

АНОТАЦІЯ

Мачуляк М. В. Математичні та програмні засоби моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення». – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному розв'язанню актуального науково-технічного завдання створення математичного та програмного забезпечення для автоматизованого збору, інтеграції, аналізу та прогнозування урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій. У сучасних умовах розвитку сільського господарства важливою тенденцією є перехід до прецизійного землеробства, де формування агротехнічних рішень залежить від можливості своєчасно отримувати повні, достовірні та структуровані відомості про стан посівів та їх продуктивність. Зростання обсягів різномірної інформації від БПЛА, поява нових типів сенсорних даних та активне використання цифрових ідентифікаторів зумовлюють підвищені вимоги до інформаційних систем агропромислового комплексу.

Актуальність дослідження обумовлена низкою факторів, притаманних сучасному аграрному виробництву. Передусім, значна частина сільськогосподарських підприємств працює в умовах фрагментованості даних моніторингу, що зберігаються у вигляді розрізнених локальних баз, зовнішніх репозитаріїв та результатів дистанційного зондування. Відсутність уніфікованих форматів даних ускладнює їх інтеграцію та підвищує ризики неточного прогнозування. Сучасні системи моніторингу урожайності, попри високий рівень розвитку технологій, здебільшого орієнтовані на збирання та візуалізацію даних і не пропонують математично обґрунтованих механізмів адаптивного прогнозування.

У роботі обґрунтовано, що традиційні методи моделювання урожайності потребують значних історичних масивів даних та мають статичний характер,

тоді як сучасні потреби передбачають застосування адаптивних систем, здатних працювати з неповними, зашумленими та нерівномірними даними, забезпечуючи постійне та адаптивне прогнозування із точністю, узгодженою із рівнями похибок вхідної інформації.

У першому розділі дисертації здійснено комплексний аналіз проблеми моніторингу урожайності зернових культур із використанням геоінформаційних технологій, що підтвердив її глобальну значущість та виявив ключову роль точного землеробства у підвищенні загальної урожайності. Проведено класифікацію існуючих методів моделювання урожайності зернових культур та відзначено недоліки сучасних підходів. Показано критичну важливість аналізу архітектур програмного забезпечення для моделювання урожайності та виявлення локацій її нарощення, оскільки архітектура визначає масштабованість, швидкість обробки даних та можливість інтеграції різномірних джерел.

Другий розділ присвячено розробці адаптивного методу прогнозування динаміки вегетаційних індексів та параметрів розвитку рослин на базі моделі Моно. Представлено метод побудови інтерполяційної моделі вегетаційних індексів на основі системи диференціальних рівнянь Моно та методу їх ідентифікації, який ґрунтується на наближених оцінках параметрів моделі із наступним уточненням за допомогою градієнтного методу Левенберга-Марквардта. Розроблено алгоритмічне забезпечення для реалізації адаптивного методу прогнозування динаміки вегетаційних індексів.

У третьому розділі представлено математичні моделі динаміки урожайності та виявлення локацій її нарощення. На основі системи диференціальних рівнянь Моно запропоновано нелінійну модель висот сільськогосподарських культур залежно від щільності ґрунту, що дозволяє за усередненою висотою рослин прогнозувати щільності ґрунтів та виявляти ділянки їх ущільнень. Розроблено адаптивну модель ансамблевої дискретної динаміки вегетаційних індексів по часових вікнах адаптації, доповнену

апроксимаційною моделлю Моно для прогнозування динаміки в довільній точці прогнозного інтервалу із задовільною точністю.

Четвертий розділ описує розробку програмного забезпечення системи моделювання динаміки урожайності. Створено архітектурні рішення та реалізовано програмну інтеграцію розробленого комплексу методів і математичних моделей у геоінформаційну систему. Розроблено модульну архітектуру програмного забезпечення, що забезпечує масштабованість, гнучкість і відкритість для інтеграції з іншими інформаційними системами. Система включає підсистеми зняття інформації від БПЛА, побудови ортофотопланів полів, зонування, створення карт вегетаційних індексів, моделювання урожайності та формування агротехнічних рекомендацій.

