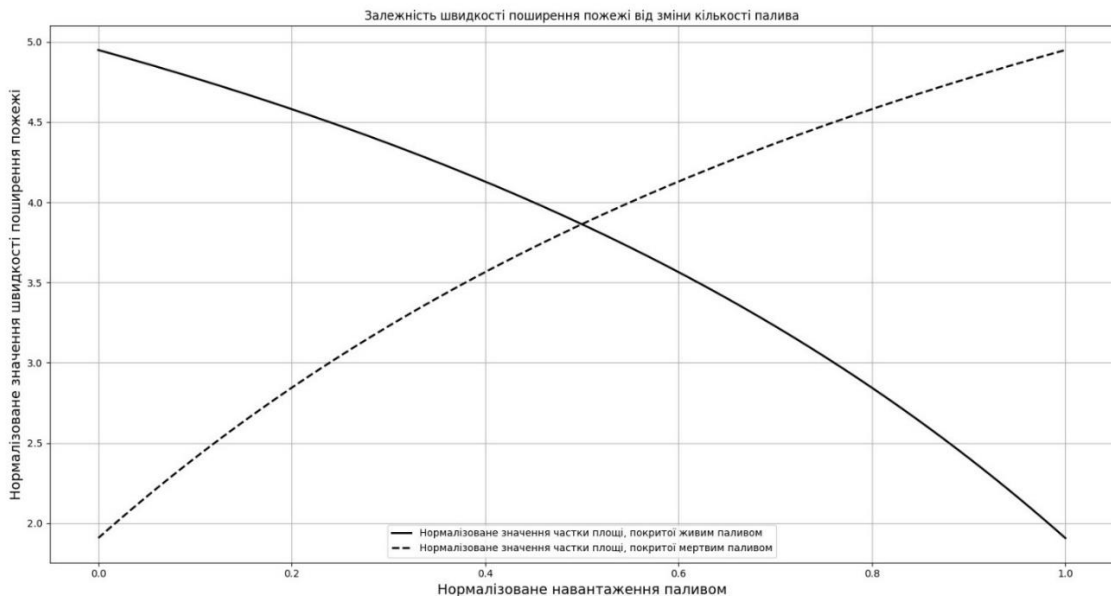


Рисунок 6.1 – Залежність швидкості поширення пожежі від зміни співвідношень живого та мертвого палива

Таким чином, при зростанні кількості живого палива (що може вказувати на підвищення вологості або інші фактори, які сприяють збереженню живих

рослин), швидкість розповсюдження пожежі зменшується. Це пов'язано з тим, що живі рослини мають велику вологу, яка утримує вогонь від поширення.

І навпаки, якщо зростає кількість мертвого палива, швидкість розповсюдження пожежі збільшується. Це пов'язано з тим, що мертві матеріали, такі як опале листя або сухі гілки, швидше горять і сприяють поширенню вогню.

Ці зміни відбуваються при стабільній загальній кількості живого та мертвого палива, що може означати, що зміни у швидкості розповсюдження пожежі викликані саме змінами у частці площі, покритої цими видами палива.

Таким чином, отримані результати відповідають логіці моделі Ротермела і можуть бути використані для прогнозування швидкості розповсюдження пожежі відповідно до змін кількості живого та мертвого палива при незмінних інших умовах.

Для дослідження впливу середньої швидкості вітру будемо змінювати її нормалізоване значення від 0 до 1 і обчислимо швидкість розповсюдження пожежі при трьох співвідношеннях мертвого і живого палива: 1) 0,8 до 0,2; 2) 0,5 до 0,5; 3) 0,2 до 0,8. Результати дослідження наведені на рисунку 6.2.

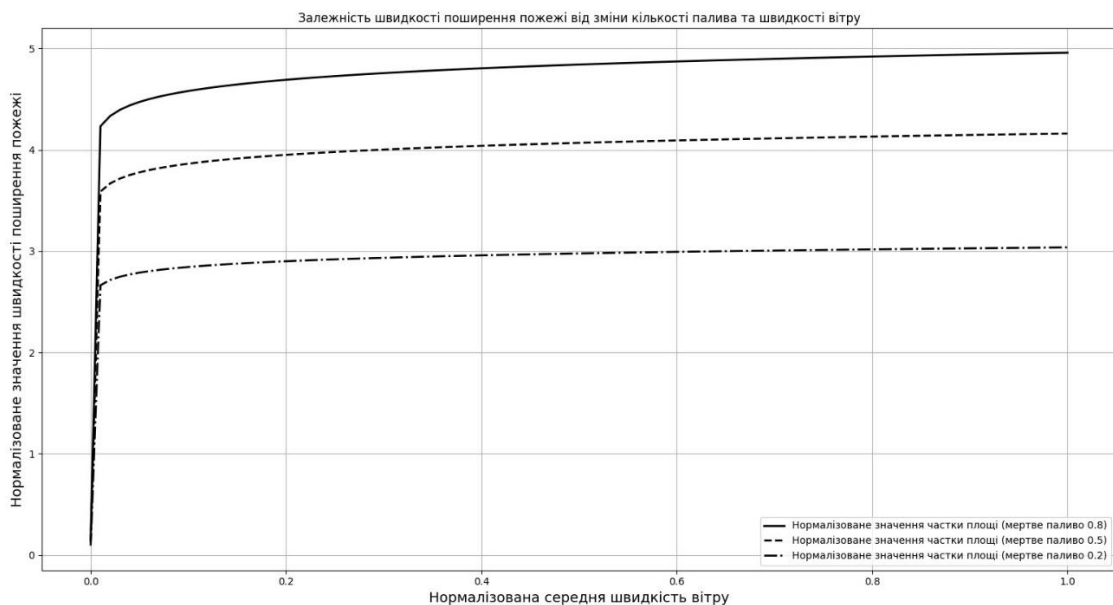


Рисунок 6.2 – Залежність швидкості поширення пожежі від зміни середньої швидкості вітру при різних співвідношеннях навантаження паливом

Мертве паливо: 80 %, живе паливо: 20 %.

При низьких значеннях нормалізованої середньої швидкості вітру (близько 0) нормалізована швидкість поширення пожежі становить близько 0,16. Зі зростанням швидкості вітру вона також зростає, досягаючи близько 4,96 при максимальній швидкості вітру (приблизно 1). Нормалізована швидкість поширення пожежі збільшується зі зростанням нормалізованої середньої швидкості вітру. Це свідчить про те, що в цьому випадку живе паливо досить ефективно гасить пожежу, але чим сильніший вітер, тим менший цей ефект.

Мертве паливо: 50 %, живе паливо: 50 %.

При низьких значеннях нормалізованої середньої швидкості вітру (близько 0) нормалізована швидкість поширення пожежі становить близько 0,13. Зі зростанням швидкості вітру вона також зростає, досягаючи близько 4,14 при максимальній швидкості вітру (приблизно 1). Спостерігаємо зростання нормалізованої швидкості поширення пожежі зі зростанням нормалізованої середньої швидкості вітру. Проте цей ефект менш виражений, що може свідчити про більш рівномірне розподілення палива, яке сприяє меншій схильності до швидкого поширення пожежі.

Мертве паливо: 20 %, живе паливо: 80 %.

При низьких значеннях нормалізованої середньої швидкості вітру (близько 0) нормалізована швидкість поширення пожежі становить близько 0,09. Зі зростанням швидкості вітру вона також зростає, досягаючи близько 3,01 при максимальній швидкості вітру (приблизно 1). Нормалізована швидкість поширення пожежі найменша, що свідчить про те, що в цьому випадку живе паливо ефективно гасить пожежу, навіть при сильному вітрі.

Розглянемо залежність швидкості поширення пожежі від зміни розподілу палива та нахилу місцевості. Будемо змінювати нормалізований показник нахилу від 0 до 1 і обчислимо швидкість розповсюдження пожежі для трьох варіантів, як і в попередній моделі. Результати дослідження наведені на рисунку 6.3.

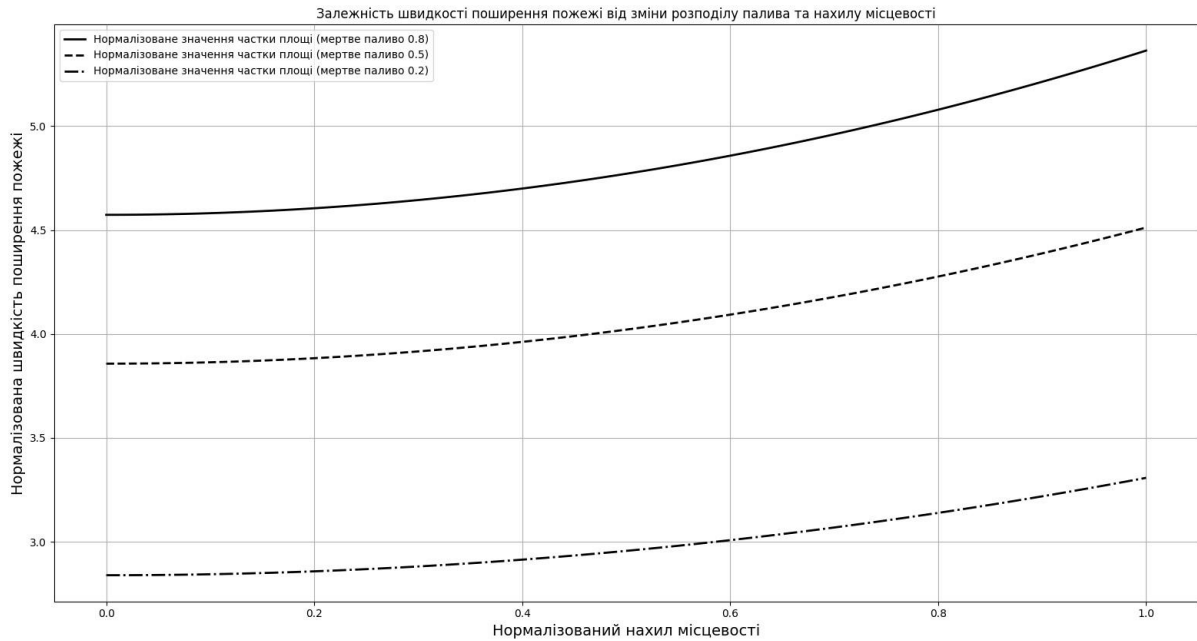


Рисунок 6.3 – Залежність швидкості поширення пожежі від нахилу місцевості при різних співвідношеннях навантаження паливом

На графіках можна помітити, що зі збільшенням нахилу місцевості (від 0 до 1) швидкість поширення пожежі також збільшується для усіх трьох рівнів мертвого палива (0,2; 0,5; 0,8). Проте цей ефект найбільш помітний для вищих рівнів мертвого палива.

Щодо зміни розподілу палива, можна спостерігати, що при зменшенні частки мертвого палива (від 0,8 до 0,2) швидкість поширення пожежі також зменшується для всіх рівнів нахилу місцевості.

