

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Західноукраїнського національного університету

н.п.н., професор

Микола ДИВАК



[Handwritten signature]
2026

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації Мачуляка Михайла Володимировича на тему:
«Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур
із використанням геоінформаційних технологій», поданої на здобуття ступеня
доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення

ВИТЯГ

із протоколу засідання фахового семінару кафедри комп'ютерних наук
від 31 грудня 2025 року № 8

ПРИСУТНІ:

професор кафедри комп'ютерних наук, доктор технічних наук, професор Мельник А.М. (рецензент); професор кафедри кібербезпеки, доктор технічних наук, професор Пасічник Р. М. (науковий керівник); професор кафедри комп'ютерних наук, доктор технічних наук, доцент Манжула В.І. (рецензент); завідувач кафедри комп'ютерних наук, доктор технічних наук, професор Пукас А.В. (голова засідання); проректор з наукової роботи, професор кафедри комп'ютерних наук, доктор технічних наук, професор Дивак М.П.; доцент кафедри комп'ютерних наук, кандидат технічних наук, доцент Марценюк Є.О.; старший викладач кафедри комп'ютерних наук, доктор філософії Тимчишин В.С.; декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій, кандидат технічних наук, доцент Якименко І.З.; завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, кандидат технічних наук, доцент Сегін А.І.; доцент кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, кандидат технічних наук, доцент Коваль В.С.; в.о. завідувача кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, доктор економічних наук, професор Дзюбановська Н.В.; професор кафедри кібербезпеки, доктор технічних наук, професор Касянчук М.М.; професор кафедри фінансових технологій та банківського бізнесу, доктор економічних наук, професор Стецько М.В.; аспірант кафедри комп'ютерних наук Коваль В.В.; аспірант кафедри комп'ютерних наук Тимчишин Б.С.

З присутніх – 6 докторів технічних наук, 4 кандидати технічних наук та 1 доктор філософії – фахівці за профілем поданої на розгляд дисертації.

ПОРЯДОК ДЕННИЙ:

Обговорення дисертаційного дослідження Мачуляка Михайла Володимировича на тему: «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій», поданої на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення, щодо його наукової новизни, теоретичного та практичного значення результатів.

СЛУХАЛИ:

Доповідь здобувача Мачуляка Михайла Володимировича про результати проведеного ним дисертаційного дослідження.

Доповідач обґрунтував актуальність обраної теми, визначив мету, завдання, охарактеризував об'єкт та предмет дослідження, виклав основні наукові положення, що виносяться на захист.

Автором розглянуто сучасні теоретичні засади використання вегетаційних індексів (NDVI, MTCI) для оцінювання стану посівів та прогнозування урожайності. Показано обмеження існуючих підходів, зокрема зазначено, що більшість відомих моделей базуються на статичних або емпіричних залежностях і не враховують динаміку розвитку рослин, просторову неоднорідність полів та зміну агротехнічних впливів у часі. Автором обґрунтовано необхідність розроблення адаптивних математичних моделей, здатних описувати часову еволюцію вегетаційних індексів та забезпечувати формування практичних агротехнічних рекомендацій.

Автором розроблено однокомпонентну та двокомпонентну адаптивні моделі динаміки вегетаційних індексів, які ґрунтуються на моделі Моно процесів насичення та редукції. На відміну від існуючих підходів, запропоновані моделі дозволяють враховувати зміну потенціалу росту рослин і вплив зовнішніх факторів, а також забезпечують ідентифікацію параметрів за експериментальними даними дистанційного моніторингу.

Автором запропоновано метод ідентифікації параметрів моделей, що базується на мінімізації квадратичного функціоналу нев'язки між змодельованими та експериментальними даними, що забезпечує стійкість результатів і коректну адаптацію моделей до умов конкретного поля та культури. Показано чутливість ідентифікації до вибору вузлів сітки та підтверджено стійкість методу в околі оптимального розв'язку.

