

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри комп'ютерних наук
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
доктора економічних наук, професора **РУДЕНСЬКОГО Романа Анатолійовича**
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 обраної теми. Внесення мінеральних добрив є однією з найбільших складових у структурі загальних витрат рослинництва, сягаючи за різними оцінками 30–50 % прямих витрат на гектар. Водночас економічний результат цієї операції є вкрай важко передбачуваним через нелінійні впливи агрохімічних параметрів та стохастичний вплив погодних умов. Традиційні нормативні підходи, що оперують усередненими рекомендаціями, в умовах підвищеної кліматичної мінливості призводять до системних прихованих фінансових втрат.

Таким чином, проблематика розроблення інтелектуальних інформаційних технологій для підтримки агрономічних рішень в умовах невизначеності є беззаперечно актуальною. Розвиток методів машинного навчання та стохастичної оптимізації створює нові можливості для подолання методологічного розриву між наявністю точних прогнозних моделей та здатністю трансформувати прогнози в економічно стійкі стратегії управління.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідницької роботи Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Інформаційна та алгоритмічна підтримка інтелектуальних систем в природоохоронній галузі» (номер державної реєстрації 0124U002754), у межах якої здобувачем розроблено інтегрований інформаційний простір на основі відкритих джерел даних, прогнозну модель врожайності та алгоритм оптимізації за прибутковістю з урахуванням ризику.

Практичне значення та впровадження результатів дослідження. Дисертація містить цілісну та математично обґрунтовану архітектуру гібридної системи підтримки прийняття рішень. Поєднання нелінійної прогнозної моделі з ризик-орієнтованим економічним контуром (Mean-Variance + CVaR) є методологічно коректним і практично значущим підходом. Результати обчислювальної апробації переконливо демонструють, що система надає якісно іншу (структуровану) інформацію про ризик-економічні компроміси, недоступну з традиційних точкових рекомендацій.

Двоконтурна програмна архітектура (Python/XGBoost + .NET) з нативним інференсом є зрілим технічним рішенням, що усуває типовий розрив між дослідницьким середовищем і виробничим застосуванням. Реалізація механізмів відмовостійкої взаємодії з відкритими API та модуля сценарної ризик-орієнтованої оптимізації свідчить про системність підходу. Розроблений програмний прототип може становити основу для подальшого впровадження у діяльність агровиробничих підприємств, фермерських господарств та агроконсультаційних служб, а запропоновані методологічні рішення доцільно використовувати в навчальному процесі при підготовці фахівців з комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Ступінь обґрунтованості наукових положень. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Структура

відповідає меті та завданням дослідження. У першому розділі проведено системний аналіз сучасних підходів до управління живленням культур і виявлено системну суперечність між прогресом у засобах збору даних та відставанням алгоритмічного апарату прийняття рішень. У другому розділі математично формалізовано стохастичну задачу оптимізації доз добрив. Обґрунтовано застосування градієнтного бустингу (XGBoost) у логарифмічному просторі цільової змінної з аналітичною корекцією логнормального зміщення. Розроблено алгоритм ризик-орієнтованої оптимізації на основі поєднання критерію Mean-Variance та метрики CVaR. Третій розділ містить опис двоконтурної програмної архітектури (Python/XGBoost + .NET WPF) з нативним інференсом серіалізованої моделі, що забезпечує розділення обчислювально витратного етапу навчання прогновної моделі від етапу її експлуатації в керованому коді клієнтського застосунку. Четвертий розділ присвячено обчислювальній апробації на чотирьох географічних локаціях із генерацією параметричних Монте-Карло-реалізацій погодних умов. Отримані результати, зокрема порівняння з опублікованими альтернативними підходами на тих самих агрокліматичних локаціях, переконливо ілюструють методологічну коректність та практичну цінність запропонованого рішення.

Викладений матеріал свідчить про логічну послідовність дослідження, коректність застосованого математичного апарату та обґрунтованість здобутих наукових результатів.

Повнота викладу результатів у публікаціях. За тематикою дисертації опубліковано 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 6 тез наукових доповідей. Основні наукові результати відображено у статтях, що стосуються математичного моделювання, гібридної системи підтримки рішень та програмної реалізації. Слід зазначити, що частина ранніх тезових доповідей присвячена суміжній тематиці застосування методів комп'ютерного зору в агровиробництві, що відображає еволюцію наукових пошуків здобувача у напрямі остаточно обраної теми дослідження.

