

ВІДГУК

офіційного опонента

завідувача кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки

Національного транспортного університету,

доктора технічних наук, професора **АЛЬ-АММОРИ Алі Нурддиновича**

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»

Актуальність теми дослідження. Сільськогосподарське виробництво функціонує в умовах високої невизначеності, зумовленої стохастичною природою погодних факторів, нелінійністю біологічних процесів формування врожаю та волатильністю ринкових цін. Внесення мінеральних добрив є однією з найбільш капіталомістких операцій у структурі прямих витрат рослинництва, складаючи 30–50 % витрат на гектар, тоді як економічний результат цієї операції важко передбачуваний. У науковій спільноті наголошується на необхідності переходу від усереднених нормативних рекомендацій до інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних кількісно враховувати ризики. Водночас більшість наявних підходів формують точкові детерміновані рекомендації без характеристики розподілу можливих економічних наслідків. У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення гібридних інтелектуальних інформаційних технологій, що поєднують прогнозні моделі машинного навчання з ризик-орієнтованим економічним аналізом. Отже, розроблення інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень з оптимізації внесення добрив за прибутковістю з урахуванням ризику є актуальним науково-практичним завданням у контексті цифровізації агропромислового комплексу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тема дисертації О. І. Качмарського відповідає актуальним напрямкам розвитку інформаційних технологій в агропромисловому секторі. Дослідження виконувалося в межах наукової тематики Національного університету біоресурсів і природокористування України «Інформаційна та алгоритмічна підтримка інтелектуальних систем в природоохоронній галузі» (номер державної реєстрації 0124U002754). Тематика дисертації узгоджується з науковими напрямами факультету інформаційних технологій НУБіП України та відповідає загальній дослідницькій стратегії, спрямованій на впровадження методів інтелектуального аналізу даних та машинного навчання у задачах підтримки прийняття рішень.

Короткий аналіз основного змісту дисертації. У дисертації О. І. Качмарського проведено всебічний аналіз та розроблення 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.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їх апробацію та впровадження.

У першому розділі здійснено теоретико-методологічний аналіз проблеми створення інтелектуальних інформаційних технологій в управлінні внесенням добрив. Розглянуто еволюцію концепції точного землеробства, проаналізовано сучасні системи підтримки прийняття рішень в агрономії, проведено систематизацію інтелектуальних технологій в агросекторі за напрямками застосування, а також здійснено класифікацію та порівняльний аналіз сучасних підходів до формування рекомендацій з нормування мінеральних добрив. Виявлено методологічний розрив між наявністю точних прогнозних моделей та здатністю трансформувати ці прогнози в економічно стійкі стратегії управління.

У другому розділі формалізовано математичну модель гібридної системи оптимізації доз добрив. Задачу прийняття рішень сформульовано як стохастичну оптимізаційну задачу, обґрунтовано вибір градієнтного бустингу регресійних дерев як прогнозного ядра, математично формалізовано процедуру корекції зміщення прогнозу при переході від логарифмічного простору до натуральних величин на основі властивостей логнормального розподілу, а також розроблено алгоритм оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику на основі поєднання критерію Mean-Variance та метрики Conditional Value-at-Risk. Виконано верифікацію моделі, що засвідчила високу прогнозну здатність: на тестовій вибірці отримано коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9122$, $RMSE = 581,48$ кг/га, $MAE = 376,77$ кг/га, а п'ятикратна крос-валідація показала $R^2 = 0,908 \pm 0,010$, що свідчить про стабільність узагальнювальної здатності.

У третьому розділі представлено архітектурну побудову та програмну реалізацію прототипу інформаційної технології. Запропоновано двокomпонентну архітектуру з розділеними середовищами навчання та інференсу, розроблено модульну структуру програмного комплексу з виділенням бібліотеки ядра, консольної утиліти збору даних та клієнтського застосунку з картографічним інтерфейсом, реалізовано механізми відмовостійкої взаємодії з відкритими джерелами даних.

У четвертому розділі наведено результати обчислювальної апробації та оцінку ефективності розробленої технології. Виконано порівняльний аналіз запропонованої моделі з низкою альтернативних підходів на чотирьох географічних локаціях за трьома ціновими сценаріями, проведено абляційний аналіз структури вхідного простору ознак, підтверджено інформаційну цінність системи як інструмента, що замінює точкову рекомендацію структурованим простором ризик-економічних компромісів.

Кожен розділ завершується висновками, що узагальнюють результати та підкреслюють досягнення О. І. Качмарського.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертації є достатньо високим. Наукові положення обґрунтовано на основі комплексного використання сучасних методів дослідження, зокрема методів машинного навчання, стохастичного моделювання, оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику та методів математичної статистики. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням математичного апарату, застосуванням репрезентативної вибірки міжнародних агростатистичних даних FAOSTAT та метеорологічних спостережень Open-Meteo Archive API, обґрунтуванням структури простору ознак абляційним аналізом з п'ятикратною перехресною перевіркою, а також забезпеченням відтворюваності обчислювального експерименту. Важливим підтвердженням достовірності є порівняння результатів з незалежними опублікованими дослідженнями на відповідних географічних локаціях, системність викладення матеріалу та апробація основних результатів на наукових конференціях і в фахових виданнях.