На основі отриманих моделей у роботі сформульовано аналітичні співвідношення сервісу формування агротехнічних рекомендацій, які дозволяють виявляти критичні відхилення прогнозованих значень вегетаційних індексів від нормативних та автоматично генерувати рекомендації щодо додаткового підживлення і коригування агротехнічних операцій.

Окрему увагу приділено розробленню архітектури програмної системи моделювання урожайності. Автором удосконалено сервісно-орієнтовану архітектуру, в якій інтегровано процеси збору даних з БПЛА, фотограмметричної обробки, розрахунку індексів, моделювання та формування рекомендацій. Такий підхід забезпечує масштабованість системи, повторне

використання моделей і незалежний розвиток модулів обробки та прийняття рішень.

Здобувач провів апробацію запропонованих моделей і методів на експериментальних даних, отриманих у результаті моніторингу сільськогосподарських полів. Результати порівняльного аналізу підтвердили практичну значущість роботи: використання адаптивних моделей дозволяє знизити середню похибку прогнозування урожайності та підвищити точність формування зон диференційованого підживлення.

Отримані результати свідчать про те, що розроблені математичні моделі, методи і програмна архітектура є науково обґрунтованими, практично значущими та можуть бути використані у системах точного землеробства для підтримки прийняття управлінських рішень.

Після завершення доповіді Мачуляка Михайла Володимировича присутніми були поставлені такі запитання:

- професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н. професор Мельник А.М.: Скажіть, будь ласка, чому саме обрано модель Моно ?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. Модель Моно була обрана тому, що вона природно описує процеси росту та насичення біологічних систем за обмеженого ресурсу, що повністю відповідає динаміці вегетаційних індексів. На відміну від лінійних або суто емпіричних моделей, модель Моно дозволяє формалізувати нелінійний характер росту рослин із чітко вираженою фазою насичення та подальшої редукції, що спостерігається в реальних даних NDVI. Крім того, параметри моделі мають фізично та біологічно інтерпретований зміст і можуть бути ідентифіковані за даними дистанційного моніторингу, що робить модель придатною для адаптивного прогнозування урожайності.

- професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н. професор Мельник А.М.: Чи аналізували, наскільки модель Моно є придатною для опису процесів вегетації за наявності надлишку ресурсів і впливу погодних факторів?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. Так, у дисертаційній роботі аналізувалась придатність моделі Моно для опису процесів вегетації з урахуванням можливих обмежень, зокрема в умовах надлишку ресурсів та впливу погодних факторів. Під час аналізу експериментальних даних NDVI та MTCI, отриманих у різні вегетаційні періоди та за різних погодних умов, було встановлено, що характер динаміки індексів зберігає типову нелінійну форму з фазами росту, насичення та подальшої редукції. У роботі надлишок ресурсів не вводиться як окремий явний параметр, однак його вплив опосередковано відображається у зміні форми кривих вегетаційних індексів.

- професор кафедри кібербезпеки, д.т.н., професор Касянчук М.М.: Що в загальному сенсі описують процеси насичення та редукції в моделі Моно?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. Якщо говорити просто, то в моделі Моно процес насичення означає, що в системі активна компонента спочатку швидко зростає, але з часом зростання сповільнюється і наближається до певної межі. Навіть якщо ресурсів або впливу стає більше, результат уже

майже не змінюється, система виходить на свій максимум і стабілізується. Процес редуції, відповідно, описує ситуацію, коли ресурс або вплив зменшується, і система починає втрачати свій потенціал. Значення показника поступово знижується, що відповідає переходу від активного стану до поступового згасання.

- професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н., доцент Манжула В.І.: Чи могли б ви уточнити, що саме в роботі розуміється під адаптивною та інтеграційною моделями і в чому полягає різниця між ними?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. У роботі поняття адаптивної та інтеграційної моделей мають різний зміст і виконують різні функції, хоча між собою вони пов'язані. Під адаптивною моделлю в роботі розуміється модель, параметри якої автоматично коригуються на основі поточних та історичних даних, що дозволяє враховувати зміну умов функціонування об'єкта в часі. Зокрема, в адаптивних моделях динаміки вегетаційних індексів параметри моделі Моно ідентифікуються для конкретного поля, культури та сезону, що забезпечує пристосування моделі до реальних умов вирощування та мінімізує похибку прогнозування. Інтеграційна модель, у свою чергу, розглядається як модель, яка поєднує результати кількох джерел даних або моделей в єдиному описі процесу.

- професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н., доцент Манжула В.І.: У чому саме полягає використання геоінформаційних технологій у роботі та які ГІС-платформи були використані для реалізації запропонованих рішень?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. Геоінформаційні технології у роботі використовуються як основа для просторової обробки та аналізу даних дистанційного зондування, зокрема БПЛА-знімків і вегетаційних індексів. Вони забезпечують просторову прив'язку даних, зонування полів, аналіз динаміки показників у часі та представлення результатів моделювання у вигляді карт-завдань для прийняття агротехнічних рішень. Таким чином, ГІС у роботі виступає не лише засобом візуалізації, а інтеграційною платформою між математичними моделями та практичними рекомендаціями. Для реалізації запропонованих рішень використано серверні та клієнтські ГІС-компоненти з геоінформаційною базою даних, що дозволяє зберігати, обробляти та візуалізувати просторові дані в межах мікросервісної архітектури системи.

- завідувач кафедри комп'ютерних наук, д.т.н., професор Пукас А.В.: Ви зазначали, що у роботі використовується вимірювання висоти рослин. Чи аналізувався вплив точності цих вимірювань на загальну точність вхідних даних та результати моделювання, і чи проводились відповідні дослідження?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. Так, у роботі враховувалась точність вимірювань висоти рослин та її вплив на якість вхідних даних, однак ці вимірювання використовувались не як самостійна змінна моделі, а як допоміжна інформація для аналізу стану посівів. Висота рослин оцінювалась на основі цифрових моделей поверхні та планів висот рослин (СНМ), отриманих із БПЛА-даних і використовувалась для уточнення просторової структури посівів та інтерпретації результатів зонування. Окреме дослідження чутливості моделей саме до похибок вимірювання висоти рослин не проводилось, оскільки

основними вхідними даними для математичного моделювання є часові ряди вегетаційних індексів. Вплив можливих похибок вимірювання висоти опосередковано враховується через усереднення показників у полів, а також через використання адаптивних методів ідентифікації параметрів моделей, які знижують вплив локальних шумів і похибок вихідних даних.

- проректор з наукової роботи, професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н, професор Дивак М.П.: Чи могли б ви уточнити, які відомі програмні продукти та технології були використані при побудові архітектури системи і яку роль вони в ній виконують?

Відповідь дисертанта: Дякую за запитання. У процесі побудови архітектури запропонованої системи у роботі було використано та інтегровано низку відомих програмних продуктів і технологій, які виконують допоміжну інфраструктурну роль. Зокрема, застосовано готові геоінформаційні компоненти для зберігання, обробки та візуалізації просторових даних, що забезпечує роботу з растровими картами вегетаційних індексів, результатами зонування полів і картами-завданнями. Це дозволило зосередити основні зусилля на розробленні математичних моделей і алгоритмів, не дублюючи функціональність існуючих ГІС-рішень. Для організації взаємодії між окремими модулями системи використано сервісно-орієнтований підхід, який передбачає логічне розділення процесів збору даних, фотограмметричної обробки, моделювання та формування рекомендацій. Контейнеризація програмних компонентів реалізована за допомогою технології Docker, що забезпечує відтворюваність середовища виконання та спрощує розгортання системи. Керування контейнерами, масштабування сервісів і підвищення відмовостійкості здійснюється із застосуванням Kubernetes.

Після відповідей дисертанта з характеристикою його наукової зрілості виступив науковий керівник, професор кафедри кібербезпеки, доктор технічних наук, професор Пасічник Роман Мирославович.

