

## ЗАСТОСУВАННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

О.А. Стригіна, В.О. Дирда, В.А. Непочатенко,  
С.В. Пенькова, Н.В. Комарова

*Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)  
e-mail: oksana9269@ukr.net; ORCID: 0009-0007-6670-726X  
e-mail: viktoryd5706@gmail.com; ORCID: 0009-0005-4667-8540  
e-mail: Victor Nepochatenko; ORCID: 0000-0001-6798-7880  
e-mail: svitlana1986r@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6256-3122  
e-mail: komarova\_nv@ukr.net; ORCID: 0000-0002-9347-455X*

*У статті подано ґрунтовний огляд сучасних підходів до застосування фізико-математичних моделей у сфері лісового господарства, що є важливим інструментом для наукового аналізу та практичного управління лісовими екосистемами. Розглянуто ключові напрями використання моделей, зокрема для дослідження росту, розвитку та структури лісових насаджень, прогнозування змін у складі та обсягах лісових ресурсів, а також для оцінювання довгострокового впливу кліматичних чинників на стабільність лісових екосистем. Значну увагу приділено моделюванню природних загор, як-от лісові пожежі, ерозійні процеси та деградація ґрунтів, що мають критичне значення для забезпечення екологічної безпеки. У статті здійснено класифікацію фізико-математичних моделей за типами, рівнями складності та сферами застосування. Проаналізовано їх переваги, зокрема здатність до точного відтворення природних процесів, а також обмеження, пов'язані з необхідністю якісних вхідних даних і складністю адаптації до конкретних умов. Окремо розглянуто можливості інтеграції моделей із геоінформаційними системами (ГІС) та методами дистанційного зондування Землі, що відкриває нові перспективи для просторового аналізу та моніторингу лісових територій. Узагальнено результати актуальних наукових досліджень, які підтверджують ефективність математичного моделювання для підвищення точності екологічних прогнозів, планування лісогосподарських заходів і прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Зроблено висновок про необхідність розвитку міждисциплінарних підходів, активного впровадження цифрових технологій та посилення науково-практичної співпраці для забезпечення сталого управління лісовими екосистемами в умовах глобальних змін. Акцентовано увагу на впровадженні автоматизованих систем управління, що інтегрують різні технологічні рішення для забезпечення безперервного моніторингу лісів, що передбачає контроль за вирубкою, боротьбу з лісовими пожежами та збереження біорізноманіття. Визначено, що стійке лісове господарство потребує глибокої інтеграції екології, кліматології, генетики, інформаційних технологій і соціальних наук. Використання цих технологій допомагає ефективно моніторити великі та важкодоступні лісові території, забезпечуючи точні дані про стан лісів, виявлення змін у вегетації та ранніх ознак екологічних стресів. Це сприяє своєчасному реагуванню на екологічні зміни й мінімізації негативного впливу на лісові екосистеми.*

**Ключові слова:** оптимізація лісочористування, моделювання мікроклімату лісу, евапотранспірація, моделювання екосистем, конвекція, теплопровідність, геоінформаційні системи, прогнозування, моніторинг, дистанційне зондування Землі.

### ВСТУП

Лісове господарство — це комплексна галузь, яка охоплює не лише біологічні та екологічні аспекти, а й активно використовує фізико-математичні методи для про-

гнозування, оптимізації та оцінки стану лісових екосистем. Фізичні явища, як-от передача тепла, вологість, вітрові навантаження та світловий режим у лісі, істотно впливають на розвиток лісів. Їх моделювання за допомогою математичних рівнянь дає можливість створювати точні цифрові

інструменти для управління лісами. Одними з найбільш застосовуваних для аналітики в аграрному секторі економіки є клас лінійних оптимізаційних моделей. Традиційно, у контексті таких моделей розглядаються завдання максимізації прибутку або мінімізації можливих витрат. Істотними перевагами застосування даного класу економіко-математичних моделей є їх універсальність, відносна простота реалізації, відсутність потреби у використанні потужної матеріально-технічної бази. Важливим недоліком цього підходу є обмеженість отриманих результатів та відносно високий ризик неадекватності моделі внаслідок застосування різноманітних параметрів [1].

**Метою даної оглядової статті** є систематизація та аналіз сучасних підходів до застосування фізико-математичних моделей у лісовому господарстві, визначення їх переваг, обмежень і напрямів подальшого розвитку. Особливу увагу приділити міждисциплінарним аспектам моделювання та інтеграції фізико-математичних методів із сучасними цифровими технологіями управління лісовими ресурсами.

