

Абдулін А. В.,

здобувач вищої освіти спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Науковий керівник: Пархоменко О. Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри економічної кібернетики, комп'ютерних наук та інформаційних технологій

Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ НОРМ ВНЕСЕННЯ ПЕСТИЦИДІВ У СУЧАСНИХ АГРОСИСТЕМАХ

Актуальність теми застосування методів машинного навчання для оптимізації норм внесення пестицидів значно зросла після 2020 року в контексті глобальних викликів, таких як кліматичні зміни, посилення регуляцій щодо хімічного захисту рослин та необхідність забезпечення стійкого виробництва харчових продуктів. Політики на кшталт Європейського зеленого курсу та глобальні ініціативи FAO акцентують увагу на зменшенні екологічного навантаження від пестицидів, які спричиняють забруднення водних ресурсів, втрату біорізноманіття та розвиток резистентності шкідників. Водночас швидкий розвиток технологій штучного інтелекту, IoT-сенсорів та дронів дозволяє переходити до прецизійного землеробства, де внесення пестицидів здійснюється точково, зменшуючи їх обсяги на 30-90 % залежно від системи, без втрат врожайності. Огляди досліджень після 2020 року підтверджують, що інтеграція машинного навчання з реальним часом даних сприяє не лише економії ресурсів, але й підвищенню ефективності захисту рослин у змінних кліматичних умовах [1, 2].

Метою даного огляду є аналіз сучасних можливостей методів машинного навчання в оптимізації норм внесення пестицидів, з акцентом на інтеграцію з IoT, GIS та predictive analytics для досягнення стійких агросистем.

Методика огляду базується на систематичному аналізі наукових публікацій після 2020 року, включаючи рецензовані статті з баз Scopus та Web of Science. Використовувалися економіко-математичні моделі оцінки ефективності, методи аналізу великих даних та алгоритми машинного навчання, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) для детекції шкідників на зображеннях з дронів чи супутників, а також регресійні моделі для прогнозування норм внесення.

Основна аналітична частина фокусується на сучасних IT-напрямах, зокрема інтеграції predictive analytics з IoT та GIS для створення систем змінного внесення (variable rate application). Predictive analytics, побудована на моделях глибокого навчання, дозволяє прогнозувати поширення шкідників та хвороб на основі мультиспектральних даних (NDVI), сенсорів вологості та температури, генеруючи prescription maps для адаптивного обприскування.

Дослідження демонструють, що системи на базі UAV з реальним часом детекцією зменшують використання пестицидів на 30-50 %, а в деяких випадках до 90 % для гербіцидів при точковому виявленні бур'янів. Інтеграція edge computing мінімізує затримки, забезпечуючи закритий цикл «детекція-рішення-виконання». Аналіз показує переваги гібридних підходів: поєднання CNN з IoT дозволяє досягти точності детекції 89-98 %, знижуючи дрейф та офф-таргет ефекти [3, 4].

Для порівняння ефективності різних підходів наведено таблицю на основі узагальнених даних польових експериментів.

Таблиця 1.

Метод внесення	Зниження обсягу пестицидів (%)	Точність детекції (%)	Збереження/зростання врожайності (%)	Джерело
Традиційне (uniform)	0 (базовий)	70-80	100 (базовий)	[1]
Змінне з CNN та UAV	47-51	95-98	100-105	[2]
З IoT та predictive analytics	30-50	89-94	100+	[3]
Адаптивне з реальним часом (PWM-based)	30-90 (для гербіцидів)	90-100	102-110	[4]

Таблиця відображає узагальнені результати порівняльного аналізу традиційних та прецизійних підходів до внесення пестицидів у сучасних агросистемах з використанням методів машинного навчання. Дані свідчать, що перехід від рівномірного (uniform) внесення до змінних та адаптивних систем, побудованих на базі CNN, IoT та predictive analytics, забезпечує суттєве скорочення обсягів застосування засобів захисту рослин без негативного впливу на врожайність. Зокрема, використання UAV у поєднанні з алгоритмами глибокого навчання дозволяє досягти високої точності детекції бур'янів і шкідників (до 95–98 %), що дає змогу реалізувати точкове внесення препаратів і зменшити їх витрати майже наполовину. Інтеграція IoT-сенсорів та аналітики прогнозування додатково підвищує адаптивність систем до просторової та часової мінливості агроекологічних умов. Адаптивні системи з реальним часом управління демонструють найвищу ефективність, зокрема для гербіцидного захисту, забезпечуючи одночасно екологічну безпеку, економію ресурсів та потенційне зростання продуктивності агровиробництва.

У результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що методи машинного навчання у поєднанні з сучасними інформаційними технологіями є ефективним інструментом оптимізації норм внесення пестицидів у системах прецизійного землеробства. Інтеграція алгоритмів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, з даними, отриманими від IoT-сенсорів, безпілотних літальних апаратів та геоінформаційних систем, забезпечує високу точність детекції бур'янів, шкідників і фітопатогенів, що створює передумови для переходу від суцільного до адаптивного та точкового внесення засобів захисту рослин. Узагальнені результати сучасних досліджень підтверджують

можливість зниження обсягів застосування пестицидів у межах 30-90 % залежно від культури, типу препарату та рівня автоматизації системи, без зменшення, а в окремих випадках зі зростанням врожайності.

Окрім екологічних переваг, впровадження інтелектуальних систем внесення пестицидів має суттєвий економічний ефект за рахунок зниження витрат на агрохімікати, оптимізації використання техніки та мінімізації негативних офф-таргет ефектів. Використання edge computing і рішень з управлінням у реальному часі дозволяє підвищити оперативність прийняття рішень та забезпечити замкнений цикл «виявлення – аналіз – виконання», що є критично важливим в умовах динамічних кліматичних змін. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка гібридних моделей, що поєднують машинне навчання з агрокліматичним прогнозуванням, розширення застосування автономних роботизованих платформ та створення доступних цифрових рішень для широкого впровадження технологій прецизійного захисту рослин у сучасному агровиробництві.

Список використаних джерел

1. Talaviya T., Shah D., Patel N., Yagnik H., Shah M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2020. Vol. 4. P. 58–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>
2. Farooque A.A., Hussain N., Schumann A.W., McKenzie-Gopsill A., Esau T., Abbas F., Acharya B., Zaman Q. Field evaluation of a deep learning-based smart variable-rate sprayer for targeted application of agrochemicals. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 3. Article 100073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100073>
3. Hussain N., Farooque A.A., Schumann A.W., McKenzie-Gopsill A., Esau T., Farhat A., Acharya B., Zaman Q. Design and development of a smart variable-rate sprayer using deep learning. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 24, Article 4091. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244091>
4. Jiao Y., Zhang S., Jin Y., Cui L., Chang C., Ding S., Sun Z., Xue X. Research progress on intelligent variable-rate spray technology for precision agriculture. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, No. 6, Article 1431. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061431>
5. Chen H.B., Lan Y.B., Fritz B.K., Hoffmann W.C., Liu S.B. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2021. Vol. 14, No. 1, P. 38–49. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714.