Пасічник Роман Мирославович зазначив, що всі отримані результати є самостійною науковою розробкою дисертанта та складають базові елементи наукової новизни і практичної цінності дисертаційної роботи. Тема дисертації Мачуляка Михайла Володимировича «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» присвячена розробленню математичних моделей та програмної системи підтримки прийняття рішень у задачах моніторингу та прогнозування урожайності на основі даних дистанційного зондування. Обрана тема є актуальною з огляду на сучасні тенденції розвитку точного землеробства, геоінформаційних систем та інженерії програмного забезпечення, а також потребу в автоматизованих засобах аналізу великих обсягів даних.

У дисертації розроблено адаптивні математичні моделі динаміки вегетаційних індексів, зокрема на основі моделі Моно процесів насичення та редукції, які дозволяють описувати нелінійний характер розвитку рослин протягом вегетаційного періоду. Запропоновано метод ідентифікації параметрів

моделей за експериментальними даними дистанційного моніторингу, що забезпечує узгодження апроксимаційних властивостей моделей з точністю вхідної інформації та підвищує стійкість прогнозних оцінок.

Автором також розроблено дворівневу адаптивну модель урожайності, яка поєднує лінійні та нелінійні оцінки історичних даних вегетаційних індексів і дозволяє враховувати просторову неоднорідність полів та зміну умов вирощування у часі. На основі результатів моделювання сформульовано аналітичні співвідношення для автоматизованого формування агротехнічних рекомендацій, зокрема щодо диференційованого внесення добрив.

У роботі удосконалено архітектуру програмної системи моніторингу урожайності, побудованої за сервісно-орієнтованим підходом із використанням геоінформаційних технологій. Запропонована архітектура забезпечує інтеграцію даних БПЛА, фотограмметричної обробки, розрахунку вегетаційних індексів, математичного моделювання та формування рекомендацій у межах єдиної програмної платформи, що підвищує масштабованість і практичну придатність системи.

У процесі виконання дисертаційної роботи Мачуляк М.В. продемонстрував високий рівень наукової підготовки, здатність самостійно формувати та розв'язувати складні науково-технічні завдання, а також ґрунтовні знання і практичні навички в галузі математичного моделювання, геоінформаційних систем та інженерії програмного забезпечення. Особливо слід відзначити вміння автора поєднувати теоретичні моделі з практичними потребами агровиробництва, що забезпечило прикладний характер отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи апробовано на наукових конференціях та в межах дослідницьких проєктів. За темою дисертації опубліковано наукові праці у фахових виданнях, у тому числі індексованих у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science.

Науковий керівник, доктор технічних наук, професор Пасічник Роман Мирославович зазначив, що дисертаційна робота на тему «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44, а її автор – Мачуляк Михайло Володимирович – заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Після цього слово було надано рецензентам дисертаційної роботи:

- професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н., доцент Манжула В.І.: дисертація, присвячена створенню математичних та програмних засобів моніторингу і прогнозування урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій, є актуальною з урахуванням сучасних напрямів

розвитку точного землеробства, дистанційного зондування, геоінформаційних систем та інженерії програмного забезпечення.

Актуальність теми дисертації зумовлена зростанням потреби в підвищенні ефективності агровиробництва, раціональному використанні ресурсів та впровадженні цифрових технологій управління сільськогосподарськими процесами. Сучасні підходи до оцінювання стану посівів і прогнозування урожайності здебільшого базуються на емпіричних або статичних моделях і не враховують повною мірою просторову неоднорідність полів, динаміку розвитку рослин та невизначеність даних дистанційного моніторингу. Це обумовлює необхідність розроблення математичних моделей і програмних засобів, здатних адаптивно описувати динаміку вегетаційних індексів та забезпечувати підтримку прийняття агротехнічних рішень на основі просторово-часових даних.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні адаптивних математичних моделей динаміки вегетаційних індексів, зокрема на основі моделі Моно процесів насичення та редукції, які дозволяють формалізувати нелінійний характер розвитку рослин упродовж вегетаційного періоду; у запропонованні методу ідентифікації параметрів моделей за експериментальними даними дистанційного моніторингу, що забезпечує узгодження апроксимаційних властивостей моделей із точністю вхідної інформації; у розробленні дворівневої адаптивної моделі урожайності, яка поєднує лінійні та нелінійні оцінки історичних даних вегетаційних індексів; а також в удосконаленні архітектури програмної системи моніторингу урожайності на основі геоінформаційних технологій і сервісно-орієнтованого підходу, що забезпечує інтеграцію даних дистанційного зондування, математичного моделювання та формування агротехнічних рекомендацій.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого програмного забезпечення для підвищення ефективності управління агровиробництвом шляхом моніторингу стану посівів, прогнозування урожайності та формування карт-завдань диференційованого внесення добрив. Запропоновані математичні моделі, методи та алгоритми реалізовано у складі програмної системи з використанням геоінформаційних технологій, яка може бути застосована в практиці точного землеробства, а також в освітньому процесі та наукових дослідженнях у галузі інформаційних технологій та інженерії програмного забезпечення.

