

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,  
завідувача кафедри комп'ютерного моделювання та інтелектуальних технологій  
факультету комп'ютерних наук,  
Харківського національного університету радіоелектроніки  
ГРЕБЕННІКА Ігоря Валерійовича на дисертаційну роботу  
МАЧУЛЯКА Михайла Володимировича на тему:  
«Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із  
використанням геоінформаційних технологій»,  
поданої до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення  
галузі знань 12 Інформаційні технології

### **1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.**

Актуальність дисертаційної роботи Мачуляка Михайла Володимировича зумовлена сучасними тенденціями розвитку інтелектуальних інформаційних систем у галузі сільського господарства та зростаючою потребою у автоматизації процесів моніторингу врожайності. Застосування математичного моделювання та обчислювальних методів для аналізу агрономічних даних є одним з пріоритетних напрямів розвитку цифрових технологій в аграрному секторі.

Традиційні однорівневі статистичні методи та методи машинного навчання часто ігнорують динамічні дані з дронів, фокусуючись на історичних кліматичних показниках, що унеможлиблює адаптивне керування полем протягом сезону вегетації. В цьому плані доцільним є створення багаторівневих моделей, здатних синтезувати ретроспективну інформацію із поточними даними спостережень для оцінки впливу стресових факторів на врожайність. В роботі запропоновано дворівневу модель урожайності, яка акумулює адаптивну дискретну модель вегетаційних індексів, на основі яких а також історичних даних співствлення урожайностей певних культур із характеристиками динаміки вегетаційних індексів і будуються адаптивні оцінки урожайності на поточний сезон. Адаптивна модель динаміки вегетаційних індексів у поєднанні із моделлю динаміки перехідних процесів Моно також служить випереджаючим індикатором поточного стану розвитку рослин, який може спонукати до застосування певних коригуючих агротехнічних заходів.

Сучасні системи підтримки прийняття рішень у вирощуванні зернових, такі як Cropwise, Climate FieldView, FarmLogs є достатньо ефективними, хоча їм

властиві і деякі недоліки. Сюди в першу чергу можна віднести високу вартість впровадження, непрозорість формування рекомендацій на базі нейромережових прогнозів без обґрунтування механізмів їх формування.

Тому особливої ваги набуває розроблення програмного комплексу СППР, який переводить вегетаційні індекси в категорію потенційних втрат або прибутків. Це дозволяє аграрію перейти від пасивної фіксації аномалій до превентивного та економічно обґрунтованого внесення мінеральних добрив. Таким чином, розроблення спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень, що інтегрує прогнозні моделі в робочий цикл агропідприємства, має вагоме значення для підвищення рентабельності використання ресурсів.

З урахуванням зазначеного, розробка математичних та програмних засобів моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій є актуальним науково-технічним завданням, що відповідає сучасним напрямкам розвитку інформаційних технологій та має важливе практичне значення.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Наукові положення дисертаційної роботи характеризуються достатнім ступенем обґрунтованості. Автором визначено мету і завдання дослідження, проведено аналіз сучасного стану проблеми та обрано відповідні методи дослідження. Математичні моделі, представлені в роботі, базуються на відомих методах обробки знімків отриманих із БПЛА та геоінформаційного аналізу. Запропоновані алгоритми обробки даних дистанційного зондування є методологічно обґрунтованими та відповідають сучасному рівню розвитку технологій.

Архітектурні рішення геоінформаційної системи забезпечують інтеграцію різномірних джерел даних та можливість масштабування системи. Програмна реалізація базується на сучасних технологічних рішеннях та стандартах. Експериментальні дослідження підтверджують працездатність запропонованих методів та алгоритмів, що свідчить про практичну придатність отриманих результатів.

## **3. Наукова новизна результатів дослідження.**

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробці комплексного підходу до створення математичних та програмних засобів моніторингу урожайності зернових культур на основі інтеграції геоінформаційних технологій та методів обробки даних за допомогою БПЛА.

