

## ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ АГЕНТНОЇ МОДЕЛІ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

А. В. ЖУК

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна 58012  
e-mail: [a.zhuk@chnu.edu.ua](mailto:a.zhuk@chnu.edu.ua)

У статті представлено результати параметризації та верифікації розширеної агентної моделі поширення лісової пожежі на основі NetLogo Fire. Модель розширена п'ятьма керованими параметрами – вологістю середовища, швидкістю та напрямком вітру, крутизною схилу і типом палива – і реалізує мультиплікативну формулу ймовірності займання. Верифікацію проведено методом аналізу чутливості з використанням інструменту BehaviorSpace у три серії обчислювальних експериментів загальним обсягом 1380 модельних запусків. Встановлено критичний поріг перколяції при щільності лісу близько 55 %, що узгоджується з теоретичними передбаченнями для двовимірних ґраток із восьмиусіднім оточенням. Щільність лісу є єдиним статистично значущим предиктором масштабу пожежі ( $\rho=0,984$ ,  $p<0,001$ ). Виявлено якісно різну чутливість хвойного і листяного типів палива до вологості. Для листяного зафіксовано різкий фазовий перехід у діапазоні 40–60 %, тоді як хвойний демонструє монотонне зниження без вираженого порогу. Вплив швидкості вітру та крутизни схилу на масштаб пожежі в активній фазі статистично не підтверджено, що визначає напрям подальшого вдосконалення моделі. Верифікована модель придатна для первинного скринінгу екологічної небезпеки та порівняльного аналізу сценаріїв розвитку пожежонебезпечної ситуації.

*Ключові слова:* агентне моделювання, NetLogo, поширення лісової пожежі, клітинний автомат, просторово-часова динаміка, екологічна безпека

**Вступ.** Лісові пожежі перетворилися на масштабну глобальну загрозу. Протягом останніх 45 років спостерігається стрімке зростання інтенсивності та просторового поширення лісових пожеж. Середня площа вигорання за рік перевищила показники 1970-х років більш ніж у шість разів, а пожежонебезпечний сезон подовжився на 105 днів через кліматичні зміни та експансію людської діяльності (Or et al., 2023). В Україні за період 1990–2024 рр. було зафіксовано понад 117 тисяч випадків займань на загальній площі 1,4 млн га (Герасимчук та ін., 2025). Сумарна кількість щотижневих теплових аномалій в Україні за 2012–2023 роки склала близько 92 тис., тоді як лише за 2024 рік цей показник сягнув 64 тис (Воробйов, 2025).

Антропогенна діяльність посилює ризик великомасштабних, швидкоплинних або інтенсивних пожеж через поєднання агресивних сільськогосподарських практик, деградації природних ландшафтів та розширення господарської інфраструктури в дику природу. Проблему загострює накопичення надлишку біомаси внаслідок тривалої пожежної супресії та пряма недбалість або навмисні підпали (Or et al., 2023). В Україні військові дії стали додатковим каталізатором поширення лісових пожеж,

збільшивши як їхню кількість, так і охоплені вогнем площі (Герасимчук та ін., 2025).

Така ситуація призводить до масштабної деградації екосистемних послуг лісів та перетворення їх із поглиначів вуглецю на його джерела (Kelley et al., 2025). Пожежі спричиняють погіршення якості повітря та водних ресурсів, а також порушують структуру ґрунту, що знижує його інфільтраційну здатність і суттєво підвищує загрозу масштабних повеней (Чорногор та ін., 2024; Rao & Parsai, 2026). Втрата рослинності під час пожежних сезонів має ширші тривалі наслідки для екосистем, зокрема, призводить до деградації біологічного різноманіття шляхом зменшення площі оселищ ендемічних видів (Driscoll et al., 2021). Масштабні пожежні явища останніх років спричиняють глобальні соціоекологічні наслідки, що виявляються у зростанні показників смертності та травматизму, деградації засобів для існування й культурної спадщини вразливих груп населення та корінних народів (Чорногор та ін., 2024; Kelley et al., 2025).

Прогнозування динаміки лісових пожеж залишається надзвичайно складним викликом через нелінійний характер і стохастичність взаємодії між мінливими метеорологічними умовами, неоднорідною структурою палива та

топографією місцевості (Niazi et al., 2010). Така складність актуалізує потребу у розробленні та впровадженні інструментів підтримки прийняття рішень, що дозволять суб'єктам забезпечення екологічної безпеки моделювати сценарії поширення вогню, оптимізувати розподіл ресурсів та мінімізувати ймовірні збитки.

Сучасний інструментарій прогнозування лісових пожеж базується на застосуванні фізичних моделей, зокрема Rothermel та FARSITE, що описують тепломасообмін у фронті вогню, а також статистичних підходів, побудованих на емпіричних кореляціях між метеорологічними чинниками та пожежною активністю (Or et al., 2023, Silva et al., 2022; Young et al., 2025). Як перспективний напрямом розглядається агентне моделювання (Agent-Based Modeling, ABM), класичним прикладом якого слугує модель NetLogo Fire (Wilensky, 1997). Переваги цього підходу полягають у здатності враховувати просторову неоднорідність середовища, можливості досліджувати емерджентну поведінку системи через взаємодію її автономних елементів, а також у прозорості алгоритмів для процедур верифікації. Незважаючи на широке використання NetLogo Fire у навчальних і дослідницьких цілях, її базова реалізація обмежується щільністю лісу як єдиним параметром і не враховує вологість, вітер, рельєф та тип палива, що звужує можливості для реалістичного оцінювання екологічної безпеки.