Це може бути пояснено тим, що більша нахилена місцевість сприяє швидшому поширенню пожежі через підвищення вентиляції, а високий вміст мертвого палива збільшує швидкість горіння, що сприяє швидкому розповсюдженню вогню.

6.2 Базова модель Ротермела розповсюдження вогню

Базова модель Ротермела призначена для прогнозування швидкості вогню, з урахуванням погодних умов, місцевого рельєфу та властивостей матеріалів [33].

Ця модель ґрунтується на таких рівняннях (формули 6.8-6.9):

$$ROS = \frac{I_R \cdot \xi \cdot (1 + \varphi_w \cdot \varphi_\sigma)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}, \quad (6.8)$$

де ROS – швидкість вогню (м/с),

I_R – інтенсивність реакції (кДж/хв·м²),

ξ – відстань поширення пожежі,

φ_w – коефіцієнт вітру,

φ_σ – фактор нахилу,

ρ_b – суха масова густина (кг/м³),

ε – ефективний індекс нагрівання (безрозмірний),

Q_{ig} – тепло попереднього займання (кДж/кг).

$$I_b = h \cdot w \cdot \frac{R}{60}, \quad (6.9)$$

де I_b – розмір пожежного фронту, який описує кількість енергії, що випромінюється на одиницю довжини фронту пожежі (кВт/м),

h – кількість палива,

w – вага палива (кг/м²), яке вигоріло в зоні пожежі, на одиницю площі,

$R/60$ – швидкість, з якою вогонь розповсюджується протягом певного періоду часу (м/сек).

Алгоритм базової моделі Ротермела для моделювання поширення пожежі та розрахунок швидкості поширення вогню (ROS) на основі вхідних параметрів, таких як вологість, вага палива, нахил, швидкість вітру тощо складається з наступних етапів.

1. Перевірка вхідних даних:

- перевірити, чи m містить значення в діапазоні 0-100;
- перевірити, чи $w, s, h, \text{delta}, m_{x_dead}$ містять значення > 0 ;
- перевірити, чи не є вологість трав'янистих палив нижчою 30 %.

2. Обчислення допоміжних величин.

А. Перенесення частково висушених трав'янистих палив у категорію мертвого палива:

- визначити індекси рядків, де вологість трав'янистих палив знаходиться в діапазоні 0,3-1,2;
- розрахувати частку висушених трав'янистих палив (kt);
- перенести вагу та площу висушених трав'янистих палив до мертвого палива;
- оновити площу поверхні трав'янистих палив.

Б. Розрахунок характеристик палива:

- долі площ та їх ваги (f);
- зважені частки площі (f_{dead}, f_{live});
- чисті (зважені) навантаження паливом (wn);
- зважена вологість палива (mf_{dead}, mf_{live});
- зважене відношення поверхні до об'єму ($\sigma_{dead}, \sigma_{live}, \sigma_{tot}$);
- зважена теплоємність (h_{dead}, h_{live});
- середнє відношення заповненості (β).

В. Обчислення допоміжних параметрів:

- відношення живого до мертвого палива (W);
- середня вологість палива (m_{fpd});

- максимальна вологість живого палива (m_{x_live});
- коефіцієнти згасання (n_s , n_{m_dead} , n_{m_live});
- оптимальне відношення заповненості (β_{op});
- відносне відношення заповненості (r_{pr});
- максимальна швидкість реакції (γ_{max});
- інтенсивність реакції мертвого та живого палива (sum_dead , sum_live);
- коефіцієнт для розрахунку інтенсивності реакції (A);
- інтенсивність реакції (i_{r_dead} , i_{r_live} , i_r);
- коефіцієнти розповсюдження (χ_i);
- коефіцієнт вітру (f_w);
- коефіцієнт нахилу (f_s);
- щільність палива (ρ_{hob});
- тепловий потік (q_{ig});
- тепловий стік (ϵ_p).

3. Розрахунок ROS:

- r : вектор ROS, який розраховується за формулою (6.8).

4. Повернення результатів.

Словник, що містить інформацію про:

- характерну вологість мертвого та живого палива;
- вологість живого палива на момент згасання;
- характеристику SAV;
- насипну густину;
- коефіцієнт пакування;
- відносний коефіцієнт пакування;
- інтенсивність реакції мертвого, живого та загального палива;
- коефіцієнт вітру;
- коефіцієнт нахилу;
- джерело тепла;

- тепловіддачу:
- швидкість розповсюдження вогню ROS.

Представимо алгоритм згідно двох складових моделі Ротермела (джерела тепла та тепловіддача).

До джерел тепла входять параметри, що визначають кількість енергії, яка виділяється під час горіння палива та вплив факторів, таких як вітер та нахил місцевості.

До тепловіддачі входять параметри, що визначають кількість тепла, яка передається навколишньому середовищу під час горіння палива.

До джерела тепла відноситься розрахунок інтенсивності реакції (ir_dead та ir_live) для мертвого та живого палива. На основі інтенсивності реакції та інших параметрів розраховується тепловий потік (q_{ig}). Інтенсивність реакції (ir) – сумарна кількість енергії, що виділяється під час горіння всього палива на одиницю площі. Коефіцієнт вітру (fw) – фактор, який враховує вплив вітру на розповсюдження вогню. Коефіцієнт нахилу (fs) – фактор, який враховує вплив нахилу місцевості на розповсюдження вогню.

Тепловіддача складається з кількості тепла, яка передається навколишньому середовищу під час горіння палива на одиницю об'єму ($\rho_{hob} \cdot \epsilon$).

6.3 Вхідні дані моделі та їх можливі значення

A) w вектор або таблиця навантаження паливом [т/га] для класів палива: 1-годинний, 10-годинний, 100-годинний, живі трави та жива деревина відповідно (5 значень або стовпців; 0, якщо клас палива відсутній).

Розшифруємо ці класи палива.

1. 1-годинний клас палива: включає матеріали, які легко загоряються і можуть швидко поширювати вогонь, такі як сухі гілки, листя тощо. Навантаження паливом для цього класу вимірюється у тоннах на гектар.

2. 10-годинний клас палива: включає матеріали, які трохи товстіші або менш легко вогнезахисні, ніж матеріали 1-годинного класу. Також вимірюється у тоннах на гектар.

3. 100-годинний клас палива: охоплює матеріали, які трохи щільніші або менш вогнезахисні, ніж попередні класи. Вони можуть горіти повільніше, але все ще вважаються значним джерелом пожежної небезпеки.

4. Живі трави та жива деревина: включає живі рослини, такі як трава і молоді дерева. Їх навантаження паливом також вимірюється у тоннах на гектар.

Якщо значення для певного класу палива дорівнює 0, це означає, що цей клас палива відсутній або відсутні дані про навантаження паливом для цього класу в даному контексті.

Нижче наведені приклади даних для кожного класу палива, які представлені у вигляді вектора або таблиці навантаження паливом [т/га]:

- 1) 1-годинний клас палива: 5 т/га,
- 2) 10-годинний клас палива: 8 т/га,
- 3) 100-годинний клас палива: 10 т/га,
- 4) живі трави: 3 т/га,
- 5) жива деревина: 15 т/га.

В) s вектор або таблиця відношення поверхні до об'єму [$\text{м}^2/\text{м}^3$] для класів палива 1-годинний, 10-годинний, 100-годинний, живі трави та жива деревина відповідно (5 значень або стовпців; 0, якщо клас палива відсутній).

Розшифруємо ці класи палива в контексті відношення поверхні до об'єму.

1. 1-годинний клас палива: включає матеріали, які мають велику поверхню відносно їх об'єму і можуть швидко піддаватися нагріванню та горінню.

2. 10-годинний клас палива: матеріали цього класу можуть мати менше відношення поверхні до об'єму, ніж матеріали 1-годинного класу, що робить їх менш вразливими до швидкого загоряння.

3. 100-годинний клас палива: включає матеріали зі значно меншим відношенням поверхні до об'єму, ніж попередні класи, і, отже, вони можуть бути менш схильними до швидкого горіння.

4. Живі трави та жива деревина: живі рослини можуть мати різні відношення поверхні до об'єму залежно від їхньої структури та типу. Наприклад, молода трава може мати велику поверхню відносно її об'єму, тоді як деревина може мати менше відношення поверхні до об'єму через свою щільнішу структуру.

Приклад даних для кожного класу:

- 1) 1-годинний клас палива: $2 \text{ м}^2/\text{м}^3$,
- 2) 10-годинний клас палива: $1,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$,
- 3) 100-годинний клас палива: $1 \text{ м}^2/\text{м}^3$,
- 4) живі трави: $3 \text{ м}^2/\text{м}^3$,
- 5) жива деревина: $0,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

C) Δ значення або вектор глибини паливного ложа [см].

Глибина паливного ложа – це міра товщини шару горючих матеріалів (наприклад, сухої трави, опалого листя, гілок, сухих гілок тощо), який накопичується на поверхні ґрунту або на підстилці в екосистемі. Цей шар матеріалів стає потенційним джерелом пожежі, оскільки може легко загорітися та поширювати вогонь:

- 1) 1-годинний клас палива: 5 см,
- 2) 10-годинний клас палива: 10 см,
- 3) 100-годинний клас палива: 15 см,
- 4) живі трави: 3 см,
- 5) жива деревина: 20 см.

D) m_x .dead значення або вектор вологості мертвого палива при гасінні [відсотків].

Чим вища вологість, тим менша ймовірність швидкого розповсюдження вогню, оскільки вода допомагає стримувати пожежу.

Для вектора вологості мертвого палива при гасінні, який вимірюється у відсотках, можна навести такі дані:

- 1) 1-годинний клас палива: 15 % вологості,
- 2) 10-годинний клас палива: 18 % вологості,
- 3) 100-годинний клас палива: 20 % вологості,
- 4) живі трави: 25 % вологості,
- 5) жива деревина: 22 % вологості.

Е) h вектор або таблиця тепловмісткості [кДж/кг] для класів палива 1-годинний, 10-годинний, 100-годинний, живі трави та жива деревина відповідно (5 значень або стовпців; 0, якщо клас палива відсутній).

Тепловмісткість вказує на кількість теплоти, яку може виділити один кілограм палива при його повному згорянні. Такі дані вимірюються у кілоджоулях на кілограм (кДж/кг). Отже, h вектор або таблиця тепловмісткості для різних класів палива може надати інформацію про кількість енергії, яку може виділити один кілограм палива під час згорання.

Існують загальні тенденції щодо тепловмісткості для різних типів палива. Наприклад, жива деревина, яка має високу густину та вміст смол, часто має високу тепловмісткість. Сухіші та тонші матеріали, такі як трави або сухе опале листя, зазвичай мають меншу тепловмісткість.

І хоча в цьому переліку немає жорстких меж для кожного класу щодо значень тепловмісткості, можна вважати, що низькі значення тепловмісткості можуть вказувати на швидше вигорання палива, тоді як високі значення можуть вказувати на повільніше горіння або велику віддачу тепла.