### **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Лісове господарство є однією з ключових галузей природокористування, яка відіграє важливу роль у забезпеченні екологічної стабільності, збереженні біорізноманіття та формуванні сталого розвитку територій. У сучасних умовах зростаючого антропогенного навантаження, кліматичних змін і необхідності раціонального використання природних ресурсів виникає потреба у впровадженні науково обґрунтованих методів управління лісовими екосистемами. Т.П. Лозінська зі співавт. [2] розглянули вплив новітніх технологій на підвищення ефективності лісогосподарської діяльності та покращання стану лісових екосистем, а також ключове значення у сталому розвитку лісів. Окреслено важливість стійкого ведення лісового господарства в умовах зміни клімату, зосереджуючись на необхідності інтеграції сучасних технологій для ефективного управління

лісовими ресурсами. Основну увагу приділено використанню дистанційного зондування та геоінформаційних систем (ГІС), які дають можливість моніторити стан лісів і виявляти ранні ознаки стресу в лісових екосистемах. Ці технології сприяють своєчасному реагуванню на екологічні зміни, зменшуючи негативні впливи на лісове господарство. Додатково розглянуто методи селекції та використання деревних видів, адаптованих до змінюваних кліматичних умов, що підвищують стійкість лісових насаджень до майбутніх змін клімату. Одним із найефективніших інструментів для цього є застосування фізико-математичних моделей, що дають змогу формалізувати складні природні процеси, описати їх кількісно та здійснювати прогнозування на різних просторово-часових рівнях. В.А. Свинчук та ін. розглянули математичні моделі об'єму деревних стовбурів основних лісоутворювальних порід України [3].

Фізико-математичне моделювання у лісовому господарстві охоплює широкий спектр завдань — від оцінки росту деревостанів і динаміки запасів деревини до аналізу впливу кліматичних чинників, прогнозування лісових пожеж. Т.П. Лозінська зі співавт. [4; 5] вказали на своєчасний моніторинг і виявлення пожеж за допомогою сучасних технологій, що дають змогу швидко виявляти загоряння та оцінювати ситуацію. Важливим є використання супутникових даних для фіксації гарячих точок і аналізу масштабу пожеж та систем відеоспостереження, використання безпілотників для патрулювання великих територій і виявлення пожеж у важкодоступних місцях та прогнозування пожежо-небезпечних умов (температура, вологість, вітер) для визначення зон ризику. Розглянуто питання оперативного реагування на виникнення лісових пожеж та вчасного їх гасіння, як ручного, так із залученням технологій. Також було розроблено стратегію для збереження біорізноманіття лісів через ідентифікацію ключових видів, вивчення впливу антропогенних чинників та розробку природоохоронних заходів. Очікувані результати включають підвищення збере-

ження видів, зменшення негативного впливу антропогенних чинників, відновлення лісових ділянок та залучення місцевих громад до природоохоронних заходів. Застосування таких моделей сприяє оптимізації лісокористування, плануванню відновлювальних робіт та підвищенню ефективності моніторингу стану лісів [4; 5].

Математичне моделювання вже давно є одним із провідних напрямів у лісовій науці, однак саме стрімкий розвиток обчислювальної техніки та прикладних математичних методів у другій половині ХХ – початку ХХІ ст. спричинив істотне зростання інтересу до моделювання процесів у лісових екосистемах. У таких країнах, як США й Канада, моделювання давно інтегроване у систему управління лісами є невід’ємним інструментом прогнозування динаміки деревостанів, оцінювання продуктивності та планування лісогосподарських заходів. Н.Е. Burkhardt та М. Томé [6] досліджували моделювання росту лісу на основі функціонально-структурного моделювання та його потенціалу для застосування в лісовому господарстві. Модель GreenLab використовується для цієї мети завдяки її обчислювальній продуктивності, можливості калібрування на реальних рослинах та її поширенню на рівень насаджень. Н. Pretzsch [7] крони дерев моделює на основі видових функцій (розрізняючи освітлені сонцем та тіньові частини крони), тоді як стовбури дерев моделюються відповідно до вдосконаленої функції Крау Клауса фон Гадова (ця функція добре узгоджується з теоретичною формою стовбура: нижня частина як усічений неолід, середня частина як усічений параболоїд, а верхня частина як конус).