Дисертація Мачуляка Михайла Володимировича на тему «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» може бути рекомендована до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді з метою здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

- **професор кафедри комп'ютерних наук, д.т.н, професор Мельник А.М.:** дисертація на тему «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» представляє собою комплексне наукове дослідження, спрямоване на вирішення актуального науково-технічного завдання автоматизованого моніторингу та прогнозування урожайності на основі даних дистанційного

зондування. Автор продемонстрував глибоке розуміння проблематики та запропонував науково обґрунтовані підходи до її розв'язання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що: уперше розроблено адаптивні математичні моделі динаміки вегетаційних індексів, які базуються на моделі Моно процесів насичення та редукції і дозволяють формалізувати нелінійний характер розвитку рослин упродовж вегетаційного періоду; уперше запропоновано метод ідентифікації параметрів моделей, що враховує монотонний характер модельованих процесів і забезпечує узгодження апроксимаційних властивостей моделей з точністю вхідних даних дистанційного моніторингу; удосконалено підхід до прогнозування урожайності шляхом розроблення дворівневої адаптивної моделі, яка поєднує лінійні та нелінійні оцінки історичних даних вегетаційних індексів; удосконалено архітектуру програмного забезпечення моніторингу урожайності з використанням геоінформаційних технологій та сервісно-орієнтованого підходу, що забезпечує інтеграцію даних дистанційного зондування, математичного моделювання та формування агротехнічних рекомендацій.

У процесі виконання дисертаційної роботи автором розроблено адаптивні математичні моделі динаміки вегетаційних індексів, методи їх ідентифікації за експериментальними просторово-часовими даними, а також програмні засоби інтеграції результатів моделювання у геоінформаційну систему з метою формування карт-завдань диференційованого внесення добрив та підтримки прийняття управлінських рішень.

Теоретичне значення дослідження полягає у розвитку методів математичного моделювання та ідентифікації нелінійних процесів у задачах агромоніторингу шляхом застосування адаптивних і апроксимаційних моделей динаміки вегетаційних індексів. Отримані результати розширюють теоретичні засади побудови моделей із невизначеними та зашумленими даними дистанційного зондування, а також формують підґрунтя для подальшого розвитку інтеграційних і адаптивних підходів у системах точного землеробства.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмного забезпечення моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій, яке забезпечує аналіз просторової неоднорідності посівів, прогнозування урожайності та формування агротехнічних рекомендацій у вигляді карт-завдань. Розроблені моделі, методи та алгоритми можуть бути використані в практиці точного землеробства, у наукових дослідженнях, в освітньому процесі в галузі інформаційних технологій та інженерії програмного забезпечення.

Дисертація Мачуляка Михайла Володимировича на тему «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» може бути рекомендована до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді з метою здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

На підставі результатів обговорення присутні на засіданні

ПОСТАНОВИЛИ:

Прийняти висновок щодо дисертаційної роботи Мачуляка Михайла Володимировича на тему: «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» як такої, що відповідає вимогам, які заявлені до дисертації.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми дисертаційного дослідження зумовлений сучасними тенденціями розвитку аграрного сектору, які характеризуються активним впровадженням цифрових технологій, методів точного землеробства та систем підтримки прийняття рішень. Зростання вимог до ефективності використання земельних ресурсів, оптимізації агротехнічних заходів і підвищення врожайності зернових культур обумовлює необхідність застосування нових підходів до моніторингу стану посівів і прогнозування результатів виробництва.