Наприклад, дані для кожного класу палива можуть виглядати так:

- 1) 1-годинний клас палива: 20 кДж/кг,
- 2) 10-годинний клас палива: 18 кДж/кг,
- 3) 100-годинний клас палива: 16 кДж/кг,
- 4) живі трави: 15 кДж/кг,
- 5) жива деревина: 22 кДж/кг.

F) m вектор або відсоткова таблиця вологості на суху масу для класів палива 1-годинний, 10-годинний, 100-годинний, живі трави та жива деревина відповідно (5 значень або стовпців; 0, якщо клас палива відсутній).

Відсоткова вологість на суху масу для різних класів палива вказує на частку вологи у вагових одиницях відносно сухої маси палива. Наприклад, якщо ми маємо 10 кг деревини з вологостю 20 % від сухої маси, це означає, що 2 кг з цих 10 кг – це волога, а 8 кг – це суха деревина.

Чим вища вологість, тим менше енергії буде виділено під час горіння, оскільки частина енергії буде використовуватися на випаровування води.

Ось приклади відсоткових значень вологості для кожного класу палива:

- 1) 1-годинний клас палива: 10 % вологості,
- 2) 10-годинний клас палива: 12 % вологості,
- 3) 100-годинний клас палива: 15 % вологості,
- 4) живі трави: 20 % вологості,
- 5) жива деревина: 30 % вологості.

G) u значення або вектор середньої швидкості вітру на середній висоті вогню [км/год].

Значення або вектор середньої швидкості вітру на середній висоті вогню вказує на середню швидкість вітру на певній висоті над поверхнею землі. Ця інформація є важливою для оцінки поведінки пожежі, оскільки вітер може впливати на швидкість та напрямок розповсюдження вогню.

Наприклад, якщо середня швидкість вітру на середній висоті вогню дорівнює 20 км/год, це означає, що повітря рухається зі швидкістю 20 км за годину на висоті, на якій зазвичай знаходиться огонь.

H) $slope$ значення або вектор нахилу місцевості [відсотків].

Значення або вектор нахилу місцевості вимірюється у відсотках і вказує на кут нахилу поверхні землі.

Наприклад, якщо нахил місцевості дорівнює 10 %, це означає, що на кожні 100 метрів горизонтальної відстані висота змінюється на 10 метрів. Більш

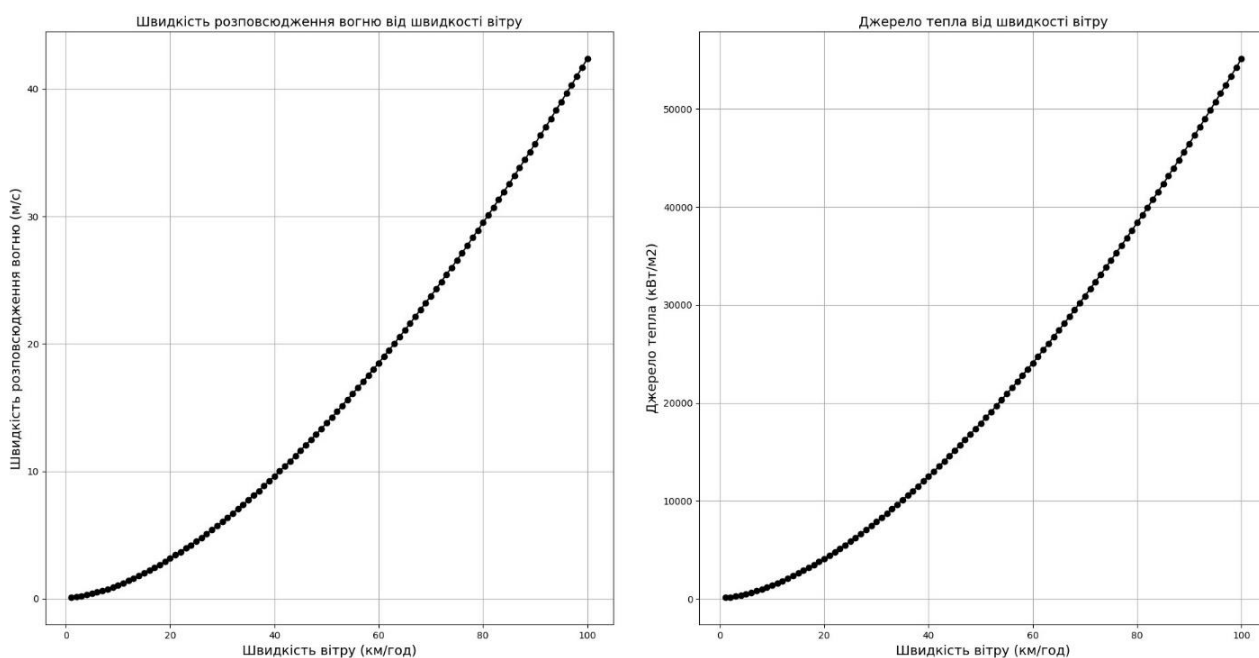
високий нахил може сприяти швидшому розповсюдженню пожежі, особливо якщо вітер додає енергії горінню.

Повний код базової моделі Ротермела наведено у Додатку Б.

Отримаємо залежності швидкості розповсюдження полум'я від різних факторів для наступних вхідних даних.

Вектор навантаження паливом [т/га] для класів палива відповідно – [2; 1; 0,5; 3; 8]. Вектор відношення поверхні до об'єму [$\text{м}^2/\text{м}^3$] для класів палива – [5600, 358, 98, 6200, 8000]. Значення глибини паливного ложа [см] – 50. Значення вологості мертвого палива при гасінні [відсотків] – 30. Вектор тепловмісткості [кДж/кг] для класів палива – [18622, 18622, 18622, 19500, 20000]. Вектор вологості на суху масу для класів палива [відсотків] – [7, 8, 9, 40, 60]. Значення нахилу місцевості [відсотків] – 10. Значення швидкості вітру будемо змінювати в циклі від 1 до 100 км/год.

Результати дослідження залежності швидкості розповсюдження вогню та джерела тепла від швидкості вітру наведені на рисунку 6.4.



а)

б)

Рисунок 6.4 – Залежності швидкості розповсюдження вогню та джерела тепла від швидкості вітру

Залежності швидкості розповсюдження вогню від швидкості вітру показують, як змінюється швидкість розповсюдження вогню при різних швидкостях вітру. Значення подані в метрах на секунду і відображають очікувану швидкість розповсюдження вогню при швидкості вітру від 1 до 100 км/год. Ці значення демонструють, що зі збільшенням швидкості вітру швидкість розповсюдження вогню також зростає. Наприклад, при 10 км/год вогонь може розповсюджуватися зі швидкістю близько 3,42 м/с, але при 50 км/год швидкість розповсюдження може досягати 17,532 м/с.

Залежності джерела тепла від швидкості вітру – починаючи з найнижчих значень швидкості вітру спостерігається поступове зростання інтенсивності пожежі. Наприклад, при 1 км/год інтенсивність пожежі становить 109,39, а при 10 км/год вже 1384,25. Цей тренд зростання продовжується зі збільшенням швидкості вітру.

З цих даних можна виокремити два ключові аспекти: по-перше, існує досить значна залежність між швидкістю вітру та інтенсивністю пожежі, що вказує на вплив погодних умов на ризик виникнення та розвитку пожеж; по-друге, ця залежність не лінійна, але дещо експоненційна: інтенсивність пожежі зростає швидше зі збільшенням швидкості вітру.

Результати дослідження залежності швидкості розповсюдження вогню від швидкості вітру за різних нахилів місцевості наведені на рисунку 6.5.

Для нахилу 5 % спостерігається найменше зростання швидкості розповсюдження вогню при збільшенні швидкості вітру. У той же час, для нахилу 60 % спостерігається більше зростання швидкості розповсюдження вогню при збільшенні швидкості вітру. Для нахилів 15 %, 30 % і 45 % спостерігається проміжне зростання швидкості розповсюдження вогню при збільшенні швидкості вітру, що вказує на те, що кут нахилу має певний вплив на взаємодію вітру та розповсюдження вогню, але цей вплив не є таким значущим, як для низьких або високих нахилів.

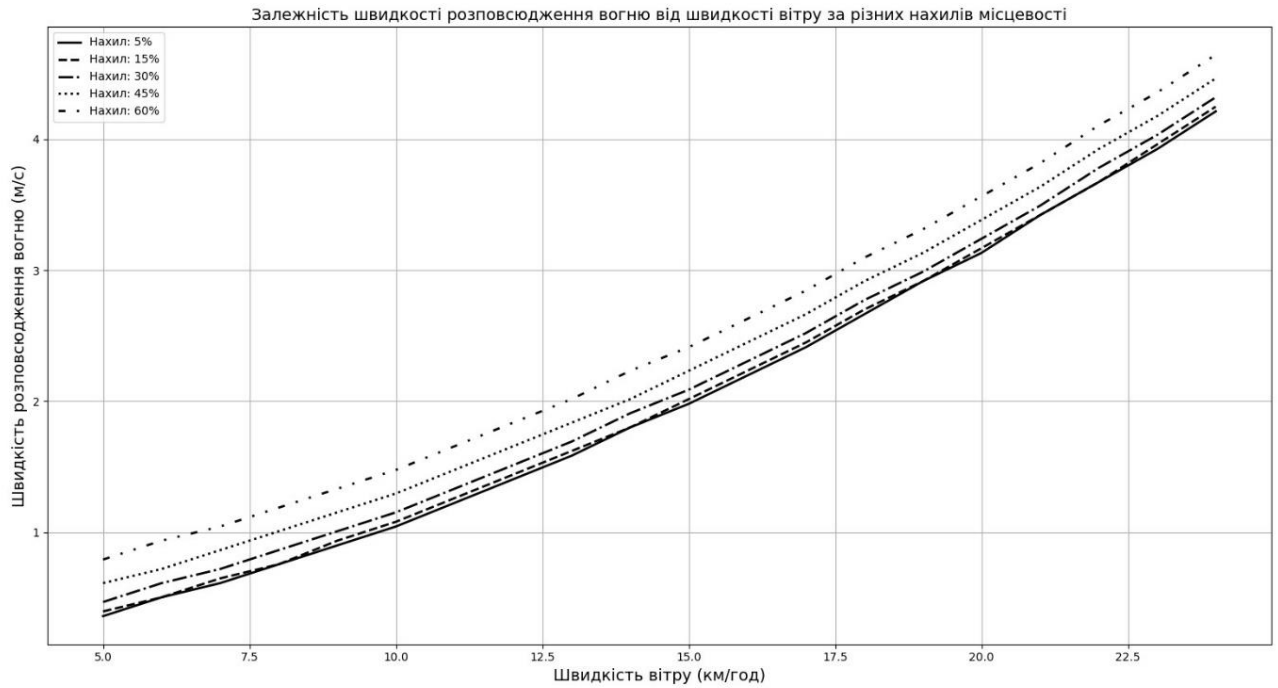


Рисунок 6.5 – Залежність швидкості розповсюдження вогню від швидкості вітру за різних нахилів місцевості

Середні значення швидкості розповсюдження вогню для кожного нахилу місцевості становлять: 2,037; 2,064; 2,418; 2,520; 2,996 (м/с). Середнє значення швидкості розповсюдження вогню збільшується зі зростанням нахилу місцевості на 1,3 %; 18,4 %; 23,6 %; 47,1 % по відношенню до нахилу в 5 %.