Метою роботи було розширення базової моделі NetLogo Fire додатковими параметрами середовища, її параметризація на основі літературних джерел та часткова верифікація методом аналізу чутливості для подальшого застосування в задачах оцінювання екологічної безпеки лісових екосистем.

**Матеріали та методи.** Розроблена модель є розширеною версією базової агентної моделі поширення лісової пожежі NetLogo Fire (Wilensky, 1997) і реалізована в середовищі NetLogo 7.0.3 (Wilensky, 1999). Модель належить до класу клітинних автоматів із стохастичними правилами переходу. Простір симуляції представлений дискретною сіткою комірок розміром  $201 \times 201$ , кожна з яких може перебувати в одному з трьох станів – незайманий ліс, активне горіння або згаріще. Пожежа ініціюється одночасно вздовж лівої межі сітки (мінімальна координата осі X).

На відміну від базової моделі, у якій взаємодія обмежується чотирма найближчими сусідніми клітинами (von Neumann neighborhood),

розширена версія реалізує восьмиусіднє оточення (Moore neighborhood), що дозволяє відтворювати діагональне поширення відповідно до напрямку вітру.

Порівняно з базовою версією модель розширена п'ятьма керованими параметрами. *Вологість середовища* (moisture, 0–100) коригує ймовірність займання через експоненційний коефіцієнт з нейтральною точкою при moisture=50: зниження вологості збільшує ймовірність поширення вогню, підвищення – зменшує. *Швидкість вітру* (wind-speed, 0–100) і *напрямок вітру* (wind-direction, 0–360°) спільно моделюють анізотропне поширення. Вітровий коефіцієнт розраховується індивідуально для кожної сусідньої комірки через косинусну функцію кута між напрямком вітру і напрямком поширення: максимальний за вітром і мінімальний – проти нього. *Нахил рельєфу* (slope, 0–45°) реалізований через висоти комірок, що лінійно зростають по осі Y. Ймовірність займання коригується експоненційно залежно від різниці висот між активним вогнищем і сусідньою коміркою, відтворюючи закономірність прискорення вогню вгору по схилу (Rothermel, 1972). *Тип палива* (fuel-type) задається для всього лісу і визначає коефіцієнт горючості: конифер (flammability = 1,4) і deciduous (flammability = 1,0).

Ймовірність займання кожної сусідньої комірки розраховується за мультиплікативною формулою:

$$P = \text{base-prob} \times \text{moisture-factor} \times \text{wind-factor} \times \text{slope-factor} \times \text{distance-factor} \times \text{flammability},$$

де base-prob = 0,55 – базова ймовірність за нейтральних умов, distance-factor враховує геометрію сітки: для ортогональних сусідів він дорівнює 1,0, для діагональних –  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ , що відображає більшу відстань між центрами діагональних комірок.

Параметризація моделі здійснювалась у два етапи. На першому етапі значення параметрів були визначені на основі літературних джерел: коефіцієнти вологості та рельєфу – за логікою класичної моделі Rothermel (1972), вітровий коефіцієнт – за аналогією з Pires et al. (2025), значення flammability для хвойного і листяного типів палива – на основі загальноприйнятих співвідношень горючості деревних порід. На другому етапі значення base-prob = 0,55 і щільність лісу density були уточнені через систематичне тестування моделі.

Верифікація моделі проводилася методом аналізу чутливості з використанням інструменту BehaviorSpace у середовищі NetLogo 7.0.3. Проведено три серії обчислювальних

експериментів із мінімум 20 повторними запусками на кожну комбінацію параметрів.

*Експеримент 1* ( $n = 600$ ) досліджував вплив щільності лісу (density, 45–70 %) і базової ймовірності займання (base-prob, 0,50–0,70) на масштаб пожежі за нейтральних умов середовища (moisture=50, wind-speed=0, slope=0).

*Експеримент 2* ( $n = 280$ ) досліджував вплив вологості середовища (moisture, 10–70%) і типу палива (conifer, deciduous) за фіксованої щільності лісу вище порогу перколяції (density=65).

*Експеримент 3* ( $n = 500$ ) досліджував вплив швидкості вітру (wind-speed, 0–20) і крутизни схилу (slope, 0–20) за density = 55, що відповідає критичній зоні перколяції моделі.