До основних результатів, що мають наукову новизну, відносяться такі:

1. Запропоновано та обґрунтовано двокомпонентну адаптивну модель динаміки вегетаційних індексів, яка на відміну від відомих містить дискретну адаптивну компоненту, що будується на основі комбінації поточних та історичних даних, а також апроксимаційної неперервної компоненти на основі моделі Моно, що у сукупності забезпечило побудову нелінійної неперервної моделі вегетаційних індексів;

2. Запропонована відкрита сервісно-орієнтована архітектура програмного забезпечення для побудови рекомендацій щодо агротехнічних заходів на базі динаміки вегетаційних індексів, яка на відміну від відомих інтегрує програмні компоненти: рекомендованих періодів оцінки динаміки розвитку рослин, моделей динаміки вегетаційних індексів, моделей ущільнень ґрунтів, аналізатор ефективності агротехнічних заходів, що у сукупності уможливило розробку програмних систем для підвищення урожайності сільськогосподарських культур;

3. Набув подальшого розвитку метод ідентифікації моделі Моно процесів насичення та редукції, який на відміну від існуючих при побудові початкових наближень коефіцієнтів моделі враховує монотонний характер модельованих процесів, що забезпечило апроксимаційні властивості моделей, погоджені з точністю вхідної інформації;

4. Набув подальшого розвитку метод ідентифікації дворівневої адаптивної моделі урожайності, який на відміну від існуючих використовує пояснюючі змінні у вигляді моделей вегетаційних індексів, що забезпечило адаптивні та прогностичні властивості моделі.

Наведені наукові результати є новими, методологічно обґрунтованими та такими, що мають теоретичну й прикладну цінність для розвитку систем підтримки прийняття рішень в агропромисловому комплексі.

#### **4. Практичне значення результатів дослідження.**

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні програмних засобів, які можуть бути використані в системах точного землеробства та управління сільськогосподарським виробництвом. Розроблені рішення мають потенціал для впровадження у фермерських господарствах, агрохолдингах та органах державного управління.

Геоінформаційна система може використовуватися для оперативного моніторингу стану посівів, прогнозування урожайності та планування агротехнічних заходів. Це сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів та оптимізації сільськогосподарського виробництва.

Практична цінність дисертаційного дослідження полягає у створенні прикладного інструментарію для впровадження концепції точного землеробства на рівні конкретних програмних рішень. Запропоновано програмний комплекс для автоматизованого моніторингу посівів, що дозволяє в режимі реального часу збирати та обробляти дані про стан культур. Програмний комплекс має функціонал виявлення ущільнень ґрунтів та встановлення залежностей між архітектонікою рослин (висотою) та фізичними властивостями ґрунту, що є критичним для запобігання втратам урожаю. Реалізовані методи моделювання вегетаційних індексів (у дискретній та неперервній формах) дозволяють здійснювати прогнозування врожайності. Це надає агропідприємствам та сервісним компаніям можливість не лише констатувати стан посівів, а й стратегічно планувати агротехнічні заходи, оптимізуючи використання ресурсів. Розроблена сервісно-орієнтована архітектура програмного забезпечення є адаптивною для широкого кола стейкхолдерів — від малих фермерських господарств до великих агрохолдингів та державних структур, що займаються продовольчою безпекою.

Практична значущість підтверджена актами впровадження у науково-дослідній роботі Західноукраїнського національного університету, де методи структурної ідентифікації автора застосовані для аналізу моделей складних систем а також в освітньому процесі, де матеріали дисертації, зокрема щодо Python-аналітики та побудови рекомендаційних систем, збагатили зміст відповідних навчальних дисциплін.

#### **5. Повнота викладення результатів дослідження в опублікованих наукових працях.**

Результати проведеного дослідження отримали належне відображення у відкритому друку та пройшли апробацію у фаховому науковому середовищі. Загальний доробок здобувача за темою дисертації включає 7 наукових праць (сукупним обсягом понад 50 сторінок), що повною мірою розкривають зміст та новизну роботи.

Ключові положення роботи висвітлені у виданні, що індексується наукометричною базою Scopus, що підтверджує відповідність дослідження міжнародним стандартам. Статті, опубліковані у фахових виданнях України, забезпечили належну презентацію результатів вітчизняній науковій спільноті. У публікаціях описано рішення наукових завдань, поставлених у роботі, зокрема, теоретичне обґрунтування математичних моделей формування врожайності, розробку алгоритмів динаміки вегетаційних індексів та проектування архітектури

спеціалізованої геоінформаційної системи. Окрему увагу в публікаціях приділено результатам прикладних експериментів, що свідчить про достовірність розроблених ІТ-рішень та їх готовність до практичного впровадження.

Аналіз структури та змісту праць підтверджує самостійність наукового дослідження автора. Опубліковані матеріали відображають внесок автора в автоматизацію збору та обробки агроданих. Таким чином, оприлюднені праці здобувача за кількістю та змістовним наповненням цілком відповідають вимогам МОН України щодо повноти висвітлення основних результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії.

#### **6. Структура та оформлення дисертації.**

Робота включає анотацію, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг та структура роботи відповідають поставленій меті та завданням дослідження.

У вступній частині автором обґрунтовано актуальність обраного напрямку, окреслено об'єкт, предмет та методологічний апарат дослідження.