6. 4 Моделювання еліптичної форми контуру лісової пожежі

Натурні експерименти показують, що низова пожежа в однорідному середовищі поширюється у формі еліпса – рисунок 6.6. У науковій літературі немає однозначного підходу до визначення формули, що описує параметри a , b , c цього еліпса [35].

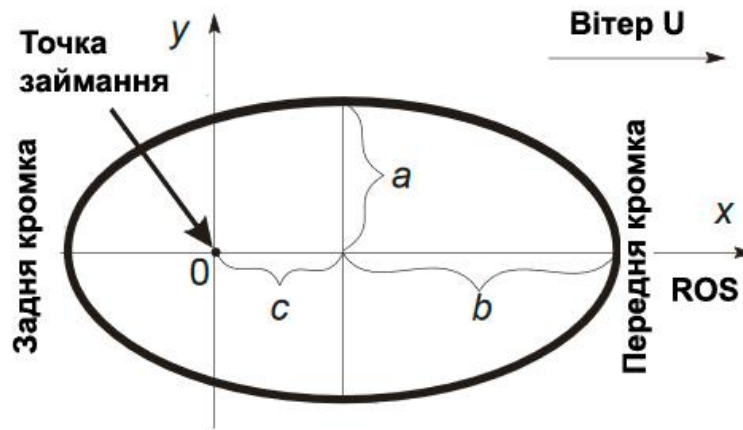


Рисунок 6.6 – Еліптична форма контуру низової лісової пожежі [35]

Для побудови еліптичної форми контуру лісової пожежі використаємо формули (6.10-6.11) [35].

Початкові розміри еліпса пожежі обчислюються за формулами (6.10):

$$\begin{aligned} L_0 &= 0,48 \cdot S \cdot R^{1,5}, \\ W_0 &= k \cdot L_0, \end{aligned} \quad (6.10)$$

де S – площа джерела пожежі в гектарах,

R – індекс розповсюдження пожежі (індекс Россланда-Гейлза),

k – коефіцієнт відношення ширини до довжини еліпса (за замовчуванням 0,4).

Залежно від наявності вітру, необхідно визначити, які розміри еліпса будуть сталими, а які змінними.

Якщо є вітер, довжина L залишається сталою, а ширина W розраховується. Якщо вітер відсутній, то обидва розміри залишаються сталими, рівними W_0 і L_0 .

На кожному кроці часу, обчислюються зміни довжини і ширини еліпса з урахуванням швидкості розповсюдження пожежі u та впливу вітру за формулами (6.11):

$$\begin{aligned} L_i &= L_{i-1} + u \cdot L_{const} , \\ W_i &= W_{i-1} + u \cdot W_{const} , \end{aligned} \quad (6.11)$$

де L_{const} і W_{const} – початкові довжина і ширина еліпса, які залишаються сталими відповідно до наявності вітру.

Напрямок вітру оновлюється на кожному кроці часу. Процес продовжується протягом визначеної кількості кроків часу, після чого отримуються кінцеві розміри еліпса пожежі.

Таким чином послідовність побудови включає такі кроки.

1. Обчислення початкових розмірів еліпса пожежі. Початкові розміри L_0 і W_0 обчислюються за допомогою методу Ротермела, використовуючи площу джерела пожежі S , індекс розповсюдження пожежі R і коефіцієнт k .

2. Визначення сталих та змінних розмірів еліпса. Залежно від наявності вітру, один з розмірів еліпса (довжина або ширина) залишається сталим, а інший змінюється відповідно до напрямку та швидкості вітру.

3. Розрахунок зміни еліпса пожежі. На кожному кроці часу обчислюються нові розміри еліпса з урахуванням зміни швидкості розповсюдження пожежі та напрямку вітру.

4. Побудова графіка. За допомогою бібліотеки Matplotlib побудований графік, де кожен еліпс представляє стан розповсюдження пожежі на певний момент часу. Також на графіку відображені стрілки, що показують напрямок вітру.

Повний скрипт побудови еліпса кромки пожежі представлено в Додатку В.

Побудуємо еліпс кромки пожежі для наступних даних. Напрямок вітру 45° . Площа джерела пожежі 0,1 га. Коефіцієнт відношення ширини до довжини еліпса 0,4. Кількість кроків часу 10. Інші дані такі ж, як у випадку побудови залежності швидкості пожежі від швидкості вітру.

Результати наведені на рисунках 6.7-6.10.

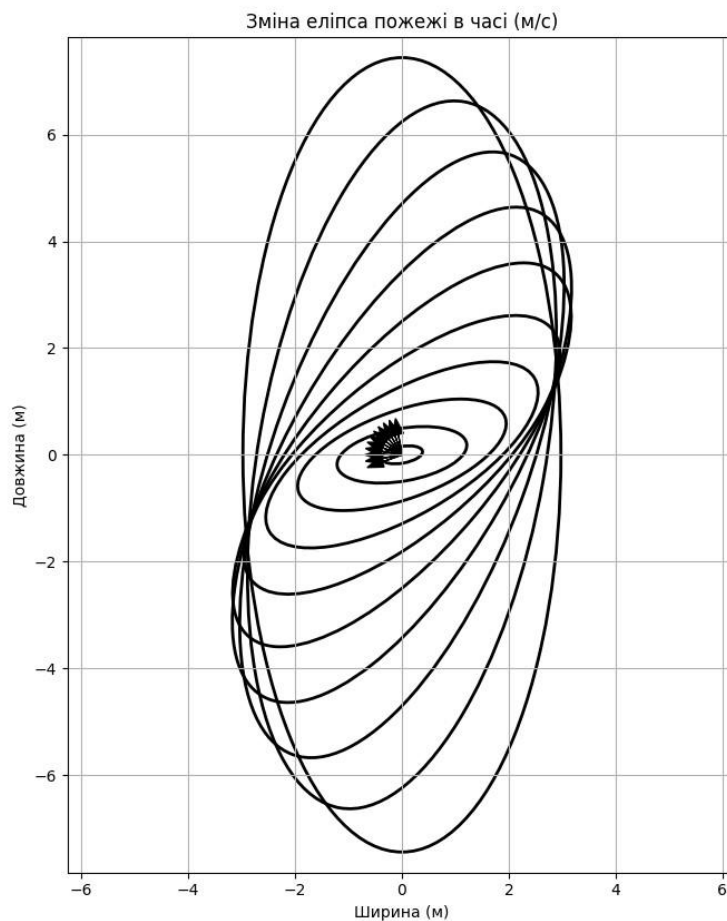


Рисунок 6.7 – Форма та розміри еліпса кромки пожежі для $S = 0,1$ га



Рисунок 6.8 – Зміна розмірів еліпса кромки пожежі для $S = 0,25$ га

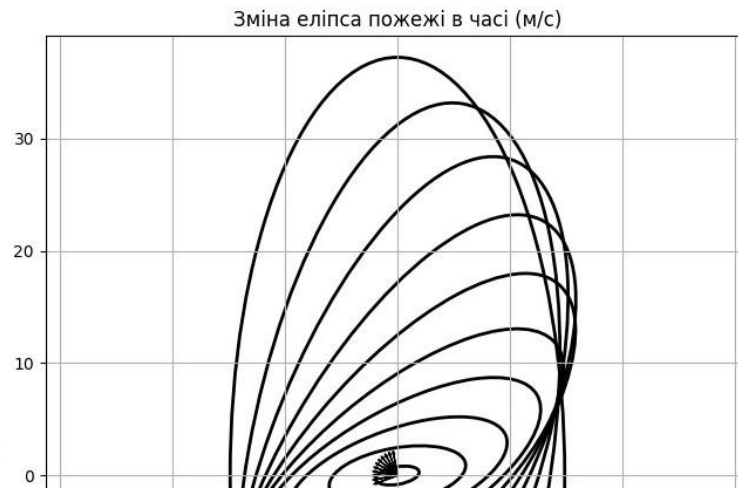


Рисунок 6.9 – Зміна розмірів еліпса кромки пожежі для $S = 0,5$ га

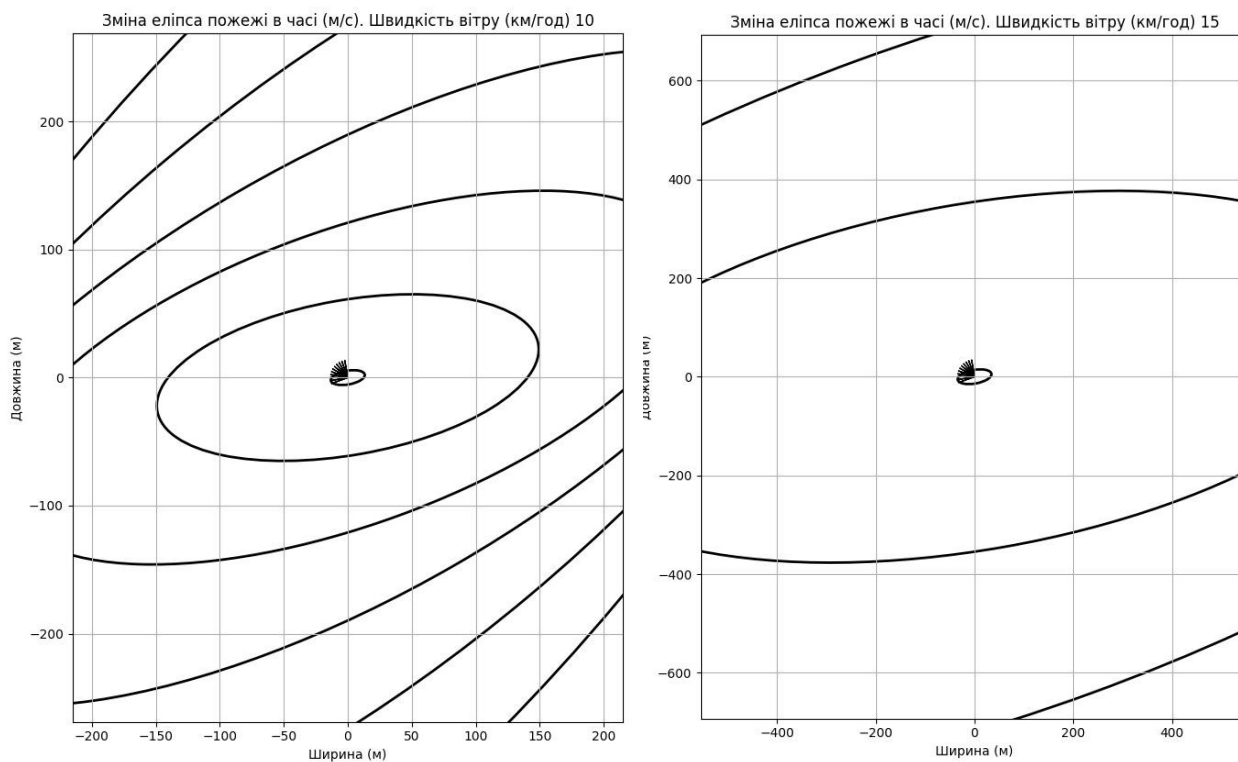


Рисунок 6.10 – Зміна розмірів еліпса кромки пожежі для $S = 0,75$ га

Розміри еліпса кромки пожежі в однорідному середовищі зростають пропорційно збільшенню початкової площі джерела пожежі та швидкості розповсюдження пожежі. Коли початкова площа джерела пожежі збільшується, це призводить до збільшення довжини і ширини еліпса. Також, якщо швидкість розповсюдження пожежі велика, це також сприяє зростанню розмірів еліпса.