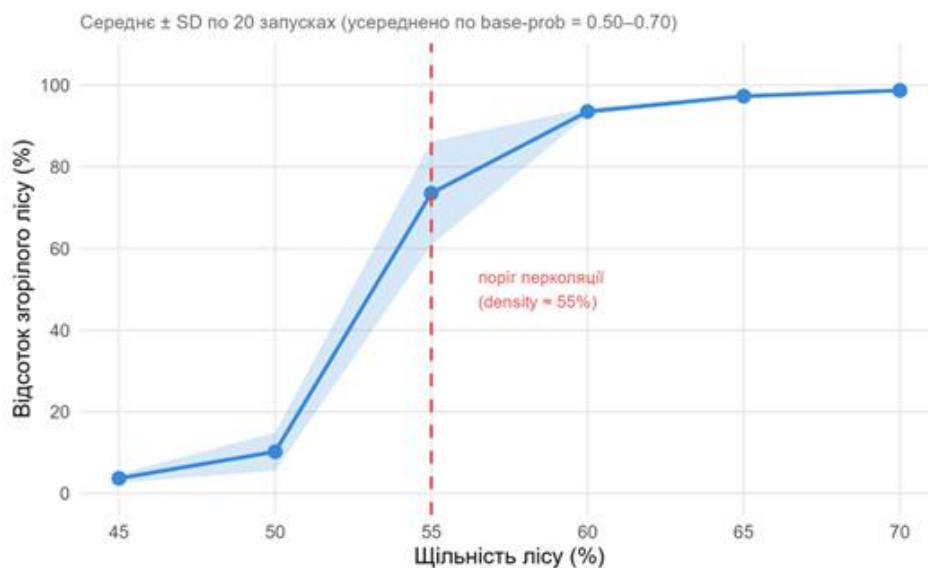
Статистичне опрацювання результатів здійснювалось у середовищі R версії 4.5.1 (R Core Team, 2025). Для кожної комбінації параметрів було розраховано показники описової статистики: середнє значення, стандартне відхилення (SD), мінімум, максимум і коефіцієнт варіації (CV). Для оцінки відносного впливу параметрів на масштаб пожежі використовувалась рангова кореляція Спірмена

як непараметричний метод, що не вимагає припущення про нормальність розподілу. Значущість відмінностей між групами перевірялась критерієм Крускала-Уолліса, для попарного порівняння типів палива – критерієм Манна-Уїтні. Рівень значущості  $\alpha = 0,05$ .

#### Результати дослідження та їх обговорення.

Верифікація моделі проводилася в три етапи, кожний з яких досліджував вплив окремої групи параметрів на масштаб модельованої пожежі.

*Експеримент 1* охопив 600 модельних запусків при варіюванні щільності лісу (density, 45–70 %) й базової ймовірності займання (base-prob, 0,50–0,70) за нейтральних умов середовища моделі. Було протестовано всі комбінації 6 рівнів щільності лісу та 5 рівнів базової ймовірності займання, з 20 повторними запусками на кожну комбінацію. Отримані результати продемонстрували виражений фазовий перехід у діапазоні щільності 50–55 %. Середня частка згорілої площі зростає з 10,3 % за density = 50 до 73,5 % за density = 55, тоді як за density  $\geq 60$  % модель стабілізується на рівні 93–99 % із коефіцієнтом варіації менше 1,2 % (рис. 1).



**Рис. 1.** Фазовий перехід у моделі поширення лісової пожежі залежно від щільності лісу

Характерною ознакою критичної зони є максимальна варіабельність результатів між запусками. Стандартне відхилення за щільності лісу 55 % сягає 13,2 %, тоді як поза пороговою зоною воно не перевищує 5 %. Така поведінка узгоджується з теоретичними уявленнями теорії перколяції для двовимірних ґраток і підтверджує коректність реалізації базового механізму поширення вогню в моделі (Christensen & Moloney, 2005). Для класичної моделі вузлової

**Fig. 1** Phase transition in the forest fire spread model depending on forest density

перколяції на квадратній ґратці з чотирисусіднім оточенням поріг перколяції становить  $p_c \approx 0,592$ , тоді як для восьмиусіднього оточення, реалізованого в даній моделі, він знижується до  $p_c \approx 0,407$  (Dutta et al., 2019). Оскільки діагональні зв'язки в моделі реалізовані з ослабленою ймовірністю (коефіцієнт відстані для діагональних сусідів  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ ), ефективна зв'язність системи проміжна між цими крайніми випадками, що дозволяє очікувати порогову

поведінку в інтервалі  $0,407 < p_c < 0,592$ . Виявлений у моделюванні перехід за щільності близько 55 % узгоджений із цим теоретичним діапазоном з урахуванням стохастичного характеру моделі.

В межах *Експерименту 1*, де варіювалися лише щільність лісу і базова ймовірність займання за нейтральних умов середовища, аналіз чутливості методом рангової кореляції Спірмена виявив, що щільність лісу – єдиний статистично значущий предиктор масштабу пожежі ( $\rho = 0,984$ ,  $p < 0,001$ ). Параметр базової ймовірності займання не продемонстрував статистично значущого зв'язку з результируючою змінною ( $\rho = 0,004$ ,  $p = 0,92$ ), що обґрунтовує його фіксацію на рівні 0,55 у подальших експериментах. Критерій Крускала-Уолліса підтвердив статистично значущі відмінності між рівнями щільності лісу ( $p < 0,001$ ).