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 роботи. Попри загалом позитивну оцінку дисертаційного дослідження Олексі Качмарського, слід відзначити наявність окремих аспектів, які можуть викликати наукові дискусії та потребують уточнення чи подальшого опрацювання:

1. Відсутність аналізу важливості ознак моделі. У роботі побудовано нелінійну прогнозу модель на основі градієнтного бустингу з кількома групами вхідних ознак: агрохімічними (N, P, K), кліматичними (GDD, SDD, опади) та контекстним регресором. Водночас у роботі не наведено аналізу важливості ознак (Feature Importance) або SHAP-значень, які б дозволили встановити реальний внесок кожної групи ознак у кінцевий прогноз. Доповнення роботи таким аналізом підвищило б інтерпретованість моделі та довіру до прогнозів з боку кінцевого користувача.

2. Одноразова оптимізація та відсутність адаптивного контуру підживлення. Система, що розробляється, формує рекомендацію щодо дози добрив одноразово – до початку вегетаційного сезону. З агрономічної точки зору це обмеження є суттєвим. Внесення мінеральних добрив не є одноразовою подією: поряд з основним внесенням

застосовуються коригуючі підживлення у різних фазах росту, що мали б спиратися на спостережуваний стан посівів та актуальні погодні умови.

У роботі не розглянуто, чи охоплює система підтримку рішень щодо підживлень – тобто рекомендацій, що формуються вже після сходів на основі нових спостережень. Включення адаптивного контуру підживлення з використанням поточних метеорологічних спостережень та даних дистанційного зондування є перспективним напрямом розвитку системи.

3. Відсутність диференціації за культурами у навчальній вибірці. У навчальній вибірці агреговані дані по різних культурах (зернові, олійні тощо) в єдиній цільовій змінній «врожайність». При цьому функція відгуку на добрива може бути принципово різною для різних культур, а чутливість до температурного стресу і дефіциту вологи також не є однаковою. Фактично модель апроксимує «середню реакцію змішаного агрегату культур», а не реальну агрономічну залежність для конкретного виду.

Обчислювальна апробація, виконана на прикладах кукурудзи та озимої пшениці з використанням єдиної моделі, не вирішує цю проблему, оскільки модель не розрізняє культури при прогнозуванні. Рекомендується або ввести культуру як категоріальну ознаку у вхідний простір, або навчати окремі моделі для кожної цільової культури.

4. Постановка задачі оптимізації – напрям подальшого розвитку. У роботі задача оптимізації норм внесення добрив вирішується через перебір по дискретній сітці доз із наступним обчисленням прибутку та CVaR для кожної точки. XGBoost і Random Forest є регресійними інструментами прогнозування, а не алгоритмами оптимізації послідовних рішень. Перебір по сітці є коректним підходом для одноразової задачі зі скалярним управлінням, проте має обмежену масштабованість при розширенні простору рішень (наприклад, при включенні декількох підживлень або спільній оптимізації N, P, K незалежно).

Перспективним напрямом розвитку є розгляд задачі в рамках Reinforcement Learning або багатокрокового стохастичного програмування, що дозволило б явно моделювати послідовність рішень протягом сезону та адаптуватися до нових спостережень. Це є напрямом подальших досліджень, що виходить за межі поточної роботи.

5. Питання хмарного розгортання та доступності для малих господарств. Розроблений прототип реалізовано як десктопний застосунок на базі WPF для платформи Windows. Заявлена практична значущість для фермерських господарств і агроконсультаційних служб потребує врахування реальних умов впровадження. Для малих і середніх господарств, які не мають власних ІТ-фахівців, самостійне встановлення, підтримка та оновлення моделі є практично нереалістичними.

У роботі не розглянуто питання хмарного розгортання у форматі SaaS, мобільного інтерфейсу або API-доступу, що є стандартними підходами для масштабування аналітичних інструментів в агросекторі. Концептуальне опрацювання архітектури розгортання для масового використання суттєво підсилило б практичну складову дослідження.

Загальні висновки. Дисертація Олекси Качмарського є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій розв'язано актуальну задачу розроблення інтелектуальної інформаційної технології для підтримки прийняття агрономічних рішень в умовах кліматичної та цінової невизначеності. Робота містить математично обґрунтовані результати, підкріплені обчислювальною апробацією, та демонструє зрілість здобувача у питаннях машинного навчання, стохастичної оптимізації та програмної інженерії.

Наведені зауваження носять здебільшого науково-дискусійний характер і вказують на перспективні напрями розвитку дослідження, не знижуючи загальної цінності отриманих

результатів. Дисертація відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», 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 Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент професор кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор економічних наук, професор Роман РУДЕНСЬКИЙ