Розглянемо вплив швидкості вітру на розміри еліпса кромки пожежі. Будемо змінювати швидкість вітру u (км/год) = [10, 15] при початковій площі джерела пожежі $S = 0,25$ га.

Результати наведені на рисунку 6.11.



а)

б)

Рисунок 6.11 – Зміна розміру еліпсу кромки пожежі від зміни швидкості вітру:

а) швидкість вітру 10 км/год; б) швидкість вітру 15 км/год.

У разі наявності вітру, його напрям може впливати на форму еліпса, змінюючи відношення між його довжиною та шириною. Наприклад, якщо вітер дме вздовж осі еліпса, то довжина може збільшитися швидше, ніж ширина, та навпаки.

Отже, розміри еліпса кромки пожежі зростають відповідно до збільшення початкової площі джерела пожежі, швидкості розповсюдження пожежі та можливих впливів вітру.

Висновок до розділу 6

На основі моделі Ротермела отримано програмну реалізацію, на основі якої можна зробити висновок, що зростання кількості живого палива сприяє зменшенню швидкості розповсюдження пожежі за рахунок вологості, що

стримує вогонь. На противагу, збільшення мертвого палива прискорює поширення вогню, оскільки сухі матеріали швидше горять.

Зі збільшенням нахилу місцевості спостерігається загальне збільшення швидкості поширення пожежі, особливо відчутне при високих рівнях мертвого палива. Зменшення частки мертвого палива призводить до зменшення швидкості поширення вогню незалежно від нахилу місцевості.

Швидкість вітру має значний вплив на інтенсивність пожежі, збільшуючи її експоненційно зі зростанням вітру.

Величина еліпса кромки пожежі збільшується зі збільшенням початкової площі джерела пожежі та швидкості його розповсюдження. При наявності вітру його напрям може впливати на форму еліпса, змінюючи співвідношення між його довжиною та шириною. Таким чином, розміри еліпса кромки пожежі залежать від початкової площі джерела пожежі, швидкості його розповсюдження та напрямку вітру.

Ці результати добре узгоджуються з практичним описом лісових пожеж, що дозволяє реалізувати стохастичну модель розповсюдження лісової пожежі на базі отриманого коду.

РОЗДІЛ 7

ПРОГНОЗУВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ НА БАЗІ МОДЕЛІ РОТЕРМЕЛА

Стохастичне моделювання – це техніка моделювання, що використовується для аналізу систем або процесів, які включають випадковість або невизначеність.

У стохастичному моделюванні модель включає імовірнісні елементи для представлення невизначеності в досліджуваній системі. Ця невизначеність часто відображається за допомогою випадкових величин, розподілів ймовірностей або стохастичних процесів. Багаторазово моделюючи систему за різних наборів випадкових вхідних даних, аналітики можуть спостерігати за діапазоном можливих результатів та їх ймовірністю.

За основу стохастичної моделі візьмемо базову модель Ротермела (додаток Б), а саме функції ROS. Використання цієї процедури дозволяє знаходити основні параметри розповсюдження вогню.

Генерація симуляції методом Монте-Карло швидкості розповсюдження вогню (ROS) зі стохастичними вхідними даними відбувається у функції `rosunc`.

Алгоритм роботи цієї функції включає наступні етапи.

1. Ініціалізація. Отримує вхідні параметри, що описують характеристики вогню та матеріалів. Встановлює максимальну кількість спроб генерування ROS. Визначає коефіцієнт для генерування випадкових значень.

2. Цикл спроб. Повторюється до досягнення максимальної кількості спроб або отримання дійсного значення ROS.

В кожній ітерації:

- перетворює вхідні дані в масиви та вирівнює їх,
- визначає стандартні відхилення для кожного параметра,
- генерує випадкові значення параметрів з урахуванням стандартних відхилень,

- перевіряє випадкові значення на відповідність обмеженням,
- обчислює ROS за допомогою детермінованої моделі з випадковими параметрами,
- перевіряє отримане значення ROS,
- якщо ROS більше 0, повертає його, а також випадкові значення параметрів.

3. Повернення. Повертає значення ROS та параметри, якщо їх вдалося отримати. Повертає None, якщо не вдалося отримати дійсне значення ROS протягом максимальної кількості спроб.

Програмна реалізація функції `rosunc` наступна:

1) перетворення вхідних списків у масиви: перш ніж почати генерацію стохастичних даних, вхідні дані конвертуються в масиви NumPy та вирівнюються за допомогою методу `flatten()`;

2) генерація стандартного відхилення для кожного параметра: стандартне відхилення (`std_...`) обчислюється шляхом множення стандартного відхилення за замовчуванням (`sdm`) на відповідні параметри;

3) генерація стохастичних вхідних даних: використовуючи функцію `np.random.normal()`, генеруються стохастичні значення для кожного параметра з врахуванням їх стандартного відхилення;

4) обмеження значень параметрів: після генерації стохастичних даних застосовуються деякі обмеження до деяких параметрів, наприклад, значення `mx_dead_stoch` та `m_stoch` не можуть бути від'ємними. Також значення `m_stoch` обмежується до максимального значення 100;

5) виклик функції `ros` для обчислення швидкості розповсюдження вогню: обчислюється швидкість розповсюдження за допомогою детермінованої моделі зі стохастичними вхідними даними;

6) перевірка на допустимість значень ROS: якщо отримане значення ROS більше 0, повертаються усі стохастичні вхідні дані, а також саме значення ROS;

7) повторення: якщо значення ROS не задовольняє умову більше 0, цикл повторюється, поки не буде досягнуто максимальна кількість спроб `max_attempts`;

8) повернення `None` у випадку невдачі: якщо досягнуто максимальну кількість спроб без отримання допустимого значення ROS, функція повертає `None`.

Отже, функція `rosunc` дозволяє генерувати стохастичні дані та обчислювати швидкість розповсюдження вогню, використовуючи детерміновану модель, і повертати результат разом зі стохастичними вхідними даними.

Таким чином програма моделювання розповсюдження вогню методом Монте-Карло складається з визначення параметрів палива та умов. Визначені різні характеристики палива, такі як маса, площа, тепловмісткість тощо, а також параметри середовища, такі як швидкість вітру та нахил місцевості.

Далі відбувається етап моделювання. Викликається функція `rosunc`, яка генерує стохастичні дані для певної кількості симуляцій методом Монте-Карло і обчислює швидкість розповсюдження вогню для кожної симуляції. Отримані результати зберігаються для подальшого аналізу.

Після завершення моделювання здійснюється візуалізація вхідних даних. Будуються графіки розподілу вхідних даних палива та умов середовища, графіки розподілу швидкості розповсюдження вогню та інших параметрів, таких як інтенсивність реакції мертвого та живого палива, джерело тепла тощо.

Виводиться описова статистика значень швидкості розповсюдження вогню, а саме мінімальне, максимальне, середнє значення та квартилі швидкості розповсюдження вогню.

Код стохастичної моделі швидкості розповсюдження вогню (`Rate of Spread - ROS`) наведено в Додатку Г.

Розглянемо приклад використання отриманого коду для прогнозування розповсюдження лісової пожежі.

Вектор навантаження паливом [т/га] для класів палива відповідно – [2; 1; 0,5; 3; 8]. Вектор відношення поверхні до об'єму [$\text{м}^2/\text{м}^3$] для класів палива – [5600, 358, 98, 6200, 8000]. Значення глибини паливного ложа [см] – 50. Значення вологості мертвого палива при гасінні [відсотків] – 30. Вектор тепловмісткості [кДж/кг] для класів палива – [18622, 18622, 18622, 19500, 20000]. Вектор вологості на суху масу для класів палива [відсотків] – [7, 8, 9, 40, 60]. Значення нахилу місцевості [відсотків] – 10.

Кількість симуляцій для Монте-Карло – 1000. Стандартне відхилення для генерації стохастичних значень (sdm) – 0,3.

У контексті методу Монте-Карло, коли використовуються стохастичні дані, такі як випадкові змінні або шум, стандартне відхилення визначає розмах випадковості або рівень варіації у цих значеннях. Чим більше значення sdm, тим більше різноманітності ми побачимо у результатах симуляції.

Стохастичний розподіл вхідних даних моделей наведено на рисунку 7.1. Значення швидкостей розповсюдження пожежі (ROS) наведено на рисунку 7.2. Розподіл швидкостей розповсюдження пожежі наведено на рисунку 7.3.

Отриманий розподіл значень швидкості поширення вогню представляє собою набір чисел від 0,01 до 0,63 м/с.

За величиною частоти можна зробити наступні спостереження, що більшість значень зосереджені у межах від 0,01 до 0,1 м/с, що може вказувати на те, що у більшості випадків вогонь поширюється досить повільно. Існують також значення, що перевищують 0,3 м/с, що може свідчити про більш інтенсивні вогні або сприятливіші умови для їх поширення.