Суттєвим фактором, що впливає на якість управлінських рішень у сільському господарстві, є наявність просторової неоднорідності посівів та невизначеності даних дистанційного зондування, зокрема отриманих з безпілотних літальних апаратів. Існуючі методи аналізу вегетаційних індексів і прогнозування урожайності здебільшого базуються на емпіричних або статичних моделях, які не забезпечують адаптації до зміни умов вирощування та якості вхідних даних.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення математичних моделей, здатних адаптивно описувати динаміку вегетаційних індексів і формалізувати нелінійний характер розвитку рослин упродовж вегетаційного періоду. Поєднання таких моделей із сучасними геоінформаційними технологіями та сервісно-орієнтованими програмними рішеннями створює передумови для побудови ефективних систем моніторингу урожайності та формування обґрунтованих агротехнічних рекомендацій.

Таким чином, обрана тема дисертаційного дослідження є актуальною, науково та практично значущою і відповідає сучасним напрямам розвитку інженерії програмного забезпечення, геоінформаційних систем та технологій точного землеробства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках пріоритетного напрямку «Інформаційні та комунікаційні технології» відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пов'язана з науковими дослідженнями, які виконувалися за тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету. Результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання науково-дослідної роботи кафедри

комп'ютерних наук «Методи та програмні засоби для ідентифікації інтервальних моделей складних систем» (державний реєстраційний номер 0122U000627). Науково-дослідна робота виконувалася за безпосередньої участі автора.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є комп'ютеризація процесів моніторингу урожайності зернових культур у спосіб розроблення математичних моделей вегетаційних індексів та програмного середовища для їх реалізації.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз проблеми управління урожайністю зернових культур відповідно до технологій точного землеробства, виявити основні технічні засоби збору та систематизації базової інформації у підтримці моніторингу урожайності, а також методи математичного моделювання цього процесу;

- удосконалити метод ідентифікації моделі Моно для процесів насичення та редукції, що забезпечує апроксимаційні властивості моделей, погоджені з точністю вхідної інформації;

- обґрунтувати та розробити двокомпонентну адаптивну модель динаміки вегетаційних індексів, що дозволяє отримати адаптивну нелінійну неперервну модель вегетаційних індексів;

- розробити дворівневу адаптивну модель урожайності на основі поєднання лінійних та нелінійних оцінок історичних даних характеристик вегетаційних індексів, що забезпечує адаптивні та прогностичні властивості моделі;

- розробити мікросервісну архітектуру програмного забезпечення для побудови рекомендацій щодо агротехнічних заходів на базі динаміки вегетаційних індексів, яка уможлиблює розробку програмних систем для підвищення врожайності сільськогосподарських культур;

- провести апробацію розроблених методів і засобів на прикладі літературних даних динаміки вегетаційних індексів, урожайності та ущільнень ґрунту з метою підтвердження ефективності, стійкості та пояснюваності результатів моделювання.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та прогнозування урожайності зернових культур в умовах точного землеробства.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи та програмні засоби, призначені для прогнозування урожайності зернових культур на основі поточних спостережень та розроблення адаптивних рекомендацій щодо термінів та обсягів здійснення агротехнічних заходів.

Методи дослідження. Для розв'язання задач прогнозування кінцевої урожайності зернових культур та розроблення адаптивних рекомендацій щодо термінів та обсягів здійснення агротехнічних заходів використано:

методи системного аналізу, теорії ідентифікації, математичного моделювання, методи оптимізації – для розробки математичних моделей прогнозування;

методи об'єктно-орієнтованого проектування та програмування (UML-моделювання, принципи модульності та інкапсуляції) – під час програмної реалізації системи;

адаптивний підхід до побудови рекомендацій на основі модельних оцінок – для створення мікросервісів для автоматизованої генерації рекомендацій щодо термінів та обсягів здійснення агротехнічних заходів.