У першому розділі проведено критичний огляд методів моніторингу врожайності. Здобувачем доведено доцільність застосування геоінформаційних технологій та мікросервісного підходу для проектування архітектури сучасної інформаційної системи, що забезпечує її гнучкість та масштабованість.

Другий розділ присвячено отриманню основних теоретичних результатів роботи. Автор пропонує метод побудови інтерполяційної моделі вегетаційних індексів на основі системи диференціальних рівнянь Моно та методу їх ідентифікації з подальшим уточненням за допомогою градієнтного методу. Такий синтез дозволяє структурувати алгоритмічне забезпечення для аналізу динаміки вегетаційних індексів, що є внеском у математичне моделювання агропроцесів.

Третій розділ містить прикладні результати роботи. Серед них - нелінійна модель, що встановлює зв'язок між морфологічними ознаками культур (висотою) та фізичними властивостями ґрунту (щільністю). Це дає змогу використовувати вегетаційні дані для дистанційної діагностики стану ґрунтового покриву. Крім того, розроблені адаптивні моделі врожайності дозволяють оперативно коригувати ці прогнози протягом усього періоду вегетації.

У четвертому розділі описано процес програмної імплементації розроблених методів. Автор обґрунтовує архітектурні рішення геоінформаційної системи, описує структуру бази даних та механізми взаємодії програмних модулів.

Загальне оформлення та стиль. Текст дисертації написаний державною мовою з дотриманням академічної етики та норм наукового стилю. Матеріал належним чином візуалізований за допомогою ілюстрацій, графіків та таблиць.

Робота повністю відповідає встановленим вимогам щодо обсягу та технічного оформлення. Загальні висновки є репрезентативними, логічно підсумовують результати кожного етапу дослідження та окреслюють перспективи подальшого розвитку. Оформлення роботи відповідає встановленим державним стандартам та вимогам до дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

## **7. Зауваження та дискусійні питання.**

Поряд з позитивною оцінкою дисертаційної роботи, слід відзначити окремі недоліки та зауваження:

1. У першому розділі таблиця 1.3 містить порівняння ефективності відомих методів моделювання врожайності зернових культур із власним результатом автора (дворівневою адаптивною моделлю), отриманим в роботі. Оскільки перший розділ роботи є оглядовим, доцільно було б порівняння із власними результатами навести у подальших розділах після викладення суті отриманих результатів.

2. У першому розділі роботи наведено огляд відомих вегетаційних індексів як інструменту неруйнівного контролю стану рослин. У другому розділі не проведено достатнього обґрунтування вибору конкретних вегетаційних індексів для різних типів зернових культур з відповідним порівняльним аналізом їх ефективності для задач моніторингу, які розв'язуються в роботі.

3. У третьому розділі, під час викладення результатів підрозділу 3.4 автор робить висновок: «Встановлено оптимальну структуру системи рівнянь Моно, що адекватно відображає характер емпіричних спостережень динаміки вегетаційних процесів.»

Вважаю, що робити висновок щодо оптимальності структури системи рівнянь можна лише в результаті розв'язання відповідної задачі структурної оптимізації щодо цієї системи, чого в роботі не було зроблено. Отже, це твердження не може сприйматись як коректне.

4. У розділі 4 відсутні результати порівняльного аналізу розробленої системи з існуючими аналогами за критеріями точності прогнозування та швидкодії.

Зазначені недоліки не знижують загальної якості дисертаційного дослідження.

#### **8. Відсутність порушення академічної доброчесності.**

Аналіз дисертаційної роботи Мачуляка Михайла Володимировича засвідчує відсутність порушень принципів академічної доброчесності. Усі використані джерела правильно оформлені посиланнями. Отримані результати є оригінальними та належать автору.

#### **Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України**

Дисертаційна робота Мачуляка Михайла Володимировича є завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальну науково-практичну задачу розробки математичних та програмних засобів моніторингу урожайності зернових культур. Незважаючи на зазначені недоліки, робота в цілому відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Отримані результати мають наукову новизну та практичне значення для розвитку інформаційних технологій у сільському господарстві. Дисертація відповідає спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

На підставі викладеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота відповідає основним вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.

Автор дисертаційної роботи — Мачуляк Михайло Володимирович — заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерного моделювання  
та інтелектуальних технологій  
Харківського національного університету  
радіоелектроніки

Ігор ГРЕБЕННИК

Підпис проф. І. Гребенніка засвідчую:  
Учений секретар Харківського національного  
університету радіоелектроніки

Ірина ЖАРІКОВА