Наукова новизна результатів досліджень полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання розроблення гібридної інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень, зокрема: розроблено алгоритм побудови інтегрованого інформаційного простору на основі агрономічної статистики та глобальних архівів метеорологічних даних, що включає широтно-залежний індикатор теплового стресу та процедуру формування проксі-показника продуктивності агровиробничої системи без витoku цільової змінної; удосконалено модель підтримки прийняття рішень, що інтегрує нелінійну прогностну функцію відгуку врожайності з ризик-орієнтованим економічним функціоналом на сценарному просторі погодних реалізацій і забезпечує формування стійких до невизначеності стратегій замість точкових рекомендацій; розроблено архітектуру системи підтримки прийняття рішень 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.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертація О. І. Качмарського виконана українською мовою та є завершеним науковим дослідженням, що містить сукупність наукових положень і результатів, представлених автором до публічного захисту. Робота відзначається достатнім рівнем структурованості, логічною послідовністю викладення матеріалу та внутрішньою цілісністю. Мова дисертації є чіткою та науково коректною. Використана термінологія відповідає сучасному рівню розвитку галузі інформаційних технологій. Оформлення ілюстративного матеріалу та структурних елементів роботи

відповідає встановленим вимогам. Отримані у дисертації результати узгоджуються із поставленою метою та сформульованими у вступі науковими завданнями. Тема, зміст і наукові результати дисертації О. І. Качмарського відповідають спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Повнота викладення результатів дослідження в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності. Загалом за результатами виконаного дослідження О. І. Качмарським опубліковано 10 наукових праць, з яких 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 6 тез наукових доповідей.

Результати дослідження пройшли апробацію на шести міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, зокрема: XIV та XVI Міжнародних науково-практичних конференціях молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 2023, 2025 рр.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 2024 р.); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, Україна – м. Ополе, Польща, 2025 р.); VII науково-практичних конференціях студентів і аспірантів «Теоретичні та прикладні аспекти розробки комп'ютерних систем» (м. Київ, 2025, 2026 рр.).

Дисертація О. І. Качмарського оформлена відповідно до вимог наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності. Дисертація є самостійно написаною кваліфікаційною науковою працею. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. Таким чином, у дисертаційному дослідженні здобувача відсутні порушення академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації. Дисертація в цілому є добре обґрунтованою та завершеною. Водночас окремі положення можуть становити інтерес для наукової дискусії та подальшого розвитку дослідження:

1. У роботі як прогностне ядро обрано градієнтний бустинг над деревами рішень, що порівняно з лінійною регресією та випадковим лісом показав найкращі результати на тестовій вибірці. Водночас поза розглядом залишилися сучасні нейромережеві архітектури для роботи з табличними даними, які в окремих задачах демонструють конкурентну точність. Розширення порівняльного аналізу на цей клас моделей дозволило б повніше обґрунтувати остаточний вибір прогностного алгоритму.

2. У роботі реалізовано механізми відмовостійкої взаємодії з відкритими API, зокрема обробку перевищення лімітів запитів та проміжне резервне копіювання при пакетному зборі даних. Водночас система критично залежить від доступності зовнішнього сервісу погодних даних, оскільки отримання погодних рядів для заданої локації потребує мережевого

з'єднання. У дисертації бракує аналізу поведінки системи в умовах тривалої недоступності зовнішніх джерел; розгляд механізмів локального кешування історичних даних підвищив би надійність експлуатації.

3. Програмну реалізацію супроводжено юніт-тестуванням з оцінкою покриття коду, що засвідчує інженерну якість розробки. Проте інфраструктурні компоненти, які взаємодіють із зовнішніми сервісами, охоплено тестами обмежено, що автор коректно пояснює потребою в інтеграційному тестуванні. Розроблення повноцінного набору інтеграційних тестів для модулів збору й консолідації даних підвищило б довіру до відтворюваності обчислювального експерименту.

4. У вступі дисертації сформульовано шість завдань дослідження, тоді як у загальних висновках наведено вісім пунктів. Бажаною є відповідність між кількістю та змістом сформульованих завдань і пунктів висновків, що дозволило б однозначно встановити, яким саме завданням відповідає кожен отриманий результат, і підвищило б структурну узгодженість роботи.

Висновки про відповідність дисертації встановленим вимогам. Вважаю, що дисертація на тему: «Інтелектуальні інформаційні технології в системі управління внесенням добрив» є завершеним і самостійним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають важливе значення для розвитку інформаційних технологій. У роботі запропоновано гібридну інтелектуальну інформаційну технологію, що базується на інтеграції методів машинного навчання з ризик-орієнтованим економічним аналізом для підтримки прийняття рішень з оптимізації внесення добрив. Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення.

З огляду на актуальність теми дослідження, обґрунтованість наукових положень, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, достатній рівень їх апробації та повноту відображення у наукових публікаціях, а також відсутність порушень принципів академічної доброчесності, вважаю, що дисертація відповідає 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 її автор Качмарський Олекса Іванович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Офіційний опонент завідувач кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету, доктор технічних наук, професор Алі АЛЬ-АММОРИ