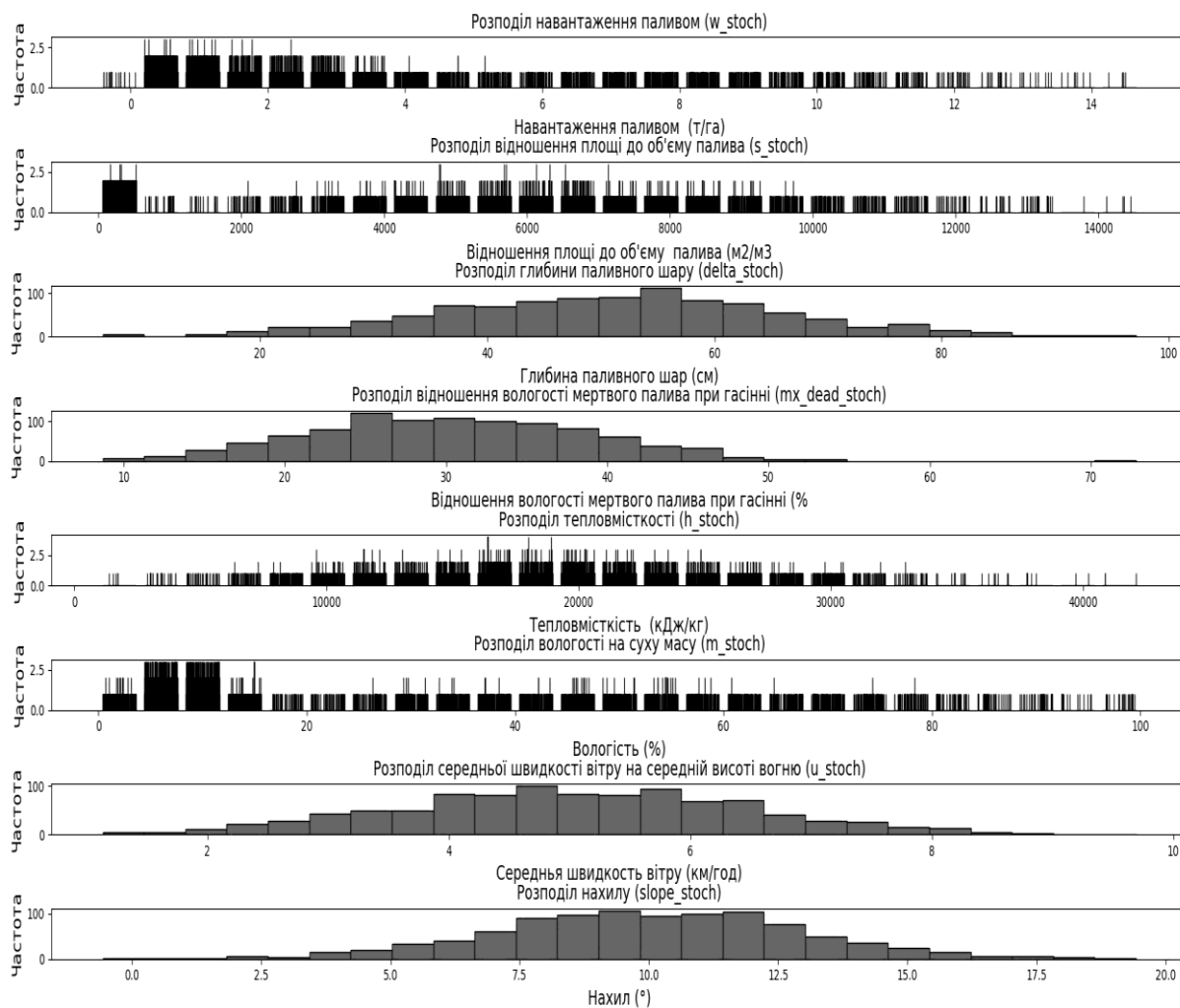


Рисунок 7.1 – Стохастичний розподіл вхідних даних моделей

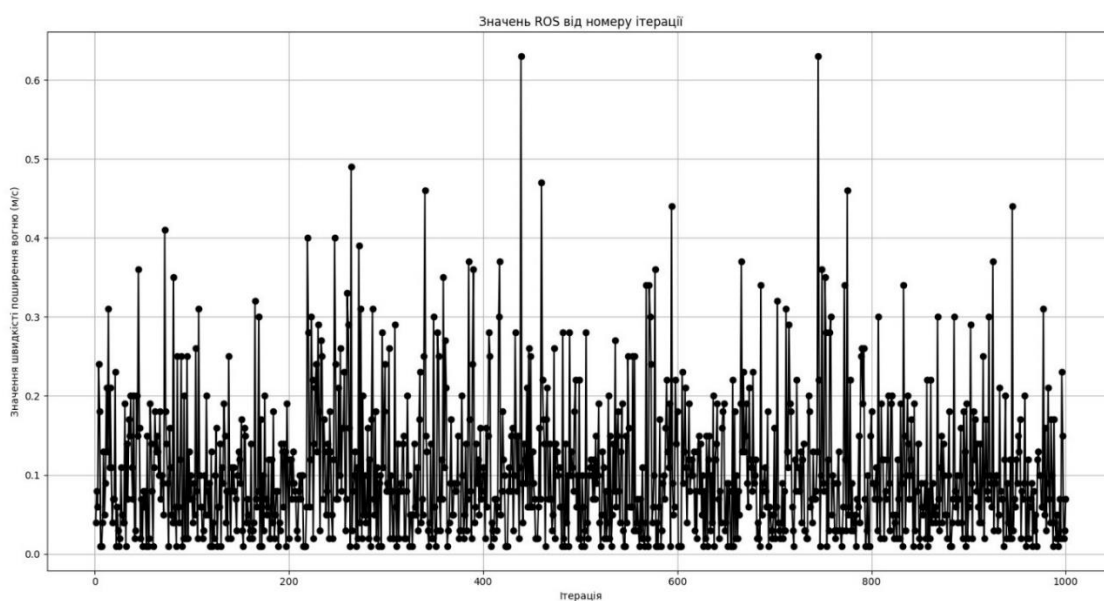


Рисунок 7.2 – Значення швидкостей розповсюдження пожежі (ROS)

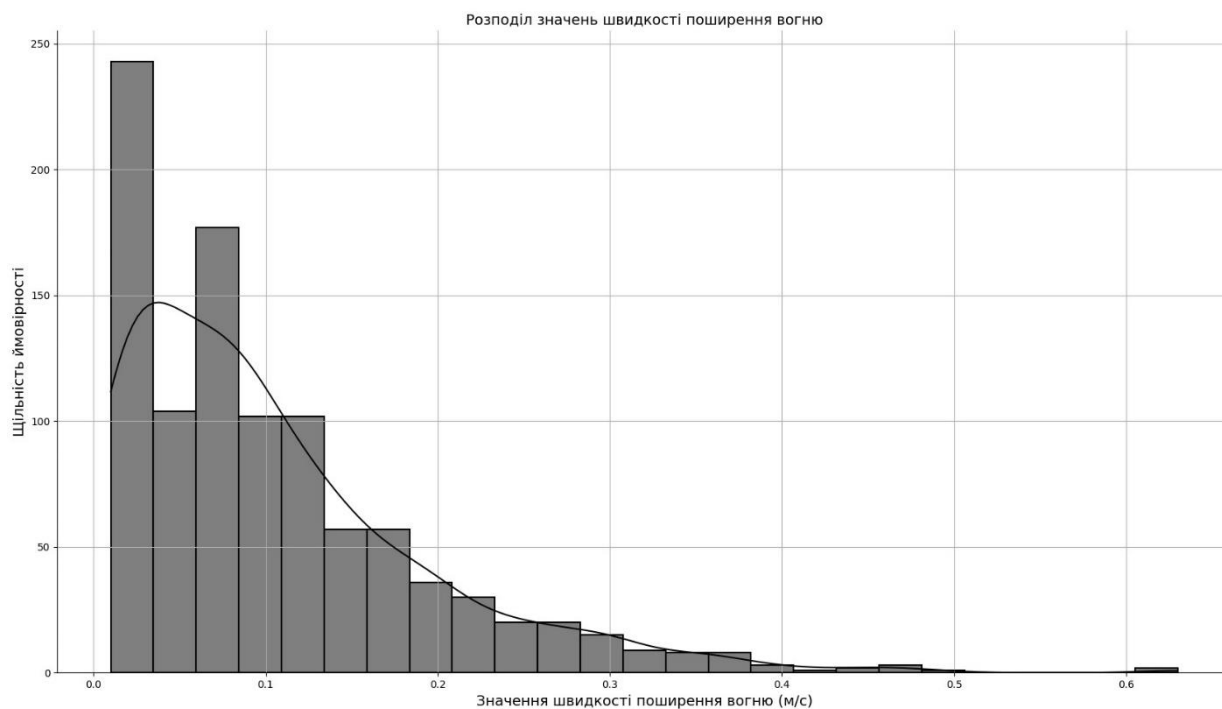


Рисунок 7.3 – Розподіл швидкостей розповсюдження пожежі

Проаналізуємо вплив на швидкість розповсюдження вогню типів палива живого і мертвого. Розподіл значень інтенсивності реакції живого і мертвого палива та розподіл значень джерела тепла наведено на рисунках 7.4-7.6.

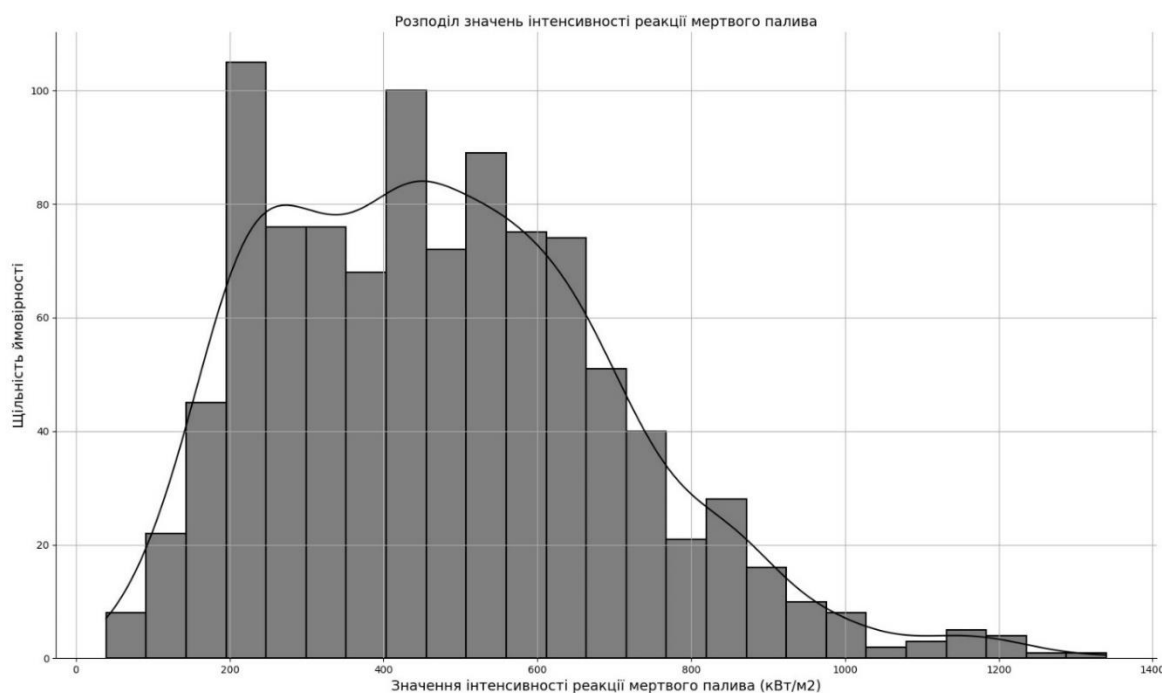


Рисунок 7.4 – Розподіл значень інтенсивності реакції мертвого палива

Спостерігається широкий розмах значень інтенсивності реакції мертвого палива, що відображається від невеликих значень (приблизно 73) до значень більше 1300 кВт/м².

Розмах розподілу значень досить великий, що свідчить про значну варіацію в інтенсивності реакції мертвого палива вздовж області, яку досліджують.