О.М. Адамовський [8] розглянув теорію та практику сталого лісокористування: поняття і принципи, сутність поняття «сталі екосистеми», системний підхід до менеджменту екосистем, еколого-економічну ефективність багатопільового використання лісових ресурсів, урахування чинника часу і невизначеності в процесі оцінювання послуг лісових екосистем, еколого-економічні особливості лісокористування

у гірських районах Карпат. За розгляду методів оптимізації комплексного лісокористування досліджено об’єкти та критерії оптимізації лісокористування, роль економіко-математичного моделювання в оптимізації лісокористування, економічну оцінку лісових ресурсів, методи багатокритеріальної оптимізації, принципи лісового менеджменту, чинники впливу на еколого-економічну ефективність лісокористування, функції потенціалу лісових ресурсів, оптимізацію лісокористування на основі вибору альтернативних варіантів, інтегральний еколого-економічний ефект багатопільового лісокористування. Прикладні аспекти оптимізації лісокористування розкриваються в оптимізації обороту рубки на основі вибору альтернативних варіантів, розрахунку еколого-економічної ефективності лісокористування в гірських умовах Карпат, застосуванні методу Фаустмана для еколого-економічної оцінки лісокористування, еколого-економічної оцінки заходів щодо покращання стану зелених насаджень міст.

Лісові пожежі можуть призводити до серйозних змін у структурі та функціонуванні лісових екосистем, включаючи порушення сталого природного балансу, зміну породного складу та деградацію біорізноманіття. У таких умовах необхідне впровадження ефективних заходів із попередження та моніторингу пожежної небезпеки, зокрема оцінки природних і антропогенних чинників їх виникнення, класифікації територій за рівнем ризику та визначення пріоритетних зон для лісозахисних заходів.

S. Shevchuk та V. Chuvpylo [9] розглядають важливу складову системи моніторингу – це застосування методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій. Використання супутникових даних дає змогу оперативно виявляти осередки займання, оцінювати масштаби пожежі та її вплив на лісові масиви. Це забезпечує науково обґрунтований підхід до аналізу лісових пожеж, сприяє ефективному реагуванню на надзвичайні ситуації та формуванню стратегії відновлення постраждалих територій.

В. Зацерковний із співавт. [10] для дослідження лісових територіальних комплексів дедалі більше отримують від дистанційних методів збору та реєстрації інформації з подальшою обробкою отриманих даних. Цьому значною мірою сприяє запуск серії природоресурсних супутників Землі з апаратурою зондування підстилаючої поверхні у видимому, інфрачервоному й радіохвильовому діапазонах електромагнітного випромінювання малого, середнього та високого розширення.

В.В. Миронюк [11] використовує дані ДЗЗ для потреб лісового господарства за такими напрямками: контроль знеліснення, інвентаризація лісу, виявлення значних ушкоджень лісових масивів, моніторингу лісових пожеж. А О.В. Барабаш і О.І. Бандурка [12] розглянули моделювання лісових пожеж на основі прогностичної моделі Байеса та геоінформаційних технологій. Метою моніторингу лісових пожеж є: оцінка пожежної небезпеки; спостереження за динамікою поширення та розвитку пожеж; визначення площі уражень і стеження за післяпожежною динамікою. Технологія моніторингу лісових пожеж передбачає виконання таких етапів: пошук джерел загоряння; виявлення та ідентифікація лісових пожеж, що виникають; розпізнавання й діагностика лісових пожеж; прогнозування їх поширення та розвитку; вибір і прийняття оптимального управлінського рішення щодо гасіння пожеж; оцінка та прогнозування наслідків лісових пожеж.

Модель 3-PG (Фізіологічні процеси, що прогнозують ріст) була розроблена Ландсбергом та Варінгом (1997). Вона створена для подолання розриву між традиційними моделями росту та врожайності, що базуються на вимірюваннях, та моделями вуглецевого балансу, що ґрунтуються на процесах. Вихідні змінні, які вона створює, становлять інтерес та є актуальними для лісових менеджерів. 3-PG розраховує променисту енергію, що поглинається лісовими пологами, та перетворює її на виробництво біомаси. Ефективність перетворення випромінювання змінюється впливом харчування, ґрунтової посухи (модель включає

безперервний розрахунок водного балансу), дефіциту тиску атмосферної пари та віку насадження. 3-PG можна використовувати для оцінки потенціалу ділянки та аналізу ймовірного впливу різних умов вирощування або управлінських дій, як-от проріджування або удобрення. Він має значний потенціал як інструмент для оцінки поглинання вуглецю лісами та плантаціями і зарекомендував себе як цінний навчальний інструмент [13].