*Експеримент 2* охопив 280 модельних запусків із варіюванням вологості середовища (moisture, 10–70 %) для двох типів палива – хвойного (conifer, коефіцієнт горючості flammability = 1,4) і листяного (deciduous, flammability = 1,0) – за фіксованої щільності лісу вище порогу перколяції (density = 65, base-prob = 0,6). Вибір хвойних і листяних порід як основних типів палива у моделі ґрунтується на суттєвих відмінностях у їхніх фізико-хімічних властивостях та поведінці під час горіння (Ворон та ін., 2024; Terrei et al., 2024). Висока пірогенність хвойних порід зумовлена інтенсивною емісією летких та легкозаймистих монотерпенів, які під час нагрівання і горіння діють як природні акселератори полум'я (Pallozzi et al., 2018).

Додатковим чинником інтенсифікації пожежі є наявність у тканинах енергоємної живиці (Шелюк та ін., 2024). Листяні породи зазвичай характеризуються вищою теплоємністю й вологомісткістю фітомаси та нижчим вмістом летких сполук. Вони формують менші запаси підстилки, що суттєво обмежує швидкість просування пожежі (Ворон та ін., 2024; Terrei et al., 2024). Ці уявлення узгоджуються з класичними підходами до моделювання пожежної поведінки, в яких тип палива розглядається як один із базових параметрів (Rothermel, 1972).

Результати *Експерименту 2* виявили якісно різну чутливість цих двох типів палива до вологості (рис. 2). Для листяного лісу зафіксовано різкий фазовий перехід у діапазоні 40–60 %. За вологості 40 % згорає 88,0 % площі, тоді як подальше зростання до 50 % і 60 % супроводжується різким спаданням частки згорілої площі. Висока варіабельність результатів у цій зоні (CV = 44,4 % за вологості 50 %) свідчить про нелінійну чутливість моделі до параметра вологості. Відтак, поблизу порогу поширення пожежі незначні випадкові фактори визначають, чи перетвориться вогнище на масштабну пожежу, чи згасне. Підвищення вологості середовища у цій моделі діє подібно до зростання імунітету дерев у моделях поширення лісових пожеж на основі клітинних автоматів, де критична точка розділяє активну фазу та фазу поглинання. В обох випадках зниження ймовірності займання від сусіднього вогнища призводить до критичного переходу між режимом масштабного поширення вогню та режимом його локалізації (Guisoni et al., 2011).

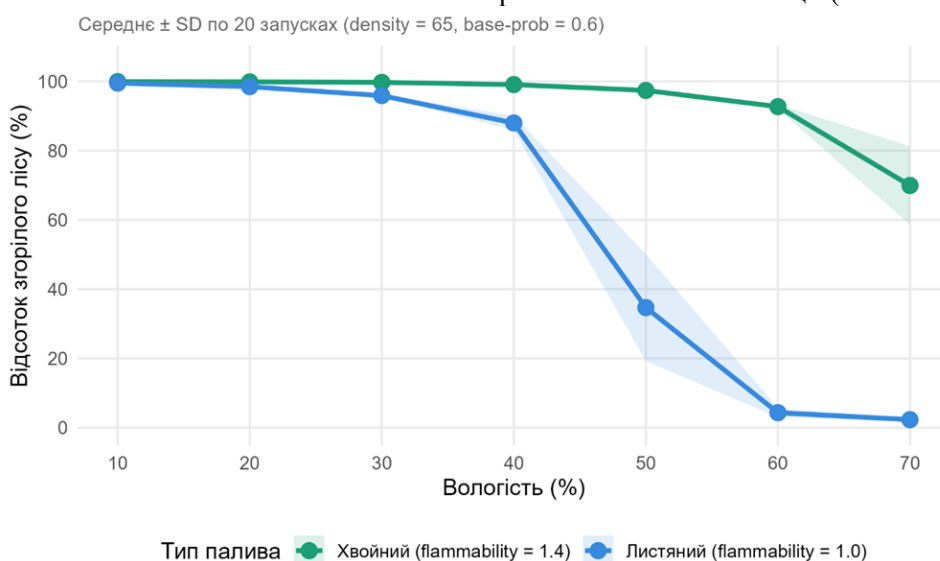


Рис. 2. Залежність згорілої площі від вологості середовища для хвойного і листяного типів палива

Fig. 2. Percentage of burned area as a function of environmental moisture for conifer and deciduous fuel types

Хвойний ліс демонструє принципово інший характер залежності – монотонне зниження без вираженого порогу. Навіть за максимальної вологості 70 % згоряє 69,9 % площі, що вказує на збереження надкритичного режиму поширення вогню. Це пояснюється фізичним механізмом: зростання вологості збільшує енергетичні витрати на випаровування води перед займанням, однак висока горючість хвойних порід забезпечує підтримання горіння при вологості, за якої листяне паливо вже не займається. Отримані результати узгоджуються з емпіричними даними про те, що вплив вологості на швидкість поширення не залежить від стану рослинності (Rossa & Fernandes, 2017), а нелінійний характер цього впливу підтверджується як лабораторними, так і польовими дослідженнями (Rossa, 2017).