З візуалізації гістограми видно, що розподіл не є симетричним і може мати легку асиметрію вправо. Асиметрія вправо в гістограмі може означати, що є деякі високі значення інтенсивності пожежі, які відповідають надзвичайно активним областям горіння.

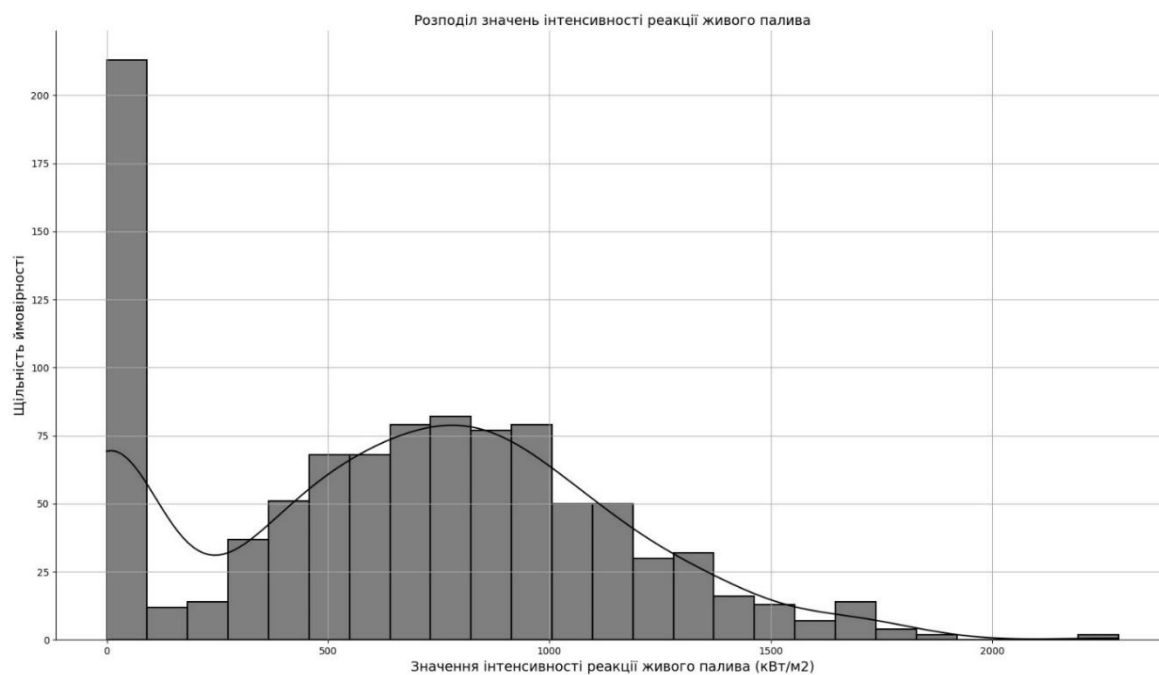


Рисунок 7.5 – Розподіл значень інтенсивності реакції живого палива

Цей розподіл представляє інтенсивність реакції живого палива. Він складається з 990 значень, які коливаються від нуля до значень близько 2150 кВт/м². Спостерігається широкий розкид значень, що вказує на різні рівні інтенсивності реакції. Вогневі реакції в живому паливі можуть бути дуже

різноманітними і можуть спричиняти як малі, так і значні спалахи вогню залежно від умов оточуючого середовища та властивостей самого палива.

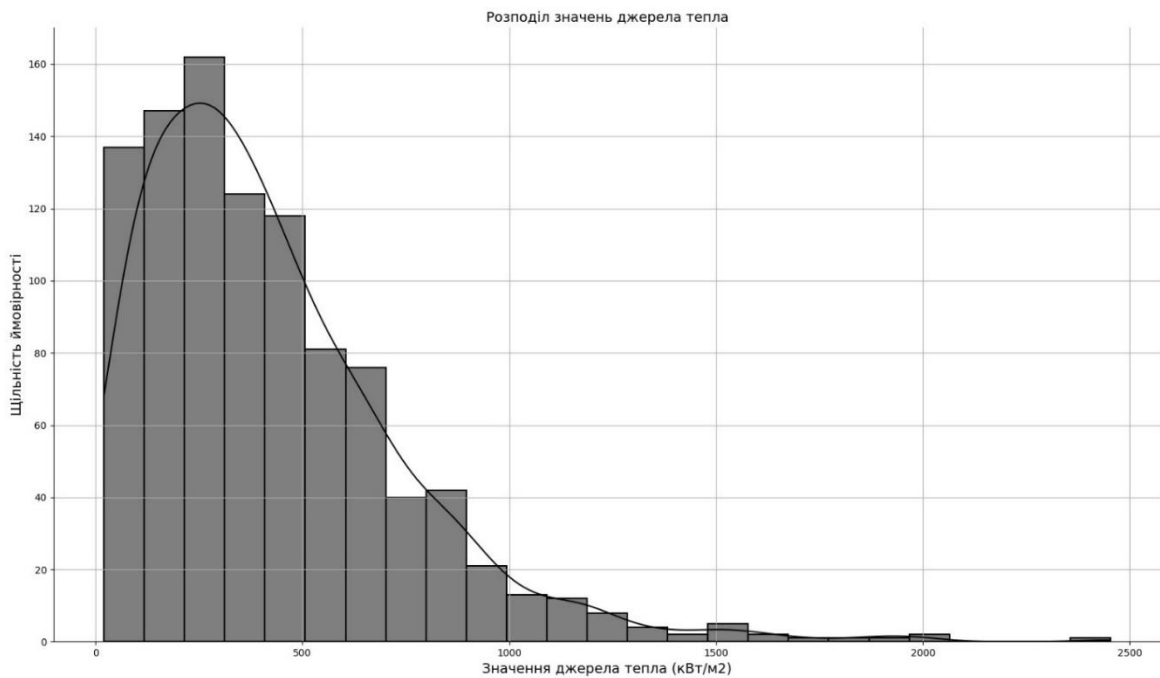


Рисунок 7.6 – Розподіл значень джерела тепла

З наведених даних видно, що розподіл значень джерела тепла є достатньо широким, зі значеннями, що коливаються від дуже невеликих (19 кВт/м²) до великих (2000 кВт/м²). Це може свідчити про різноманітність джерел тепла або різні потужності реакцій, які генерують тепло.

Також можна помітити, що деякі значення є відносно стабільними та відносно невеликими (наприклад, 50-200 кВт/м²), в той час як інші значення суттєво вищі, навіть дуже великі (наприклад, понад 1000 кВт/м²). Це може вказувати на наявність джерел тепла з різною потужністю, або ж на велику варіабельність в ефективності та потужності різних систем теплогенерації.

Як зазначалось вище, кількість симуляцій становила 1000. На рисунку 7.7 наведено залежність часу виконання моделі від кількості ітерацій моделювання.

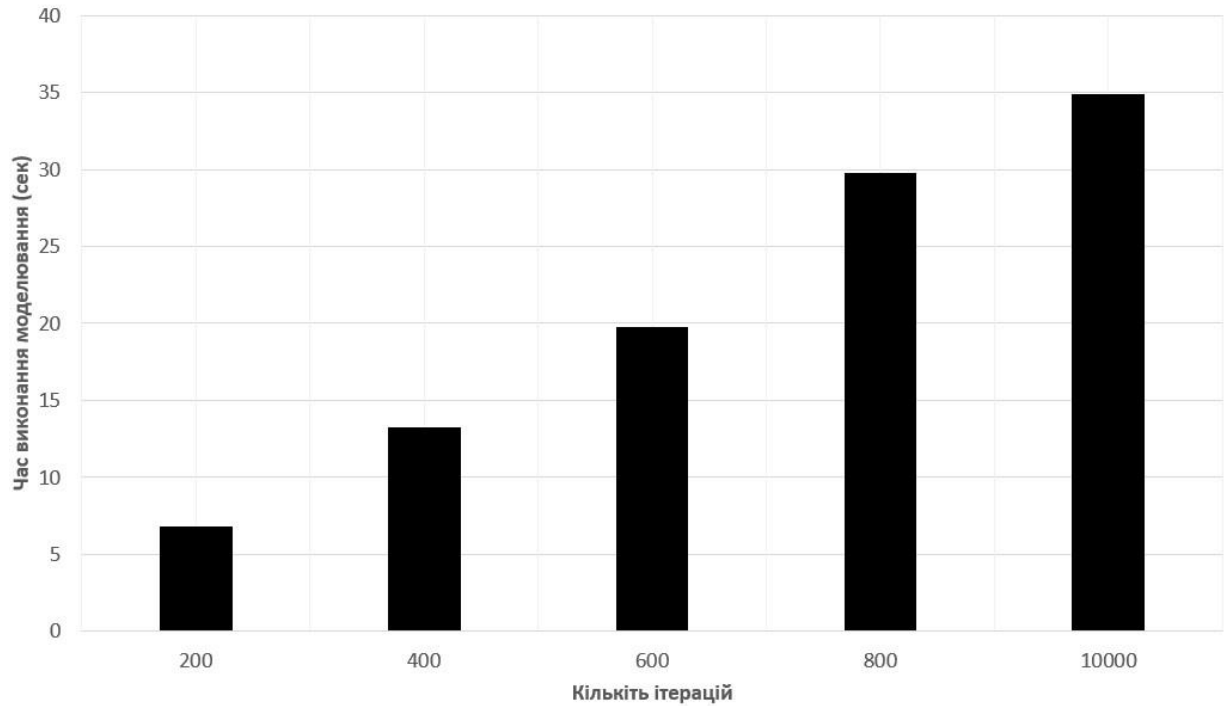


Рисунок 7.7 – Залежність часу виконання моделі від кількості ітерацій моделювання

Описова статистика значень швидкості розповсюдження вогню (м/с):

- мінімальне значення: 0,01;
- перший кuartиль: 0,04;
- медіана швидкість поширення вогню (м/с): 0,08;
- середнє значення швидкості поширення вогню (м/с): 0,103;
- третій кuartиль: 0,14;
- максимальне значення: 0,83.

Висновок до розділу 7

Отримано модель для прогнозування розповсюдження лісової пожежі на основі моделі Ротермела з використанням методу Монте-Карло. Переваги цієї моделі полягають у використанні стохастичних вхідних даних, генерації багатьох симуляцій та подальшому аналізі результатів.

Використання стохастичних вхідних даних дозволяє враховувати невизначеність та варіативність умов, що є реалістичними для реальних ситуацій лісових пожеж. Генерація великої кількості симуляцій дозволяє отримати більш широкий обсяг даних, що в свою чергу допомагає кращому розумінню розподілу швидкості розповсюдження вогню.

Візуалізація результатів за допомогою гістограм та кривих розподілу дозволяє легше сприймати та аналізувати дані, що допомагає у виявленні закономірностей та особливостей розповсюдження вогню.

Надання описової статистики параметра швидкості розповсюдження вогню (ROS) дозволяє отримати загальне уявлення про розподіл цього параметра та його характеристики.

