

3. Інформація про користувачів мисливських угідь Волинської області станом на 01 січня 2025 року, 2025. 2 с.

4. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Регіональної екологічної програми «Екологія 2023–2026». Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2022. 105 с.

**УДК 630\*41:519.87:004.75**

**БОНДАР О.С.**, канд. екон. наук

*Білоцерківський національний аграрний університет*

[osbondar22@gmail.com](mailto:osbondar22@gmail.com)

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕНТОМОЛОГІЧНИХ ШКІДНИКІВ У ЛІСАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ**

Досліджено інтеграцію диференціальних моделей «реакція-дифузія» з хмарними обчисленнями для прогнозування динаміки лісових шкідників. Визначено переваги еластичних хмарних ресурсів у моделюванні складних біосистем для оптимізації захисних заходів у лісівництві.

**Ключові слова:** математичне моделювання, ентомологічні шкідники, хмарні обчислення, лісозахист, рівняння реакції-дифузії, дистанційне зондування, Big Data.

**BONDAR O. S.** PhD in Economics, Associate Professor

*Bila Tserkva National Agrarian University*

[osbondar22@gmail.com](mailto:osbondar22@gmail.com)

## **MATHEMATICAL MODELING OF ENTOMOLOGICAL PEST SPREAD IN FORESTS USING CLOUD COMPUTING**

The study investigates the integration of "reaction-diffusion" differential models with cloud computing for predicting the dynamics of forest pests. The advantages of elastic cloud resources in modeling complex biosystems to optimize forest protection measures are determined. The research emphasizes the transition from reactive to proactive forest management through high-performance computing and real-time data processing.

**Keywords:** mathematical modeling, entomological pests, cloud computing, forest protection, reaction-diffusion equations, remote sensing, Big Data.

Сучасний стан лісових екосистем характеризується зростаючою вразливістю до біотичних факторів, серед яких ентомологічні шкідники посідають одне з чільних місць. Глобальні кліматичні зміни створюють сприятливі умови для спалахів масового розмноження комах-фітофагів, що потребує впровадження високотехнологічних методів моніторингу [1]. Традиційні підходи часто не дозволяють оперативно прогнозувати динаміку поширення шкідників на великих площах, тому інтеграція математичної біології з хмарними обчисленнями стає пріоритетним завданням лісівничої науки [2]. У зв'язку з цим виникає гостра потреба в інтеграції фундаментальної математичної біології з передовими інформаційними технологіями, зокрема хмарними обчисленнями.

Математичне моделювання процесів поширення шкідників базується на складних системах диференціальних рівнянь, що описують динаміку популяцій у часі та просторі. Основним викликом при побудові таких моделей є необхідність врахування величезної кількості змінних: вікової структури насаджень, кормової бази, активності ентомофагів, метеорологічних показників та антропогенного впливу. Використання моделей типу «хижак-жертва» або логістичних моделей росту в поєднанні з диференціальними рівняннями дозволяє симулювати просторове переміщення осередків шкідників. Точність таких прогнозів прямо залежить від дискретизації простору та частоти оновлення вхідних даних, що створює колосальне обчислювальне навантаження.

Математичне моделювання процесів поширення шкідників базується на системах диференціальних рівнянь, що описують динаміку популяцій у часі та просторі. Фундаментом для опису чисельності є модифіковане рівняння логістичного росту, яке для врахування міграційних процесів розширюється до рівнянь типу «реакція-дифузія» [3]. Загальний вигляд такої моделі для щільності популяції шкідника  $N(x, y, t)$  у просторі  $(x, y)$  та часі  $t$  можна представити я

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + rN(N, P) - f(N, P)$$

У цій формулі коефіцієнт  $D$  характеризує інтенсивність розселення (дифузії) комах,  $r$  - внутрішню швидкість лінійного росту популяції, а  $K$  - екологічну ємність середовища, яка в лісівництві корелює з наявністю кормової бази (запасом деревини відповідної породи). Функція  $f(N, P)$  описує трофічні зв'язки, де  $P$  - щільність популяції ентомофагів (природних ворогів шкідника), що дозволяє моделювати автоколивальні процеси, характерні для спалахів масового розмноження.

Для реалізації таких моделей у хмарних обчисленнях неперервні рівняння дискретизуються за допомогою методу скінченних різниць або скінченних елементів [4]. Це перетворює задачу на розв'язання величезних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Використання хмарних платформ дозволяє застосовувати декомпозицію розрахункової області: територія лісового масиву розбивається на окремі кластери (вузли), обчислення за якими відбуваються паралельно на різних віртуальних машинах.

Критичну роль відіграють хмарні обчислення. Перенесення математичних моделей у хмарне середовище (наприклад, платформи AWS, Google Cloud або Azure) дозволяє відійти від обмежень локальних потужностей [5]. Хмарні архітектури забезпечують еластичність ресурсів, що є принципово важливим під час пікових періодів вегетації, коли обсяг даних від сенсорів та супутників зростає експоненціально [6]. Завдяки паралельним обчисленням стає можливим запуск тисяч ітерацій моделі Монте-Карло для оцінки ймовірнісних сценаріїв розвитку епізоотій у лісах, що раніше потребувало б тижнів роботи суперкомп'ютерів.

Технологічна архітектура такої системи передбачає створення єдиного інформаційного простору, де дані дистанційного зондування Землі інтегруються з показниками наземних датчиків Internet of Things (IoT). Хмарні сервіси дозволяють автоматизувати процес попередньої обробки мультиспектральних знімків, виділяючи індекси вегетації (наприклад, NDVI або EVI), які слугують індикаторами стресового стану дерев. Ці індекси стають параметрами у математичній моделі, дозволяючи ідентифікувати приховані осередки ураження ще до появи видимих ознак дефоліації крони. Таким чином, модель перестає бути статичним описом і стає динамічним «цифровим двійником» лісового масиву.

Важливим аспектом використання хмарних технологій є забезпечення доступу до результатів моделювання в режимі реального часу. Лісничі на місцях, використовуючи мобільні додатки, підключені до хмарного сервера, можуть отримувати карти-прогнози з високою роздільною здатністю. Це трансформує підхід до лісоуправління: від реактивного (ліквідація наслідків) до превентивного (локалізація джерел поширення). Математична модель у хмарі дозволяє розрахувати оптимальні терміни та зони проведення захисних заходів, мінімізуючи використання хімічних засобів та знижуючи екологічне навантаження на довкілля.

Можливість зберігати та обробляти історичні дані (Big Data) за десятиліття дозволяє виявляти довгострокові цикли розмноження шкідників та їх кореляцію з циклами сонячної активності або змінами океанічних течій. Це формує надійну базу для фундаментальних досліджень адаптаційної здатності лісів у контексті глобального потепління.

#### **Список використаних джерел**

1. Мешкова В. Л. Ентомологічний моніторинг у лісах України: сучасний стан та перспективи. Харків : Планета-Прінт, 2019. 232 с.
2. Інформаційні технології в лісовому господарстві : монографія / В. П. Ткач та ін. ; за ред. С. І. Дорогунцова. Київ : Наукова думка, 2021. 315 с.
3. Ляшенко В. П., Назарова О. П., Гаценко О. С. Математичне моделювання екологічних процесів : навч. посіб. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2018. 212 с.
4. Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г. Вплив змін клімату на ліси України. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2023. Вип. 22. С. 15–28.
5. Armbrust M. et al. A view of cloud computing. Communications of the ACM. 2010. Vol. 53, no. 4. P. 50–58.
6. Математичне моделювання складних систем : навч. посіб. / О. О. Ємець та ін. Полтава : ПУЕТ, 2020. 254 с.