Тому, у сучасних умовах перед лісовою наукою України постає важливе завдання – систематизувати міжнародний досвід застосування математичного моделювання та інтегрувати його у вітчизняні дослідницькі й управлінські процеси, що дасть можливість підвищити ефективність прогнозування, планування та охорони лісових екосистем.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**1. Моделювання мікроклімату лісу.** Однією з ключових фізичних завдань у лісовому господарстві є моделювання мікроклімату лісових насаджень. Важливими змінними тут є температура повітря і ґрунту, вологість, сонячна радіація, тепло- та масообмінні процеси.

Для моделювання використовуються рівняння теплопровідності, рівняння Нав'є-Стокса (для опису повітряних потоків), а також моделі радіаційного балансу:

$$\partial T / \partial t = \alpha \nabla^2 T + Q, \quad (1)$$

де  $T$  – температура;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності,  $Q$  – джерело тепла (наприклад, сонячне випромінювання).

Такі моделі дають змогу прогнозувати зміни кліматичних умов у лісі та їхній вплив на ріст дерев.

**Приклад. Модель Penman-Monteith** для розрахунку евапотранспірації (випаровування з поверхні ґрунту та листя) – важливий компонент водного балансу лісу.

$$ET = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}, \quad (2)$$

де  $ET$  — евапотранспірація (мм/добу);  $Rn$  — чиста радіація (Вт/м<sup>2</sup>);  $G$  — тепловий потік у ґрунт;  $\Delta$  — нахил кривої насичення пари;  $T$  — психрометрична константа;  $u_2$  — швидкість вітру (м/с);  $e_s - e_a$  — дефіцит вологості повітря.

Цю модель активно використовують в агролісівництві для планування поливу.

Розглянемо приклад застосування моделювання мікроклімату смерекових лісів Українських Карпат для оцінки стійкості до всихання. У Карпатах науковці та лісівники використовують моделі мікроклімату, щоб оцінити, як температура повітря, вологість, сонячна радіація та швидкість вітру змінюються під пологом лісу на різних висотах і експозиціях схилів. Для цього поєднують дані метеостанцій, лісових датчиків температури й вологості ґрунту, цифрові моделі рельєфу та інформацію про зімкнутість крон. На основі цих даних будують просторові моделі, які показують, де в лісі виникають зони підвищеного теплового та водного стресу для ялини європейської.

Результати моделювання застосовують для прогнозування ризику всихання та коронних спалахів, а також для планування вибіркових рубок і зміни породного складу. Практичний ефект полягає в тому, що лісгоспи можуть зберігати прохолодніші та вологіші мікроділянки, залишаючи захисні групи дерев і зменшуючи суцільні вирубки.

**2. Фізика росту дерев та моделі біомаси.** Для оцінки росту дерев використовуються моделі акумуляції біомаси, які базуються на фізичних законах фотосинтезу та транспірації. Світловий режим, розподіл сонячного випромінювання в кроні, ефективність використання світла описуються через модель Монте-Карло для розсіювання світла та модель фотосинтетично активної радіації (PAR).

Математично приріст біомаси можна описати як:

$$dB/dt = Pn - R, \quad (3)$$

де  $B$  — біомаса;  $Pn$  — чиста продукція фотосинтезу;  $R$  — витрати на дихання.

**Приклад. Модель 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth).**

Це процесно-орієнтована модель росту дерев, що враховує фотосинтез, температуру, вологість ґрунту, щільність насадження. Ключове рівняння моделі:

$$NPP = f_{env} \cdot \epsilon \cdot APAR, \quad (4)$$

де  $NPP$  — чиста первинна продукція (т/га);  $\epsilon$  — ефективність використання PAR (photosynthetically active radiation);  $APAR$  — абсорбована PAR;  $f_{env}$  — модифікатори навколишнього середовища (температура, CO<sub>2</sub>, вода).

Застосування: прогноз приросту лісу у відповідь на кліматичні зміни.

**3. Моделі поширення вогню в лісі.** Фізичне моделювання пожежі в лісі базується на теплопереносі, масообміні та хімічних реакціях горіння. Основні типи моделей: емпіричні — ґрунтуються на статистичних даних та фізико-математичні — враховують перенесення тепла (конвекція, теплопровідність, радіація).