Отже, модель розповсюдження вогню лісової пожежі, розроблена методом Монте-Карло, є інструментом для прогнозування поведінки лісових пожеж, а також для планування превентивних заходів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджується проблематика лісових пожеж, яка стає все більш актуальною в сучасному світі через їх велику кількість та серйозні наслідки для навколишнього середовища та суспільства.

В роботі проведено аналіз статистики, причин та наслідків лісових пожеж, що підкреслює необхідність розробки ефективних методів прогнозування та управління цими природними катастрофами. Виявлено, що причинами пожеж найчастіше є недбале використання вогню для утримання пасовищ, відсутність обробки ґрунту, блискавки у віддалених гірських районах та екстремальні погодні явища, такі як посуха та високі температури. Наслідки пожеж мають вплив на різні сфери життя, включаючи економічні, соціальні та екологічні аспекти.

Виконано класифікацію лісових пожеж за кількома критеріями, такими як тип лісу, швидкість та інтенсивність поширення вогню, розмір пожежі та інші фактори. Описано верхові та низові пожежі; швидкі, помірно швидкі або повільні пожежі; малі, середні, великі та мегапожі, залежно від території, яку вони охоплюють.

На основі отриманих даних розглянуто різні аспекти лісових пожеж та вплив основних факторів на їх поширення. Розвиток лісової пожежі залежить від різних факторів, серед яких основні це рельєф, паливо та погода. Розглянуто вплив цих факторів на швидкість лісової пожежі. Розуміння взаємодії цих факторів дозволяє розробляти ефективні стратегії моделювання та управління лісовими пожежами. При цьому важливо враховувати їх взаємодію та вплив на розвиток пожежі для прогнозування та мінімізації її наслідків.

Розглянуто варіанти класифікації моделей поширення лісових пожеж. Зазначено, що для реалізації найчастіше обирають напівемпіричні моделі. Для автоматизованого прогнозування швидкості розповсюдження лісової пожежі обрано модель Ротермела.

Проаналізовано найбільш вживані моделі лісових пожеж, звертаючи увагу на їхні можливості та обмеження. Описано унікальні характеристики кожної моделі, такі як врахування кліматичних чинників, рельєфних особливостей або інших факторів. Визначено сфери, в яких кожна модель може бути найбільш ефективною, наприклад, прогнозування ризику пожеж, виявлення та моніторинг існуючих пожеж, чи розробка стратегій протидії. Виділено переваги кожної моделі, такі як точність прогнозування, швидкість реакції на нові дані, чи здатність до адаптації до різних умов. Виявлено обмеження та недоліки кожної моделі, такі як вимоги до обчислювальних ресурсів, обмежена область застосування, чи недостатня точність в певних сценаріях.

Для програмної реалізації обрано модель Rothermel, як найбільш придатну модель, оскільки вона є однією з найбільш широко використовуваних моделей у прогнозуванні поведінки лісових пожеж.

Дослідження включало моделювання поширення лісових пожеж з використанням базової моделі Ротермела, що дозволило встановити залежність швидкості поширення пожежі від навантаження паливом, швидкості вітра та нахилу місцевості. Програмна реалізація базової моделі Ротермела була проведена для дослідження цих залежностей. Крім того, було проведено моделювання еліптичної форми контуру лісової пожежі, щоб отримати більш точне уявлення про геометрію та розподіл пожежі.

Результати добре узгоджуються з практичним описом лісових пожеж, що дозволило реалізувати стохастичну модель розповсюдження лісової пожежі на базі отриманого коду.

Основною частиною дослідження є моделювання поширення лісових пожеж з використанням моделі Ротермела та методу Монте-Карло. Це дозволяє враховувати невизначеність та варіативність умов, що є ключовими для реалістичного прогнозування подібних природних явищ. Велика кількість симуляцій та використання стохастичних вхідних даних допомагають отримати

більш точні результати, що є важливим для розуміння та управління лісовими пожежами.

Завершальна частина роботи присвячена аналізу отриманих результатів та їх візуалізації, що дозволяє краще розуміти закономірності та особливості розповсюдження вогню. Описова статистика параметру швидкості розповсюдження вогню допомагає отримати загальне уявлення про цей процес та його характеристики.

Отже, розроблена модель розповсюдження вогню лісових пожеж є важливим інструментом для прогнозування та управління цими небезпечними природними явищами. Вона дозволяє не лише прогнозувати поведінку лісових пожеж, але й розробляти ефективні плани превентивних заходів для їх запобігання та контролю.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service. URL: <https://ewds.climate.copernicus.eu/datasets/cems-fire-historical-v1?tab=overview> (дата звернення: 15.07.2025).
2. Wildfires: 2023 among the worst in the EU in this century. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/wildfires-2023-among-worst-eu-century-2024-04-10_en (дата звернення: 15.07.2025).
3. Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік. URL: <https://www.openforest.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-holovy-derzhavnoho-ahentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
4. Global Fire Monitoring Center (GFMC). URL: <https://gfmc.online/> (дата звернення: 15.07.2025).
5. Європейська система інформації про лісові пожежі. URL: <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/applications/data-and-services> (дата звернення: 15.07.2025).
6. The Hidden Life of Trees. URL: <https://avalonlibrary.net/ebooks/Peter%20Wohlleben%20-%20The%20Hidden%20Life%20of%20Trees.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
7. Finney M., Mcallister S., Grumstrup T., Forthofer Ja. Wildland Fire Behaviour: Dynamics, Principles and Processes. Publisher: CSIRO Publishing, 2021. 376 pages.
8. Fire ecology of Pacific Northwest forest. URL: https://www.researchgate.net/publication/43410231_Fire_Ecology_of_Pacific_Northwest_Forests (дата звернення: 15.07.2025).
9. Introduction to Wildland Fire. URL: <https://search.worldcat.org/title/Introduction-to-wildland-fire/oclc/33244900> (дата звернення: 15.07.2025).

10. Introduction to the Australian Fire Danger Rating System. URL: https://www.researchgate.net/publication/379309323_Introduction_to_the_Australian_Fire_Danger_Rating_System (дата звернення: 15.07.2025).
11. The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. URL: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/55928> (дата звернення: 15.07.2025).
12. Zhenyang X., Lin H., Wang F. A small target forest fire detection model based on YOLOv5 Improvement. *Forests*, 2022. V. 13, 1332 p.
13. Li H., Long Z., Yang Z., Xu Z., Li, Y. Analysis of forest fire risk in Sichuan Liangshan based on logistic model. *J. Saf. Environ*, 2021. V. 21, pp. 498-505.
14. Memisoglu Baykal T. Performance assessment of GIS-based spatial clustering methods in forest fire data. *Natural Hazards*, 2025. V. 121, pp. 8445-8477.
15. Evaluating crown fire rate of spread predictions from physics-based models. URL: https://www.researchgate.net/publication/278026529_Evaluating_Crown_Fire_Rate_of_Spread_Predictions_from_Physics-Based_Models (дата звернення: 15.07.2025).
16. Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169809519315005> (дата звернення: 15.07.2025).
17. Wildfires front dynamics: 3D structures and intensity at small and large scales. URL: https://www.researchgate.net/publication/338308276_Wildfires_front_dynamics_3D_structures_and_intensity_at_small_and_large_scales (дата звернення: 15.07.2025).
18. Wildland fire spread modelling using cellular automata: Evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics. URL: https://www.researchgate.net/publication/262993744_Wildland_fire_spread_modelling_using_cellular_automata_evolution_in_large-scale_spatially_heterogeneous_environments_under_fire_suppression_tactics (дата звернення: 15.07.2025).

19. Rothermel R. How to Predict the Spread and Intensity of Forest Fire and Range Fires. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_int/int_gtr143.pdf (дата звернення: 15.07.2025).
20. Guan Z., Miao Xi., Mu Yu., Sun Q., Ye Q., Gao D. Forest Fire Segmentation from Aerial Imagery Data Using an Improved Instance Segmentation Model. *Remote Sensing*, 2022. V. 14, p. 3159.
21. Predicting forest fires using arima. URL: https://www.researchgate.net/publication/333162667_Predicting_forest_fires_using_arima (дата звернення: 15.07.2025).
22. Parallel SVM model for Forest Fire Prediction. URL: https://www.researchgate.net/publication/353687076_Parallel_SVM_model_for_Forest_Fire_Prediction (дата звернення: 15.07.2025).
23. Prediction of Forest Fires Based on Least Squares Support Vector Machine. URL: https://www.researchgate.net/publication/290522172_Prediction_of_Forest_Fires_Based_on_Least_Squares_Support_Vector_Machine (дата звернення: 15.07.2025).
24. Jiao W., Tian M. A combining strategy of energy replenishment and data collection in wireless sensor networks. *IEEE Sens. J.*, 2022. V. 22, pp. 7411-7426.
25. Yang X., Wang Y., Liu X., Liu Y. High-Precision Real-Time forest fire video detection using One-Class model. *Forests*, 2022. V. 13, 1826 p.
26. Xue X., Jin S., An F. and others. Shortwave radiation calculation for forest plots using airborne LiDAR data and computer graphics. *Plant Phenomics*, 2022. V. 2022, pp. 1-21.
27. Byari M., Bernoussi A., Jellouli O., Ouardouz M., Amharref M. Multi-scale 3D cellular automata modeling: Application to wildland fire spread. *Chaos Solitons Fractals*, 2022, V. 164, pp. 112-153.
28. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_p041/rmrs_p041_213_220.pdf (дата звернення: 15.07.2025).

29. FARSITE: A fire area simulator for fire managers. URL: https://www.researchgate.net/publication/333162667_Predicting_forest_fires_using_arima (дата звернення: 15.07.2025).
30. BehavePlus fire modeling system: Past, present, and future. URL: https://www.researchgate.net/publication/251771196_BehavePlus_fire_modeling_system_Past_present_and_future (дата звернення: 15.07.2025).
31. Validation of Fire Dynamic Simulator (FDS) for Pool Fire in Large Enclosures. URL: https://www.researchgate.net/publication/309235411_Validation_of_Fire_Dynamic_Simulator_FDS_for_Pool_Fire_in_Large_Enclosures (дата звернення: 15.07.2025).
32. Wildland–urban interface (WUI) fire modelling using PHOENIX Rapidfire: A case study in Cavaillon, France. URL: https://www.researchgate.net/publication/273699623_Wildland-urban_interface_WUI_fire_modelling_using_PHOENIX_Rapidfire_A_case_study_in_Cavaillon_France (дата звернення: 15.07.2025).
33. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels by Richard C. Rothermel. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_int/int_rp115.pdf (дата звернення: 15.07.2025).
34. The Rothermel Surface Fire Spread Model and Associated Developments: A Comprehensive Explanation. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr371.pdf (дата звернення: 15.07.2025).
35. FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation. URL: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_rp004.pdf (дата звернення: 15.07.2025).
36. Борейко Я. В., Гуменюк П. О. Моделювання поширення лісових пожеж з використанням моделі Ротермела. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 18-25.