Аналіз чутливості методом рангової кореляції Спірмена підтвердив значущий від’ємний зв’язок між вологістю та масштабом пожежі для обох типів палива (conifer:  $\rho = -0,988$ ,  $p < 0,001$ ;

density = 55, moisture = 50, conifer, n = 20 запусків на комбінацію

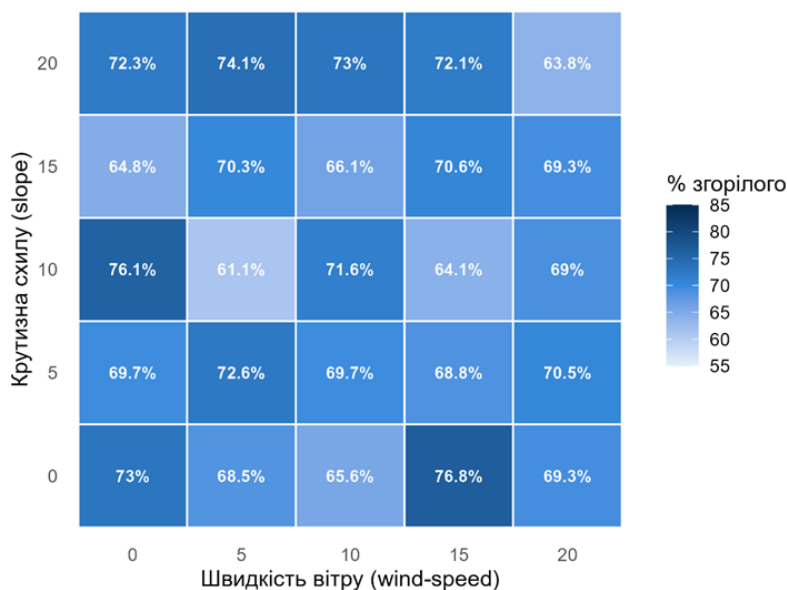


Рис. 3. Середня частка згорілої площі за різних комбінацій швидкості вітру та крутизни схилу

deciduous:  $\rho = -0,987$ ,  $p < 0,001$ ). Однакові значення  $\rho$  не відображають якісної відмінності між типами. Лінійний характер залежності для хвойного і наявність критичного порогу для листяного лісу виявляються лише при аналізі варіабельності та візуальному порівнянні кривих. Хвойний ліс залишається в надкритичному режимі протягом усього діапазону вологості, тоді як листяний переходить з надкритичного в субкритичний. Критерій Манна-Уїтні підтвердив статистично значущу відмінність між типами палива загалом ( $p < 0,001$ ).

Експеримент 3 охопив 500 модельних запусків із варіюванням швидкості вітру (wind-speed, 0–20) та крутизни схилу (slope, 0–20°) за фіксованих умов хвойного лісу в активній фазі поширення вогню (density = 55, moisture = 50, conifer, n = 20 запусків на комбінацію). Середня частка згорілої площі для всіх 25 комбінацій варіювала в діапазоні 61,1–76,8 % без вираженого систематичного тренду (рис. 3).

Fig. 3. Mean percentage of burned area for different combinations of wind speed and slope

Аналіз рангової кореляції Спірмена не виявив статистично значущого впливу жодного з параметрів: для швидкості вітру  $\rho = -0,065$  ( $p = 0,146$ ), для крутизни схилу  $\rho = -0,011$  ( $p = 0,802$ ). Високе стандартне відхилення  $SD = 7,2–21,2$  % свідчить про те, що варіабельність результатів зумовлена переважно стохастичною природою моделі, а не варіюванням параметрів. Отриманий результат теоретично очікуваний, адже мультиплікативна структура формули займання забезпечує асиметрію просторового поширення, але не змінює загального масштабу за умов, коли базова ймовірність вже перевищує поріг

перколяції. Він узгоджується з емпіричними даними про те, що у вітрозалежних пожежах швидкість вітру домінує над вологістю як чинник варіабельності (Rossa & Fernandes, 2017), тоді як у надкритичному режимі обидва параметри поступаються стохастичній динаміці поширення. На відміну від моделей з адитивним впливом вітру, де швидкість вітру позитивно корелює з площею згоряння (Pires et al., 2025), у нашій моделі з мультиплікативною формулою займання цей ефект статистично не підтверджений в активній фазі поширення. Вплив цих параметрів на динаміку поширення –

швидкість фронту та просторову асиметрію – залишається поза межами проведеного дослідження і потребує окремого аналізу з відповідними метриками. Зокрема, для коректної верифікації впливу вітру та рельєфу на поширення пожежі необхідне залучення просторових метрик, наприклад, ексцентриситету вогневої плями, орієнтації фронту відносно напрямку вітру та коефіцієнта форми згорілої площі. Наведені метрики здатні виявити анізотропію поширення навіть за відсутності значущих змін загального масштабу пожежі.

Отже, Експеримент 3 верифікує коректність поведінки моделі. Параметри швидкості вітру та схилу впливають на напрям та форму поширення пожежі, але не визначають її масштаб у надкритичному режимі в межах досліджуваних діапазонів.

**Висновки.** Здійснено параметризацію та часткову верифікацію розширеної агентної моделі поширення лісової пожежі на основі NetLogo Fire методом аналізу чутливості з використанням інструменту BehaviorSpace.

Підтверджено наявність критичного порогу перколяції за щільності лісу 55 %. Середня частка згорілої площі зростає з 10,3 % за щільності 50 % до 73,5% за щільності 55 %, а стандартне відхилення досягає максимуму 13,2 % саме в критичній зоні. Щільність лісу виявилася статистично значущим предиктором масштабу пожежі ( $\rho = 0,984$ ,  $p < 0,001$ ), тоді як базова ймовірність займання не справляє суттєвого впливу ( $\rho = 0,004$ ,  $p = 0,92$ ).