Один із прикладів — модель Роттерама:

$$R = I_R / (\rho_b \cdot \epsilon \cdot Q_{ig}), \quad (5)$$

де  $R$  — швидкість фронту пожежі;  $I_R$  — інтенсивність тепловиділення,  $\rho_b$  — щільність пального;  $\epsilon$  — ефективність поглинання;  $Q_{ig}$  — теплота запалювання.

**Приклад. Модель FARSITE (Fire Area Simulator).**

FARSITE — широко застосовується у США для прогнозу розповсюдження пожеж у реальному часі. Вона поєднує фізику теплопередачі, вітру та горіння.

Основи: модель розраховує еліптичне розширення фронту вогню з урахуванням рельєфу, вологості та пального.

В основі лежить розширення моделі Роттерама:

$$R = R_0 + \varphi_w + \varphi_s, \quad (6)$$

де  $R$  — швидкість поширення пожежі;  $R_0$  — базова швидкість;  $\varphi_w$ ,  $\varphi_s$  — поправки на вітер і нахил місцевості.

Такі моделі використовуються у GIS-системах для прогнозування розповсюдження пожеж.

**4. Механіка деревини та вітрові навантаження.** Фізичні моделі також застосовуються для аналізу стійкості дерев до вітру. Деревя розглядаються як пружні стрижні, що деформуються під дією вітрових сил. Тут використовуються рівняння пружності, моменти інерції та граничні умови:

$$EI((d^4y)/(dx^4)) = q(x), \quad (7)$$

де  $E$  — модуль пружності деревини;  $I$  — момент інерції стовбура;  $q(x)$  — навантаження від вітру.

Ці моделі дають змогу проектувати стійкі лісосмуги та захисні насадження.

**Приклад. ForestGALES** — модель для оцінки ризику повалення дерев під дією вітру.

Вона включає фізичну модель моменту сили вітру та деформацію дерева як балки на пружній основі.

Математична основа:

$$M = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot h \cdot u^2, \quad (8)$$

де  $M$  — момент згинання;  $C_d$  — коефіцієнт опору;  $\rho$  — густина повітря;  $A$  — проєкційна площа крони;  $h$  — висота дерева;  $U$  — швидкість вітру.

Застосування: прогноз втрат у лісі після буревіїв.

Розглянемо приклад *моделювання мікроклімату соснових і мішаних лісів Полісся для оцінки пожежної небезпеки та водного режиму*. У лісах Полісся основну увагу приділяють моделюванню температури повітря і ґрунту, вологості та руху повітря під пологом соснових насаджень на піщаних і торфових ґрунтах. Для опису прогрівання ґрунту та підстилки застосовують рівняння теплопровідності, яке допомагає оцінити, як тепло поширюється в піщаних ґрунтах і торфовищах упродовж доби та сезону. Рух повітря під кронами та на узліссях описують спрощеними формами рівнянь Нав'є-Стокса, що дає змогу змоделювати швидкість і напрямок повітряних потоків, які впливають на висушування підстилки. Одночасно використовують моделі радіаційного балансу, що враховують надходження сонячної радіації, її поглинання кронами сосни, відбиття від ґрунту та теп-

лове випромінювання в атмосферу. Вхідними даними для моделі є метеорологічні спостереження, зімкнутість крон, висота дерев, тип ґрунту, рівень ґрунтових вод і вологість підстилки. Результатом моделювання є карти температури та вологості під пологом лісу, а також зони з підвищеним ризиком пересихання підстилки й виникнення лісових пожеж. Практично це дає можливість лісгоспам Полісся оптимізувати протипожежні заходи, планувати зволоження торфовищ і регулювати густоту насаджень для збереження сприятливого мікроклімату.

**5. Використання чисельного моделювання та симуляцій.** Складні фізичні процеси, як-от атмосферна циркуляція, поглинання  $CO_2$  або фільтрація вологи в ґрунті моделюються за допомогою:

- скінченно-різницевих і скінченно-елементних методів (FDM, FEM);
- симуляцій у середовищах типу MATLAB, COMSOL, OpenFOAM;
- комп'ютерних моделей екосистем (наприклад, 3-PG, ForestGALES).

Розглянемо як приклад *світлові моделі в кроні дерева*: Ray-tracing (трасування променів) для моделювання світлового потоку в кроні. Застосовується для оцінки фотосинтетично активного випромінювання (PAR) та прогнозу затінення у багаторівневих насадженнях.

Моделі будуються на основі геометричної оптики з розрахунком кута падіння променя, його інтенсивності та коефіцієнта поглинання. Це допомагає створювати точні прогнози для довготривалого управління лісами.

