

УДК 632.9:004.8

Тригуба І.Л., канд.с-г.н., <https://orcid.org/0000-0002-5239-5951>

Тригуба А.М., докт.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661>

Романків Р.В., магістр,

Сидорчук В.І. магістр,

Пламетюк М.А., магістр,

Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій ім. С.З. Гжицького, Львів

БІОЛОГІЧНИЙ ЗАХИСТ АГРОЕКОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ФІТОСАНІТАРНОГО МОНІТОРИНГУ

**Tryhuba I.L., Tryhuba A.M., Romankiv R.V., Sydorchuk V.I., Plametyuk M.A.,
BIOLOGICAL PROTECTION OF AGROECOSYSTEMS BASED ON
INTELLIGENT METHODS OF PHYTOSANITARY MONITORING**

Дослідження стосується використання сучасних інформаційних технологій для підсилення ефективності біологічного захисту рослин у агроценозах. Окреслено архітектуру інтелектуальної системи моніторингу, підходи цифрової діагностики шкідників та можливості інтеграції машинного аналізу даних у практику фітосанітарного контролю.

Ключові слова: біологічний захист, шкідники, агроценози, цифрова діагностика, машинне навчання, моніторинг рослин.

Агроекосистеми являють собою керовані людиною екологічні системи, у яких продукційні процеси та біотичні взаємодії підтримуються за рахунок поєднання природних механізмів регуляції шкідливих організмів і сучасних цифрових технологій спостереження. У таких умовах зростає роль біологічного захисту, що ґрунтується на використанні природних механізмів регуляції чисельності шкідників. Разом із тим ефективність біоконтролю значною мірою залежить від точності оцінювання рівня загроз у просторі та часі, що робить актуальним використання цифрових технологій для вдосконалення системи моніторингу.

Біологічний захист у сучасному розумінні ґрунтується на інтегрованому підході, що передбачає поєднання агротехнічних, селекційних, екологічних та біологічних методів. Проте реалізація таких комплексних систем потребує

оперативного доступу до інформації про стан посівів, динаміку популяцій шкідників, поширення фітопатогенів та ефективність застосовуваних біопрепаратів. Використання інтелектуальних систем моніторингу дозволяє підвищити точність оцінювання ризиків, зменшити витрати на польові огляди та покращити прогнозування критичних фаз розвитку небезпечних організмів.

Дослідження базується на використанні моделей класифікації та регресійного прогнозування, що інтегрують зображення з польових сенсорів, супутникові індекси стану рослинності та мікрокліматичні параметри. Показано, що застосування нейронних мереж і методів глибинного навчання забезпечує суттєве підвищення точності ідентифікації шкідників у порівнянні з традиційними підходами, тоді як використання часових моделей дозволяє оцінити ймовірність виникнення спалахів та визначити оптимальні терміни застосування біопрепаратів. Окрему увагу приділено інтеграції біологічних засобів контролю у систему прийняття рішень, що дає можливість узгоджувати тактику захисту з екологічними критеріями та особливостями структури агроценозів.

Цифрова діагностика шкідників у польових умовах охоплює аналіз зображень рослин, використання сенсорів середовища, тепловізійних камер та даних дистанційного зондування. Алгоритми машинного навчання здатні виявляти характерні ознаки уражень, визначати видовий склад шкідників та оцінювати інтенсивність їхнього поширення. Для отримання достовірних результатів модель повинна враховувати варіативність освітлення, неоднорідність поверхні листка та ступінь розвитку пошкоджень.



Рисунок 1. Схема цифрової діагностики шкідників у польових екосистемах

Моніторинг поля базується на регулярному зборі зображень, отриманих із дронів або мобільних пристроїв. Після попередньої обробки дані надходять до блоку розпізнавання, де відбувається класифікація шкідників та оцінювання масштабу загрози. За потреби система надсилає повідомлення про необхідність

застосування біологічних засобів контролю. У сучасній практиці застосовуються алгоритми згорткових нейронних мереж, які забезпечують високу точність при обробці різноманітних візуальних ознак.

Оцінювання ефективності біопрепаратів слід автоматизувати. Для цього система аналізує динаміку чисельності шкідників до та після внесення біологічних агентів, використовуючи багатофакторні моделі. У загальному вигляді оцінку ефективності можна описати рівнянням:

$$E = \frac{N_0 - N_t}{N_0} \times 100\%, \quad (1)$$

де E – ефективність препарату; N_0 – чисельність шкідника до внесення засобу; N_t – чисельність через певний час після застосування.