Встановлено якісно різну чутливість хвойного і листяного типів палива до вологості середовища. Для листяного лісу зафіксовано різкий фазовий перехід у діапазоні вологості 40–

60 %. Хвойний ліс демонструє монотонне зниження без вираженого порогу, навіть за максимальної вологості згоряє 69,9 % площі.

Не виявлено статистично значущого впливу швидкості вітру ( $\rho = -0,065$ ,  $p = 0,146$ ) та крутизни схилу ( $\rho = -0,011$ ,  $p = 0,802$ ) на масштаб пожежі в активній фазі поширення. Встановлено, що в надкритичному режимі варіабельність результатів зумовлена переважно стохастичною природою моделі, а не варіюванням цих параметрів. Ефективне масштабування коефіцієнтів вітру та рельєфу потребує подальшого доопрацювання.

Незважаючи на абстрактний характер і названі вище обмеження, розширена модель NetLogo Fire дозволяє якісно оцінювати відносний вплив окремих екологічних факторів на реалізацію ризику масштабної пожежі, визначити критичні порогові значення параметрів середовища та порівнювати сценарії розвитку пожежонебезпечної ситуації, що є достатнім для завдань первинного скринінгу екологічної небезпеки та обґрунтування превентивних заходів.

Для підвищення прогностичного потенціалу моделі подальші дослідження будуть зосереджені на калібруванні коефіцієнтів вітру та рельєфу у формулі займання, розширенні типології палива та валідація моделі на емпіричних даних реальних пожеж, що дозволить підвищити її прогностичний потенціал для завдань оцінювання екологічної небезпеки.

**Конфлікт інтересів.** Автор заявляє, що дослідження проводили за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.

### Список літератури:

1. Воробйов, А. І. (2025). Аналіз статистики лісових пожеж та їх впливу на клімат України за даними обробки матеріалів супутникових зйомок у глобальній інформаційній системі GWIS. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 12(1), 14–19. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.1.279>
2. Ворон, В. П., Кузик, А. Д., Івашинюта, С. В., & Ціпан, Ю. Р. (2024). Лісотипологічне оцінювання природної пожежної небезпеки лісів. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (27), 76–84. <https://doi.org/10.15421/412415>
3. Герасимчук, Д. О., Герасимчук, Л. О., Валерко, Р. А., Пацев, І. С., & Кириленко, Н. П. (2025). Екологічні ризики лісових пожеж в Україні з урахуванням кліматичних, антропогенних та воєнних детермінантів. *Екологічні науки*, 6(63), 216–220. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.34>
4. Шелюк, Ю. С., Астахова, Л. Є., & Осецька, Л. С. (2024). Смолоносні рослини різнотипних рослинних угруповань Центрального Полісся. *Український журнал природничих наук*, (7), 52–62.
5. Черногор, Л. Ф., Некос, А. Н., Тітенко, Г. В., & Черногор, Л. Л. (2024). Параметри та екологічні наслідки катастрофічних пожеж в Україні: моделювання, кількісні оцінки. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 42, 83–94. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-06>
6. Christensen, K., & Moloney, N. R. (2005). *Complexity and criticality*. Imperial College Press. <https://doi.org/10.1142/p365>
7. Driscoll, D. A., Armenteras, D., Bennett, A. F., Brotons, L., Clarke, M. F., Doherty, T. S., Haslem, A., Kelly, L. T., Sato, C. F., Sitters, H., Aquilué, N., Bell,