Наукова новизна отриманих результатів. У межах дисертаційної роботи вперше:

- 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;

- запропоновано відкриту мікросервісну архітектуру 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 уможливорює розробку програмних систем для надання рекомендацій щодо підвищення урожайності сільськогосподарських культур.

Удосконалено:

- 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 із точністю вхідної інформації;

- 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.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані на належному рівні, опубліковані в періодичних наукових виданнях, апробовані на науково-практичних міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Про належний рівень теоретичної обґрунтованості та достовірності наукових результатів, що містяться в дисертації, свідчить вдало підібрана методологічна основа дослідження та повнота опрацьованої інформаційної бази.

Практичне значення роботи. Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у створенні програмних засобів моніторингу та прогнозування урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій, реалізованих у вигляді єдиної програмної системи, придатної для використання в практиці точного землеробства. Розроблене програмне забезпечення виконує обробку даних дистанційного зондування, розрахунок вегетаційних індексів, моделювання їх динаміки та формування просторово орієнтованих агротехнічних рекомендацій у вигляді карт-завдань.

Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи використано:

- у ФГ «МАРТА–2007» при наданні консультаційних послуг з точного землеробства використано методології аналізу сільськогосподарських даних та програмно-аналітичні інструменти для оптимізації агротехнологічних процесів із використанням геоінформаційних технологій (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 18 травня 2025 р.);

- у ФГ «ІГРОВІС–2005» при реалізації програмних продуктів використано загальну архітектуру та підходи до реалізації програмно-технічних комплексів, які включають інтеграцію програмно-реалізованих засобів математичного моделювання та візуалізації із використанням ГІС технологій (акт про впровадження результатів дисертаційної роботи від 26 травня 2025 р.);

- у Західноукраїнському національному університеті в межах виконання науково-дослідної роботи «Методи та програмні засоби для ідентифікації інтервальних моделей складних систем» (номер 0122U000627) доповнено розділ «Методи структурної ідентифікації інтервальних моделей складних систем» (довідка про участь у виконанні НДР від 25 грудня 2025 р.);

- в освітньому процесі Західноукраїнського національного університету на кафедрі комп'ютерних наук при викладанні дисциплін: «Інтелектуальний аналіз даних», «Засоби аналізу даних на Python» (акт про впровадження в освітній процес від 16 грудня 2025 р.).

Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача. За результатами проведеного дослідження опубліковано 7 наукових праць загальним обсягом 54 сторінки, серед яких: 1 стаття у міжнародному науковому виданні, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 статті у фахових наукових виданнях України категорії “Б”; а також 3 публікації представлені як апробаційні результати у матеріалах конференцій, одна з яких входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. М. В. Мачуляк, Р. М. Пасічник, Л. В. Бабала. A method for improving the quality of image annotation in semantic monitoring GIS of business processes / Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 134–145. (0,4 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: розроблено алгоритм семантичного аналізу зображень та методи інтеграції в ГІС).

DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v14.no3.134>

2. Р.М. Пасічник, М.В. Мачуляк. Архітектурні особливості реалізації системи підтримки прийняття рішень в управлінні урожайністю зернових культур, Опт-ел. інф-енерг. техн., вип. 50, вип. 2, с. 96-103, груд. 2025.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-96-103>

3. Мачуляк М. В. Двокомпонентна адаптивна модель динаміки вегетаційних індексів для прогнозування урожайності сільськогосподарських культур / Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 597–608. (0,6 д.а.; особистий внесок: розроблено двокомпонентну адаптивну модель динаміки вегетаційних індексів та методи прогнозування урожайності сільськогосподарських культур).

