

РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри автоматики та робототехнічних систем імені академіка І. І. Мартиненка
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
кандидата технічних наук, доцента **ЛЕНДЄЛА Тараса Івановича**
на дисертацію **КАЧМАРСЬКОГО Олексі Ігоровича**
на тему: **«Інтелектуальні інформаційні технології
в системі управління внесенням добрив»**,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»
галузі знань 12 «Інформаційні технології»

Обґрунтування вибору теми дослідження. Роботу присвячено розробленню гібридної інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень, що інтегрує методи машинного навчання з ризик-орієнтованим економічним функціоналом для оптимізації внесення мінеральних добрив за прибутковістю з урахуванням ризику в умовах кліматичної невизначеності.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що внесення мінеральних добрив є однією з найбільш капіталомістких операцій у структурі прямих витрат рослинництва. Економічний результат вирощування сільськогосподарських культур є одночасно нелінійним за агрохімічними параметрами та стохастичним за погодними умовами.

У роботі наведено дослідження щодо досягнення мети роботи, а саме розроблення та програмної реалізації гібридної інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень, що інтегрує методи машинного навчання з ризик-орієнтованим економічним функціоналом для оптимізації внесення добрив за прибутковістю з урахуванням ризику в стохастичних погодних умовах.

Ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Дисертація характеризується системним підходом до дослідження поставленої проблеми, логічною структурою та послідовністю викладу матеріалу. Усі наукові положення, висновки та рекомендації базуються на коректному використанні методів наукового пізнання, аналізі сучасних наукових джерел та результатах експериментальних досліджень.

У роботі застосовано комплекс методів, що забезпечують системний підхід до проєктування та реалізації інтелектуальних інформаційних технологій автоматизованої підтримки прийняття рішень в агрономії.

У дисертації застосовано методи:

- 1) системного аналізу для формалізації задачі та проєктування дворівневої архітектури системи;
- 2) інтеграції з відкритими джерелами даних для збору агрономічної статистики та метеорологічних рядів з механізмами відмовостійкої мережевої взаємодії;
- 3) машинного навчання для побудови нелінійної прогнозної моделі врожайності методом ансамблевого градієнтного бустингу в логарифмічному просторі цільової змінної;
- 4) обґрунтування структури простору ознак методом ablation-аналізу з п'ятикратною перехресною перевіркою на відкладеній тестовій вибірці;
- 5) багатокритеріальної оптимізації з урахуванням ризику на основі Mean-Variance скаляризації та емпіричного розрахунку Conditional Value-at-Risk;
- 6) об'єктно-орієнтованого проєктування для побудови модульної архітектури програмного комплексу;
- 7) математичної статистики для оцінювання значущості обчислювальної апробації результатів.

Наукова новизна дисертації полягає у тому, що:

- розроблено алгоритм побудови інтегрованого інформаційного простору на основі агрономічної статистики FAOSTAT та глобальних метеорологічних архівів Open-Meteo Archive API, який відрізняється від чинних підходів тим, що включає широтно-залежний індикатор теплового стресу та процедуру формування проксі-показника продуктивності агровиробничої системи без витоку цільової змінної, і призначений для підвищення точності прогнозування врожайності;

- удосконалено модель підтримки прийняття рішень шляхом інтеграції нелінійної прогновної функції відгуку врожайності з ризик-орієнтованим економічним функціоналом на основі поєднання Mean-Variance скаляризації та метрики Conditional Value-at-Risk, що з урахуванням сценарного простору погодніх і цінових реалізацій забезпечує перехід від точкових рекомендацій до стійких несприятливих сценаріїв стратегій внесення добрив;

- розроблено архітектуру системи підтримки прийняття рішень для управління внесенням добрив на основі інтеграції методів машинного навчання, математичного апарату оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику та сучасних програмно-інженерних рішень, що забезпечує платформонезалежність обчислювального ядра системи.

Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендацій щодо їх можливого використання. Результати дисертаційного дослідження мають важливе теоретичне та практичне значення. Отримані наукові результати також можуть бути використані у навчальному процесі під час підготовки фахівців з комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення. Дисертація є цілісним, логічно побудованим і завершеним науковим дослідженням. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків, що повністю відповідає поставленій меті та завданням дослідження. У **першому розділі** висвітлюється теоретико-методологічний аналіз сучасних інтелектуальних інформаційних технологій в управлінні внесенням добрив. У **другому розділі** виконано формалізацію математичної моделі гібридної системи оптимізації доз добрив. Також сформульовано задачу як стохастичну оптимізаційну з вектором керованих змінних і випадковим вектором станів середовища. У **третьому розділі** висвітлено архітектуру та програмну реалізацію прототипу інтелектуальної інформаційної технології. Також запропоновано архітектуру системи, яка включає рівень з розділенням дослідницького контуру машинного навчання (Python) і рівень виробничого контуру бізнес-логіки (.NET) через серіалізацію прогновної моделі та її нативний інференс у керованому коді. У **четвертому розділі** представлено результати обчислювальної апробації. Виконано порівняльний аналіз запропонованої моделі з чотирма опублікованими підходами до управління внесенням добрив.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідницької роботи Національного університету біоресурсів і природокористування за темою «Інформаційна та алгоритмічна підтримка інтелектуальних систем в природоохоронній галузі» (номер державної реєстрації 0124U002754).

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації. Результати наукового пошуку здобувача обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-практичних конференціях різного рівня. Основні положення дисертації опубліковано у 6 наукових працях, з яких 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 6 тез наукових доповідей.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Дисертація є самостійно написаною кваліфікаційною науковою працею із науково обґрунтованими висновками та рекомендаціями, які подано автором для публічного захисту.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. У роботі відсутнє привласнення чужих ідей, результатів або слів без оформлення належного цитування. Таким чином, у дисертаційному дослідженні здобувача відсутні порушення академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації. Дисертація Олексія Качмарського виконана на високому науково-технічному рівні та має завершений характер. Водночас окремі положення можуть бути предметом наукової дискусії або розглядатися як напрями подальшого розвитку дослідження, що не знижує загальної наукової та практичної цінності роботи.

1. У роботі наводиться набір даних, таких як сума ефективних температур, показник температурного стресу, середня температура сезону, проте у наборі даних для формування керуючого рішення не враховуються такі критичні для росту рослин ознаки, як приклад кислотність ґрунтів, вплив інших чинників на нього.

2. Автором у роботі наводиться розгляд еталонної багаторівневої інтелектуальної системи управління вирощуванням рослин у агросекторі, що функціонує за принципом Інтернету речей (IoT). Проте автором не запропоновано механізму інтеграції розробленого аналітично-прогнозного компонента як обчислювального рівня такої IoT-системи, зокрема з використанням даних польових сенсорів для уточнення агрегованих кліматичних індикаторів. Реалізація такої інтеграції надала б дослідженню більшої практичної значущості.

3. Автором не вказано одиниці вимірювання складових виразів математичних моделей, які наводяться у розділі 2 дисертації.

4. У роботі наведено опис двокомпонентної програмної архітектури системи, проте недостатньо деталізовано вимоги до апаратного забезпечення, необхідного для розгортання та експлуатації розробленого програмного комплексу, зокрема обчислювальних ресурсів для етапу навчання прогнозної моделі та для клієнтського застосунку.

Водночас, вищенаведені зауваження істотно не впливають на високі здобутки роботи, що є новим, актуальним та змістовним дослідженням, та носять переважно дискусійний характер.

Загальний висновок. Дисертація є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані та практично цінні результати, що вирішують важливе наукове завдання у галузі інформаційних технологій. Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих наукових працях повністю відповідають вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а здобувач Качмарський Олексій Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань «Інформаційні технології».

Рецензент доцент кафедри автоматизації та робототехнічних систем імені академіка І. І. Мартиненка Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат технічних наук, доцент Тарас ЛЕНДЄЛ