## ВИСНОВКИ

Фізико-математичне моделювання є важливим інструментом наукового аналізу та управління процесами у лісовому господарстві. Використання математичних моделей дає змогу комплексно оцінювати стан лісових екосистем, прогнозувати їх розвиток під впливом природних і антропогенних чинників, а також оптимізувати процеси лісокористування й відновлення.

Встановлено, що серед найпоширеніших напрямів моделювання у лісовому господарстві є: моделювання росту деревостанів і запасів деревини, прогнозування лісових пожеж, аналіз впливу кліматичних змін, а також дослідження гідрологічних і ґрунтових процесів. Ефективність таких підходів значно підвищується за умов інтеграції моделей із геоінформаційними системами, технологіями дистанційного зондування Землі та сучасними інструментами штучного інтелекту.

Огляд літературних джерел засвідчив, що розвиток фізико-математичного

моделювання у лісовій галузі потребує подальшого вдосконалення теоретичних засад, адаптації моделей до регіональних природно-кліматичних умов України та розширення бази емпіричних даних для підвищення точності прогнозів.

Отже, впровадження фізико-математичних моделей у практику лісового господарства є перспективним напрямом, що сприяє підвищенню наукової обґрунтованості управлінських рішень, забезпеченню сталого використання лісових ресурсів та збереженню екологічної рівноваги в природних системах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Степенко, С., & Лазаренко, І. (2021). Застосування економіко-математичного моделювання для аналізу у галузі сільського господарства. *Економіка та суспільство*, (33). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-33>.
2. Лозінська, Т. П., Задорожний, А. І., & Масальський, В. П. (2024). Дослідження нових технологій та інновацій у сфері лісового господарства. *Агробіологія*, 1, 268–276. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-187-1-268-276>.
3. Свинчук, В. А., Кашпор, С. М., & Миронюк В. В. (2014). Математичні моделі об'єму деревних стовбурів основних лісоутворювальних порід України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво*, 198(2), 58–64. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu\\_lis\\_2014\\_198\(2\)](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_lis_2014_198(2)).
4. Лозінська, Т. П., Ситник, О. С., & Велика, К. І. (2024). Огляд і аналіз основних аспектів протипожежного захисту лісових екосистем в умовах сьогодення. *Агробіологія*, 2, 144–153. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2024-191-2-144-153>.
5. Лозінська, Т. П. (2025). Збереження біорізноманіття в лісових екосистемах для підтримання екологічної рівноваги та забезпечення сталого розвитку. *Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* (с. 31–33). Ломжа — Малин.
6. Burkhart, H. E., & Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands* (2<sup>nd</sup> ed.). (pp. 55–198). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5320-2>.
7. Pretzsch, H. (2019). *Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model* (2<sup>nd</sup> ed.). (pp. 101–276).
8. Адамовський, О. М. (2015). Оптимізація лісокористування в економічних дослідженнях (зарубіжний досвід). *Наук. вісник УкрДЛТУ: до 125-річчя УкрДЛТУ*, 10(2), 168–173.
9. Shevchuk, S., Chuvpylo, V., Gapon, S., Nahorna, S., & Kuryshko, R. (2024). The use of GIS for ecological and landscape land management of human settlements. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research.*, 14(1), 200–203. DOI: <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
10. Зацерковний, В., Савков, П., Пампуха, І. & Васецька, К. (2020). Застосування технологій ГІС та ДЗЗ в задачах моніторингу лісових пожеж. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер.: Військово-спеціальні науки*, 2(44), 54–58. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2020.44.54-58>.
11. Миронюк, В. В. (2020). *Інвентаризація рівнинних лісів України за даними супутникової зйомки: моногр.* Харків: АТ «Харківська книжкова фабрика «ГЛОБУС». URL: [https://www.researchgate.net/profile/Viktor-Myroniuk/publication/346788204\\_Invemonografia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Viktor-Myroniuk/publication/346788204_Invemonografia.pdf).
12. Барабаш, О. В., & Бандурка, О. І. (2022). Моделювання лісових пожеж на основі прогностичної моделі Байеса та геоінформаційних технологій. *Сучасні інформаційні системи*, 6(1), 19–28. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.03>.
13. 3PG Model: *Physiological principles predicting growth (3-PG) model homepage*. University of British Columbia. URL: <https://3pg.forestry.ubc.ca/>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 24.11.2025  
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025  
 Дата публікації: 27.02.2026