Практичне значення роботи полягає у створенні повнофункціональної системи моніторингу урожайності, яка може бути використана в сільськогосподарських підприємствах для підвищення ефективності землеробства, оптимізації використання добрив та виявлення проблемних ділянок полів. Розроблені математичні та програмні рішення забезпечують середні відносні похибки прогнозування на рівні 5% та створюють передумови для ефективного функціонування систем точного землеробства нового покоління.

Ключові слова: сільське господарство, точне землеробство, БПЛА, геоінформаційна система, геоінформаційні технології, екологічний моніторинг, моніторинг урожайності, зернові культури, вегетаційні індекси, великі дані, математичне моделювання, штучний інтелект, машинне навчання, адаптивні моделі, алгоритми, прогнозування динаміки, система диференціальних рівнянь Моно, параметрична ідентифікація, оптимізація, системи підтримки прийняття рішень, алгебра скінчених предикатів, нечітка логіка, база знань, агротехнічні рекомендації, архітектура програмного забезпечення, програмна архітектура, мікросервісна архітектура, програмне середовище, діаграма класів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мачуляк М. В. A method for improving the quality of image annotation in semantic monitoring GIS of business processes / М. В. Мачуляк, Р. М. Пасічник, Л. В. Бабала // 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://10.15276/imms.v14.№3.134>

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

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

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

<https://10.1109/ACIT65614.2025.11185754>

4. Мачуляк М. В. Двокомпонентна адаптивна модель динаміки вегетаційних індексів для прогнозування урожайності сільськогосподарських культур / М. В. Мачуляк // 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>.

5. Мачуляк М. В. Mathematical models of yield dynamics and identification of yield enhancement locations / М. В. Мачуляк // III Міжнародна науково-

практична конференція "INNOVATION AND DEVELOPMENT IN WORLD SCIENCE", 29-31.12.2025, Цюрих, Швейцарія : збірник тез доповідей. – 2025. – С. 136. (0,2 д.а.; особистий внесок: розроблено математичні моделі динаміки врожайності та методи ідентифікації локацій підвищення врожайності).

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

7. 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. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-96-103>; (ISSN 2311-2662 (Online), ISSN 1681-7893 (Print) (0,4 д.а.; особистий внесок здобувача М.В. Мачуляка становить 80%: розроблено концептуальну архітектуру превентивної системи підтримки прийняття рішень; програмно реалізовано алгоритми трендового аналізу вегетаційних індексів NDVI та MTCI; проведено експериментальну верифікацію ефективності методу прогнозування на 7-14 днів випередження відносно візуальних симптомів стресу культур)

ANOTATION

Maculyak M. V. Mathematical and Software Tools for Crop Yield Monitoring Using Geoinformation Technologies. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 121

«Software Engineering». – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The dissertation is dedicated to the comprehensive solution of the current scientific and technical problem of creating mathematical and software tools for automated collection, integration, analysis, and forecasting of cereal crop yields using geoinformation technologies. In modern agricultural development conditions, an important trend is the transition to precision farming, where the formation of agrotechnical decisions depends on the ability to timely obtain complete, reliable, and structured information about crop conditions and their productivity. The growth of heterogeneous information volumes from UAVs, the emergence of new types of sensor data, and the active use of digital identifiers create increased requirements for agricultural information systems.

The research relevance is determined by a number of factors inherent in modern agricultural production. Primarily, a significant portion of agricultural enterprises operates under conditions of fragmented monitoring data stored as scattered local databases, external repositories, and remote sensing results. The absence of unified data formats complicates their integration and increases the risks of inaccurate forecasting. Modern yield monitoring systems, despite the high level of technology development, are mainly focused on data collection and visualization and do not offer mathematically substantiated mechanisms for adaptive forecasting.

The work substantiates that traditional yield modeling methods require significant historical data arrays and have a static nature, while modern needs involve the application of adaptive systems capable of working with incomplete, noisy, and uneven data, providing continuous and adaptive forecasting with accuracy consistent with the error levels of input information.