- K., Chadid, M., Duane, A., Meza-Elizalde, M. C., Giljohann, K. M., González, T. M., Jambhekar, R., Lazzari, J., Morán-Ordóñez, A., & Wevill, T. (2021). How fire interacts with habitat loss and fragmentation. *Biological Reviews*, 96(3), 976–998. <https://doi.org/10.1111/brv.12687>
8. Dutta, S., Sen, S., Khatun, T., Dutta, T., & Tarafdar, S. (2019). Euler number and percolation threshold on a square lattice with diagonal connection probability and revisiting the island–mainland transition. *Frontiers in Physics*, 7, 61. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00061>
  9. Guisoni, N., Loscar, E. S., & Albano, E. V. (2011). Phase diagram and critical behavior of a forest-fire model in a gradient of immunity. *Physical Review E*, 83(1), 011125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.011125>
  10. Kelley, D. I., Burton, C., Di Giuseppe, F., Jones, M. W., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., McNorton, J. R., Liu, Z., Bradley, A. S. I., Blackford, K., Burke, E., Ciavarella, A., Di Tomaso, E., Eden, J., Ferreira, I. J. M., Fiedler, L., Hartley, A. J., Keeping, T. R., Lampe, S., ... Kolden, C. A. (2025). State of wildfires 2024–2025. *Earth System Science Data*, 17, 5377–5488. <https://doi.org/10.5194/essd-17-5377-2025>
  11. Niazi, M. A., Siddique, Q., Hussain, A., & Kolberg, M. (2010). Verification & validation of an agent-based forest fire simulation model. In *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference* (Article 1, pp. 1–8). Society for Computer Simulation International. <https://doi.org/10.1145/1878537.1878539>
  12. Or, D., Furtak-Cole, E., Berli, M., Shillito, R., Ebrahimian, H., Vahdat-Aboueshagh, H., & McKenna, S. A. (2023). Review of wildfire modeling considering effects on land surfaces. *Earth-Science Reviews*, 245, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104569>
  13. Pallozzi, E., Lusini, I., Cherubini, L., Hajiaghayeva, R. A., Ciccio, P., & Calfapietra, C. (2018). Differences between a deciduous and a conifer tree species in gaseous and particulate emissions from biomass burning. *Environmental Pollution*, 234, 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.080>
  14. Pires, R., Torres, P., Valente, N. A., Solteiro Pires, E. J., Reis, A., Oliveira, P. D. M., & Barroso, J. (2025). Agent-based simulation of forest fire spread with NetLogo. In M. Antona & C. Stephanidis (Eds.), *HCI International 2025 – Late Breaking Papers* (pp. 212–224). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-12781-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-032-12781-5_14)
  15. R Core Team (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
  16. Rao, J. N., & Parsai, T. (2026). A review on wildfire-induced changes in soil and surface water chemistry. *Process Safety and Environmental Protection*, 207, 108343. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108343>
  17. Rossa, C. G. (2017). The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope. *International journal of wildland fire*, 26(1), 24–31. <http://dx.doi.org/10.1071/WF16049>
  18. Rossa, C. G., & Fernandes, P. M. (2017). On the effect of live fuel moisture content on fire-spread rate. *Forest systems*, 26(3), 12. <https://doi.org/10.5424/fs/2017263-12019>
  19. Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Research Paper INT-115). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/32533>
  20. Silva, J., Marques, J., Gonçalves, I., Brito, R., Teixeira, S., Teixeira, J., & Alvelos, F. (2022). A systematic review and bibliometric analysis of wildland fire behavior modeling. *Fluids*, 7, 374. <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>
  21. Terrei, L., Flity, H., Ikhrou, O., Trohel, G., Torero, J. L., Acem, Z., & Parent, G. (2024). Effect of the wood species on the fire behavior in vertical orientation. *Fire Safety Journal*, 148, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104234>
  22. Wilensky, U. (1997). NetLogo Fire model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fire>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
  23. Wilensky, U. (1999). *NetLogo* [Computer software]. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
  24. Young, B. A., Thompson, M. P., Moran, C. J., & Seielstad, C. A. (2025). Modeling neighborhoods as fuel for wildfire: A review. *Fire Technology*, 61, 5049–5071. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01773-3>

## References:

1. Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2024). Parameters and environmental consequences of catastrophic fires in Ukraine: modeling, quantitative estimates. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (42), 83–94. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-06> [In Ukrainian].
2. Christensen, K., & Moloney, N. R. (2005). *Complexity and criticality*. Imperial College Press. <https://doi.org/10.1142/p365>
3. Driscoll, D. A., Armenteras, D., Bennett, A. F., Brotons, L., Clarke, M. F., Doherty, T. S., Haslem, A., Kelly, L. T., Sato, C. F., Sitters, H., Aquilué, N., Bell, K., Chadid, M., Duane, A., Meza-Elizalde, M. C., Giljohann, K. M., González, T. M., Jambhekar, R., Lazzari, J., Morán-Ordóñez, A., & Wevill, T. (2021). How fire interacts with habitat loss and fragmentation. *Biological Reviews*, 96(3), 976–998. <https://doi.org/10.1111/brv.12687>
4. Dutta, S., Sen, S., Khatun, T., Dutta, T., & Tarafdar, S. (2019). Euler number and percolation threshold on a square lattice with diagonal connection probability and revisiting the island–mainland transition. *Frontiers in Physics*, 7, 61. <https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00061>

