

ВІДГУК

офіційного опонента

завідувача відділу досліджень навколишнього середовища
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
доктора технічних наук, професора **ТРИСНЮКА Василя Миколайовича**
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. Дисертація Качмарського Олексі Ігоровича присвячена розробленню інтелектуальної інформаційної технології підтримки прийняття рішень у системі управління внесенням мінеральних добрив на основі методів машинного навчання, математичного моделювання та ризик-орієнтованої оптимізації.

Актуальність теми не викликає сумніву, оскільки вона знаходиться на перетині сучасних напрямів розвитку комп'ютерних наук, штучного інтелекту, систем підтримки прийняття рішень, цифрового сільського господарства та інформаційних технологій управління агровиробництвом.

Сучасне сільське господарство функціонує в умовах високої невизначеності, зумовленої мінливістю кліматичних чинників, коливанням ринкових цін та необхідністю підвищення ефективності використання матеріальних ресурсів. За таких умов традиційні методи визначення норм внесення добрив уже не забезпечують необхідної економічної та виробничої ефективності, що обумовлює потребу у впровадженні інтелектуальних інформаційних технологій, здатних враховувати багатофакторний характер агровиробничих процесів і здійснювати прогнозування та оптимізацію управлінських рішень.

Особливої уваги заслуговує запропонований дисертантом комплексний підхід, який поєднує моделі машинного навчання, математичне моделювання, оцінювання ризиків та сучасні програмно-інженерні рішення в єдиній інформаційній технології підтримки прийняття рішень. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям цифрової трансформації аграрного сектору, розвитку систем штучного інтелекту та використання інтелектуального аналізу даних для підвищення ефективності агровиробництва.

З огляду на викладене, тема дисертації є актуальною, має важливе наукове та практичне значення, а виконане дослідження повністю відповідає предметній області спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тема дисертації Качмарського Олексі Ігоровича узгоджується зі стратегічними пріоритетами цифрової трансформації агропромислового комплексу України. 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 відповідає науковим напрямкам факультету інформаційних технологій НУБіП України та загальній дослідницькій стратегії, спрямованій на впровадження сучасних інформаційних технологій у сфері агровиробництва.

Короткий аналіз основного змісту дисертації. У дисертації Качмарського Олексія Ігоровича розроблено інтелектуальну інформаційну технологію підтримки прийняття рішень, що забезпечує прогнозування врожайності та формування економічно обґрунтованих рекомендацій з внесення мінеральних добрив на основі методів машинного навчання та ризик-орієнтованого аналізу.

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

У **першому розділі** здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану розвитку інтелектуальних інформаційних технологій в управлінні внесенням добрив. Розглянуто концепцію точного землеробства, проаналізовано системи підтримки прийняття рішень в агрономії, методи диференційованого внесення та аналітичні платформи, виконано класифікацію сучасних підходів до формування рекомендацій з нормування добрив. Обґрунтовано наукову задачу дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовано математичну модель гібридної системи. Сформульовано задачу прийняття рішень як стохастичну оптимізаційну задачу, обґрунтовано вибір прогнозного ядра на основі градієнтного бустингу, формалізовано корекцію зміщення прогнозу з використанням властивостей логнормального розподілу та розроблено алгоритм оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику. Виконано верифікацію прогнозової моделі ($R^2 = 0,9122$ на тестовій вибірці, $R^2 = 0,908 \pm 0,010$ за результатами п'ятикратної крос-валідації) з підтвердженням її узагальнювальної здатності.

У **третьому розділі** представлено архітектуру та програмну реалізацію прототипу. Запропоновано архітектуру з розділеними середовищами навчання моделі та її експлуатації, розроблено модульну структуру програмного комплексу з картографічним інтерфейсом, реалізовано механізми відмовостійкої взаємодії з відкритими програмними інтерфейсами та проміжного резервного копіювання при пакетному зборі даних.

У **четвертому розділі** наведено результати обчислювальної апробації. Виконано порівняння запропонованої системи з альтернативними підходами на чотирьох географічних локаціях за трьома ціновими сценаріями, реалізовано три режими роботи системи, продемонстровано можливості візуалізації ризик-економічних показників. Здійснено абляційний аналіз, що підтвердив істотний внесок контекстної ознаки CountryTechLevel у точність прогнозу, та оцінку обчислювальної продуктивності.

Кожен розділ завершується висновками, що узагальнюють отримані результати.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових результатів є достатньо високим. Наукові положення обґрунтовано комплексним використанням сучасних методів дослідження: машинного навчання, параметричного стохастичного моделювання, оптимізації портфельного типу та методів математичної статистики. Достовірність забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, використанням репрезентативної вибірки відкритих агростатистичних і метеорологічних даних, обґрунтуванням структури простору ознак абляційним аналізом, фіксацією параметрів відтворюваності обчислювального експерименту, а також зіставленням результатів з незалежними опублікованими дослідженнями на відповідних географічних локаціях. Узгодженість теоретичних положень з результатами обчислювальних експериментів та апробація результатів на наукових конференціях підтверджують їх достовірність.