DOI: <https://10.15276/imms.v15.no4.597>

4. М. В. Мачуляк, Р. М. Пасічник, Л. В. Бабала Мачуляк М. В. Vegetation Indices Dynamics Model in GIS Based on an Adaptive Predictive Method and the Mono System / 2025 IEEE International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), September 2025. pp. 186-191 (0,3 д.а. / 0,15 д.а.; особистий внесок: розроблено адаптивний прогностичний метод на основі системи Моно для прогнозування динаміки вегетаційних індексів). (Scopus)

DOI: <https://10.1109/ACIT65614.2025.11185754>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. М. В. Мачуляк, Р. М. Пасічник, Л. В. Бабала, Ю. І. Якименко. Modeling Vegetation Index Dynamics in GIS Based on Remote Observations / The Second International Conference of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development (YAISD), Ternopil, 8-9 May 2025 pp, 100-106. (0,25 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: реалізовано модуль автоматичного моделювання динаміки вегетаційних індексів та валідації результатів). (Scopus)

URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3974/short03.pdf>

6. Мачуляк М. В. Mathematical models of yield dynamics and identification of yield enhancement locations / III Міжнародна науково-практична конференція "INNOVATION AND DEVELOPMENT IN WORLD SCIENCE", 29-31.12.2025, Цюрих, Швейцарія: збірник тез доповідей. – 2025. – С. 136-140. (0,2 д.а.; особистий внесок: розроблено математичні моделі динаміки врожайності та методи ідентифікації локацій підвищення врожайності).

7. Мачуляк М. В. Software architecture for agricultural crop yield dynamics modeling based on UAV data / INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION, 25-27.12.2025: збірник тез доповідей. – 2025. – С. 116-119. (0,2 д.а.; особистий внесок: розроблено програмну архітектуру для моделювання динаміки врожайності сільськогосподарських культур на основі даних БПЛА).

Текст дисертаційної роботи пройшов перевірку на наявність текстових запозичень Strike Plagiarism. За результатами перевірки, виявлено відсутність текстових запозичень без належного посилання на джерело та встановлено, що дисертаційна робота Мачуляка Михайла Володимировича на тему: «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» **відповідає принципам академічної доброчесності.**

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи презентовано на 3 конференціях, зокрема:

- The Second International Conference of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development (YAISD), May 8-9, 2025;
- IV International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada. 25-27 December 2025.
- 3rd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Zurich, Switzerland, December 2025.

Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертаційну роботу написано українською мовою грамотно, на хорошому стилістичному рівні. Застосована в роботі наукова термінологія є загальноновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Зміст дисертації дозволяє скласти уявлення про основні положення, висновки і рекомендації, запропоновані автором. Стиль викладу матеріалів досліджень і наукових положень забезпечує їх належне сприйняття.

Відповідність дисертації нормативно встановленим вимогам та можливість подання до захисту. За актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Мачуляка Михайла Володимировича на тему: «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» відповідає спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року № 261 (зі змінами і доповненнями), 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 від 12 січня 2022 року № 44.

У результаті попередньої експертизи дисертації Мачуляка Михайла Володимировича та повноти основних результатів дослідження

УХВАЛИЛИ:

1. Пропонувати Вченій раді затвердити такий склад разової спеціалізованої вченої ради:

Головою разової спеціалізованої вченої ради призначити:

Дивака Миколу Петровича – доктора технічних наук, професора, проректора із наукової роботи Західноукраїнського національного університету;

Рецензентами:

Манжулу Володимира Івановича – доктора технічних наук, доцента, професора кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету;

Мельника Андрія Миколайовича – доктора технічних наук, професора, професора кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету;

Опонентами:

Павлова Сергія Володимировича – доктора технічних наук, професора, професора кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету;

Гребенніка Ігоря Валерійовича – доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

2. Рекомендувати новоствореній разовій спеціалізованій вченій раді прийняти дисертаційну роботу Мачуляка Михайла Володимировича на тему: «Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій» до розгляду та проведення захисту з метою присудження йому ступеня доктора філософії.

Голова засідання,
завідувач кафедри комп'ютерних наук,
д.т.н., професор



Андрій ПУКАС