5. Guisoni, N., Loscar, E. S., & Albano, E. V. (2011). Phase diagram and critical behavior of a forest-fire model in a gradient of immunity. *Physical Review E*, 83(1), 011125. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.011125>
6. Herasymchuk, D. O., Herasymchuk, L. O., Valerko, R. A., Patsev, I. S., & Kyrylenko, N. P. (2025). Environmental risks of forest fires in Ukraine considering climatic, anthropogenic, and warfare-related determinants. *Ecological Sciences*, 6(63), 216–220. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.34> [In Ukrainian].
7. Kelley, D. I., Burton, C., Di Giuseppe, F., Jones, M. W., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., McNorton, J. R., Liu, Z., Bradley, A. S. I., Blackford, K., Burke, E., Ciavarella, A., Di Tomaso, E., Eden, J., Ferreira, I. J. M., Fiedler, L., Hartley, A. J., Keeping, T. R., Lampe, S., ... Kolden, C. A. (2025). State of wildfires 2024–2025. *Earth System Science Data*, 17, 5377–5488. <https://doi.org/10.5194/essd-17-5377-2025>
8. Niazi, M. A., Siddique, Q., Hussain, A., & Kolberg, M. (2010). Verification & validation of an agent-based forest fire simulation model. In *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference* (Article 1, pp. 1–8). Society for Computer Simulation International. <https://doi.org/10.1145/1878537.1878539>
9. Or, D., Furtak-Cole, E., Berli, M., Shillito, R., Ebrahimian, H., Vahdat-Aboueshagh, H., & McKenna, S. A. (2023). Review of wildfire modeling considering effects on land surfaces. *Earth-Science Reviews*, 245, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104569>
10. Pallozzi, E., Lusini, I., Cherubini, L., Hajiaghayeva, R. A., Ciccio, P., & Calfapietra, C. (2018). Differences between a deciduous and a conifer tree species in gaseous and particulate emissions from biomass burning. *Environmental Pollution*, 234, 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.080>
11. Pires, R., Torres, P., Valente, N. A., Solteiro Pires, E. J., Reis, A., Oliveira, P. D. M., & Barroso, J. (2025). Agent-based simulation of forest fire spread with NetLogo. In M. Antona & C. Stephanidis (Eds.), *HCI International 2025 – Late Breaking Papers* (pp. 212–224). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-12781-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-032-12781-5_14)
12. R Core Team (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
13. Rao, J. N., & Parsai, T. (2026). A review on wildfire-induced changes in soil and surface water chemistry. *Process Safety and Environmental Protection*, 207, 108343. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.108343>
14. Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Research Paper INT-115). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/32533>
15. Rossa, C. G. (2017). The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope. *International journal of wildland fire*, 26(1), 24–31. <http://dx.doi.org/10.1071/WF16049>
16. Rossa, C. G., & Fernandes, P. M. (2017). On the effect of live fuel moisture content on fire-spread rate. *Forest systems*, 26(3), 12. <https://doi.org/10.5424/fs/2017263-12019>
17. Shelyuk, Y. S., Astakhova, L. E., & Osetska, L. S. (2024). Resin-bearing plants of various types of plant communities of the Central Polissia. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (7), 52–62. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.6> [In Ukrainian].
18. Silva, J., Marques, J., Gonçalves, I., Brito, R., Teixeira, S., Teixeira, J., & Alvelos, F. (2022). A systematic review and bibliometric analysis of wildland fire behavior modeling. *Fluids*, 7, 374. <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>
19. Terrei, L., Flity, H., Ikhrou, O., Trohel, G., Torero, J. L., Acem, Z., & Parent, G. (2024). Effect of the wood species on the fire behavior in vertical orientation. *Fire Safety Journal*, 148, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104234>
20. Vorobiev, A. (2025). Analysis of Forest Fire Statistics and Their Impact on Ukraine's Climate Based on Satellite Imagery Data Processing in the Global Information System GWIS. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(1), 14–19. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.1.279> [In Ukrainian].
21. Voron, V. P., Kuzyk, A. D., Ivashyniuta, S. V., & Tsipan, Y. R. (2024). Forest fire hazard assessment based on forest typology. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, (27), 76–84. <https://doi.org/10.15421/412415> [In Ukrainian].
22. Wilensky, U. (1997). NetLogo Fire model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fire>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
23. Wilensky, U. (1999). NetLogo [Computer software]. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
24. Young, B. A., Thompson, M. P., Moran, C. J., & Seielstad, C. A. (2025). Modeling neighborhoods as fuel for wildfire: A review. *Fire Technology*, 61, 5049–5071. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01773-3>

# PARAMETERIZATION AND VERIFICATION OF A FOREST FIRE AGENT-BASED MODEL AS A TOOL FOR ECOLOGICAL HAZARD ASSESSMENT

A. V. Zhuk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
2 Kotsyubynskoho Str., Chernivtsi, Ukraine, 58012  
e-mail: [a.zhuk@chnu.edu.ua](mailto:a.zhuk@chnu.edu.ua)

*This paper presents the results of parameterization and sensitivity-based verification of an extended agent-based forest fire spread model built on the NetLogo Fire platform. The model incorporates five controllable parameters – environmental moisture, wind speed, wind direction, slope gradient, and fuel type – through a multiplicative ignition probability formula. Verification was conducted using a BehaviorSpace sensitivity analysis across three experimental series, totaling 1,380 simulation runs. A critical percolation threshold was identified at forest density of approximately 55%, consistent with theoretical predictions for two-dimensional lattices with Moore neighborhood connectivity. Forest density was found to be the sole statistically significant predictor of fire extent ( $\rho = 0.984$ ,  $p < 0.001$ ). The two fuel types exhibited qualitatively distinct responses to moisture: deciduous forest showed a sharp phase transition in the 40–60% moisture range, while conifer forest showed a monotonic decline without a distinct threshold, maintaining active fire spread even at maximum moisture levels. The effects of wind speed and slope on fire extent were not statistically confirmed under supercritical conditions, identifying a direction for further model refinement. The verified model is suitable for preliminary ecological hazard screening and comparative scenario analysis of wildfire risk.*

*Keywords: agent-based modeling, NetLogo, forest fire spread, cellular automaton, spatiotemporal dynamics, ecological hazard*

*Отримано редколегією 18.04.2026 р.  
Підписано до друку 15.06.2026 р.  
Дата публікації 30.06.2026 р.*

## ORCID ID

Аліна Жук: <https://orcid.org/0000-0002-0405-8037>