Наукова новизна результатів досліджень полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання, зокрема: *розроблено* алгоритм побудови інтегрованого інформаційного простору, що поєднує агрономічну статистику з глобальними метеорологічними архівами та включає оригінальні елементи формування простору ознак (широтно-залежний індикатор теплового стресу, проксі-показник продуктивності агровиробничої системи без витоку цільової змінної); *удосконалено* модель підтримки прийняття рішень шляхом інтеграції нелінійної прогностичної функції врожайності з ризик-орієнтованим економічним функціоналом, що забезпечує перехід від точкових рекомендацій до структурованого простору ризик-економічних компромісів; *розроблено* архітектуру системи підтримки прийняття рішень на основі поєднання методів машинного навчання, оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику та програмно-інженерних рішень із забезпеченням платформонезалежності обчислювального ядра.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертація виконана українською мовою та є завершеним науковим дослідженням. Робота відзначається структурованістю, логічною послідовністю та внутрішньою цілісністю викладення, що свідчить про особистий науковий внесок автора. Мова дисертації чітка та науково коректна, термінологія відповідає сучасному рівню розвитку галузі інформаційних технологій, стиль викладення науковий і послідовний. Оформлення роботи відповідає встановленим вимогам.

Отримані результати узгоджуються з поставленою метою та завданнями. Тема, зміст і результати дисертації Качмарського Олексі Ігоровича 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.

За результатами дослідження Качмарським Олексом Ігоровичем опубліковано чотири статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, у яких висвітлено основні положення та результати дисертації (три статті у виданні «Наука і техніка сьогодні» та одна стаття у виданні «Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки»).

Результати дослідження апробовано на шести міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, зокрема на конференціях «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 2023, 2025 рр.); «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 2024 р.); «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (м. Тернопіль, Україна – м. Ополе, Польща, 2025 р.) та «Теоретичні та прикладні аспекти розробки комп'ютерних систем» (м. Київ, 2025, 2026 рр.).

Дисертацію оформлено відповідно до чинних вимог МОН України з дотриманням принципів академічної доброчесності. Робота є самостійно написаною кваліфікаційною науковою працею, використання матеріалів інших авторів супроводжується відповідними посиланнями. Порушень академічної доброчесності не виявлено.

Окремі дискусійні питання і зауваження. Зміст дисертації свідчить про належний рівень підготовки здобувача та володіння сучасними методами комп'ютерних наук, зокрема методами обробки даних, машинного навчання, стохастичного моделювання та програмної інженерії. Автор демонструє вміння поєднувати теоретичні підходи з практичною реалізацією, що підтверджується розробленням функціонального програмного прототипу.

Водночас у дисертації наявні окремі зауваження та дискусійні положення:

1. У програмній реалізації перелік мінеральних добрив та відповідних цінових параметрів реалізовано у вигляді фіксованих значень безпосередньо в коді застосунку. Перенесення цих даних у окреме сховище (базу даних або конфігураційний файл) з періодичною синхронізацією цінових показників через зовнішній програмний інтерфейс надало б системі більшої технічної гнучкості та підвищило б її практичну придатність до використання в умовах змінної ринкової кон'юнктури без потреби в перекомпіляції програмного коду.

2. Вхідний простір ознак прогнозованої моделі охоплює агрохімічні, агрокліматичні індикатори та контекстний регресор продуктивності. Поза увагою залишилася ґрунтова складова, яка є вагомим чинником формування врожайності. Інтеграція ґрунтових характеристик у простір ознак, передбачена автором як напрям розвитку, підвищила б повноту моделі; у поточній редакції доцільно було б детальніше обґрунтувати наслідки її відсутності.

3. У підрозділі 4.3 наведено розширений опис метрик якості прогнозової моделі для різних алгоритмів машинного навчання (лінійної регресії, випадкового лісу, градієнтного бустингу). За своїм змістом цей матеріал тісніше пов'язаний з обґрунтуванням вибору прогнозного алгоритму, викладеним у другому розділі, аніж із результатами обчислювальної апробації системи в розділі четвертому. Доцільним було б перенесення або структурне об'єднання цього матеріалу з відповідним підрозділом другого розділу для уникнення дублювання логіки викладу.

4. У тексті дисертації місцями наявні граматичні та синтаксичні помилки.

Надані зауваження мають переважно дискусійний та рекомендаційний характер і можуть бути враховані автором у подальших дослідженнях у межах спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Вказані зауваження не знижують загальної наукової і практичної цінності дисертації.

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 в агропромисловому секторі. Запропонована технологія базується на інтеграції методів машинного навчання зі стохастичним ризик-орієнтованим аналізом для підтримки прийняття рішень з внесення добрив. Результати мають теоретичне і практичне значення.

З огляду на актуальність теми, обґрунтованість наукових положень, наукову новизну та практичну значущість результатів, достатній рівень апробації та повноту відображення у публікаціях, а також відсутність порушень 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 відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, доктор технічних наук, професор Василь ТРИСНЮК