У разі залучення природних хижаків важливо враховувати швидкість їхньої адаптації, погодні умови та структуру агроценозу. Інтелектуальні системи дозволяють створити модель поведінки популяції шкідників, яка описується диференціальними рівняннями виду:

$$\frac{dN}{dt} = rN - aNP, \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = baNP - sP, \quad (3)$$

де N – чисельність шкідників; P – чисельність ентомофагів; r – швидкість росту популяції шкідників; a – коефіцієнт впливу ентомофагів; b – коефіцієнт ефективності біоконтролю; s – природна смертність ентомофагів.

Такі моделі інтегруються в інформаційні системи, що дозволяє прогнозувати наслідки різних сценаріїв управління. На основі розрахованих параметрів формуються рекомендації щодо оптимального часу випуску ентомофагів та дозування біологічних препаратів.

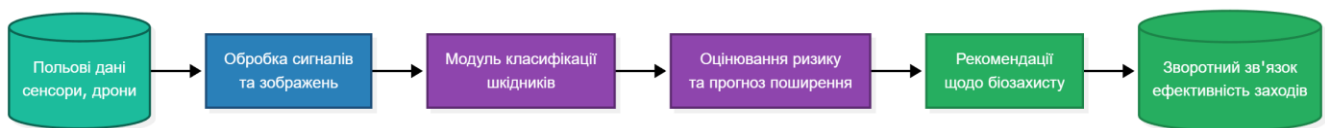


Рисунок 2. Блок-схема інтелектуальної системи підтримки біологічного захисту

У складі інтелектуальної системи виділяють модуль збору даних, аналітичний модуль та блок прийняття рішень. У аналітичному модулі об'єднуються результати з теплових камер, мультиспектральних сенсорів та класичних RGB-зображень. Такий підхід дає можливість точніше визначити ступінь стресу рослин, що може вказувати на ранні прояви ураження.

Після застосування біологічних засобів важливо оцінити динаміку змін у популяції шкідників. На основі зібраних даних формується таблиця ефективності моніторингу, яка дозволяє систематично відстежувати зміни в агроценозі.

Таблиця 1

Ефективність моніторингу шкідників у агроценозах

Параметр	До впровадження системи	Після впровадження системи
Час на огляд 1 га	60 хв	12 хв
Точність визначення виду	68 %	93 %
Виявлення ранніх стадій	низьке	високе
Частота помилкових спрацювань	висока	мінімальна

Застосування цифрових рішень сприяє підвищенню ефективності біологічного захисту не лише через точніше визначення загроз, але й завдяки змозі оперативно коригувати заходи реагування. В умовах зміни клімату, збільшення площі монокультур та зростання стійкості шкідників до хімічних засобів роль інтелектуальних технологій у фітосанітарному контролі зростає. Поєднання біологічного захисту та цифрового моніторингу формує нову парадигму сталого управління агроєкосистемами.

Висновки. Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу в біологічний захист польових культур дозволяє істотно підвищити точність діагностики шкідників, зменшити витрати часу на польові огляди та оптимізувати застосування біопрепаратів. Запропоновані моделі та схеми демонструють можливість комплексного підходу до управління агроєкосистемами, у якому цифрові технології підтримують розвиток екологічно безпечних практик ведення сільського господарства.

Список використаних джерел

1. Бабаєв, М. В., Жеребко, В. М. Сучасні методи моніторингу шкідників у польових агроєкосистемах. *Захист рослин*, 2022, № 3, с. 15–24.
2. Трибель, С. О., Секун, М. П., Бублик, Л. В. Біопрепарати у сучасному захисті рослин: довідник. Київ: Колобіг, 2021. 284 с.
3. Lacey, L. A., Grzywacz, D., Shapiro-Ilan, D. I. Microbial Control of Insect Pests: From Theory to Practice. *Annual Review of Entomology*, 2015, Vol. 60, pp. 273–292. DOI: 10.1146/annurev-ento-010814-020822.
4. Meyling, N. V., Eilenberg, J. Ecology of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in temperate agroecosystems. *Ecology and Evolution*, 2017, Vol. 7(21), pp. 7251–7260. DOI: 10.1002/ece3.3323.