The first chapter of the dissertation provides a comprehensive analysis of the problem of cereal crop yield monitoring using geoinformation technologies,

confirming its global significance and revealing the key role of precision agriculture in increasing overall productivity. A classification of existing methods for cereal crop yield modeling is conducted, and deficiencies of modern approaches are noted. The critical importance of analyzing software architectures for yield modeling and identification of yield enhancement locations is shown, as architecture determines scalability, data processing speed, and the ability to integrate heterogeneous sources.

The second chapter is devoted to developing an adaptive method for forecasting vegetation index dynamics and plant development parameters based on the Monod model. A method for constructing an interpolation model of vegetation indices based on the Monod differential equation system and their identification method is presented, which is based on approximate parameter estimates with subsequent refinement using the Levenberg-Marquardt gradient method. Algorithmic support for implementing the adaptive method for forecasting vegetation index dynamics is developed.

The third chapter presents mathematical models of yield dynamics and identification of yield enhancement locations. Based on the Monod differential equation system, a nonlinear model of agricultural crop heights depending on soil density is proposed, which allows forecasting soil densities and detecting areas of soil compaction based on average plant heights. An adaptive model of ensemble discrete dynamics of vegetation indices over temporal adaptation windows is developed, supplemented by a Monod approximation model for forecasting dynamics at arbitrary points in the forecast interval with satisfactory accuracy.

The fourth chapter describes the development of software for the yield dynamics modeling system. Architectural solutions are created and software integration of the developed complex of methods and mathematical models into a geoinformation system is implemented. A modular software architecture is developed that ensures scalability, flexibility, and openness for integration with other information systems. The system includes subsystems for UAV information acquisition, field orthophoto plan construction, zoning, vegetation index map creation, yield modeling, and agrotechnical recommendation formation.

The practical significance of the work lies in creating a full-functional yield monitoring system that can be used in agricultural enterprises to increase farming efficiency, optimize fertilizer use, and identify problematic field areas. The developed mathematical and software solutions provide average relative forecasting errors at the 5% level and create prerequisites for the effective functioning of next-generation precision farming systems.

Keywords: agriculture, precision agriculture, UAV, geographic information system, geoinformation technologies, environmental monitoring, yield monitoring, grain crops, vegetation indices, Big Data, mathematical modeling, artificial intelligence, machine learning, adaptive models, algorithms, dynamics forecasting, Monod system of differential equations, parametric identification, optimization, decision support systems, algebra of finite predicates, fuzzy logic, knowledge base, agrotechnical recommendations, software architecture, microservices architecture, software environment, class diagram.

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY THE TOPIC OF THESIS

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation were published:

1. Maculyak M. V. A method for improving the quality of image annotation in semantic monitoring GIS of business processes / M. V. Maculyak, R. M. Pasichnyk, L. V. Babala // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 134–145. (0.4 p.s. / 0.2 p.s.; personal contribution: developed algorithm for semantic image analysis and methods for GIS integration). DOI: <https://10.15276/imms.v14.no3.134>

2. Maculyak M. V. Modeling Vegetation Index Dynamics in GIS Based on Remote Observations / M. V. Maculyak, R. M. Pasichnyk, L. V. Babala, Yu. I. Yakymenko // The Second International Conference of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development (YAISD), Ternopil, 8-9 May 2025. (0.25 p.s. / 0.1 p.s.; personal contribution: implemented module for automatic modeling of

vegetation index dynamics and results validation). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3974/short03.pdf>

3. Maculyak M. V. Vegetation Indices Dynamics Model in GIS Based on an Adaptive Predictive Method and the Monod System / M. V. Maculyak, R. M. Pasichnyk, L. V. Babala // 2025 IEEE International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), September 2025. (0.3 p.s. / 0.15 p.s.; personal contribution: developed adaptive predictive method based on Monod system for forecasting vegetation index dynamics). DOI: <https://10.1109/ACIT65614.2025.11185754>

4. Maculyak M. V. Two-component adaptive model of vegetation index dynamics for agricultural crop yield forecasting / M. V. Maculyak // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – P. 597–608. (0.6 p.s.; personal contribution: developed two-component adaptive model of vegetation index dynamics and methods for agricultural crop yield forecasting). DOI: <https://10.15276/imms.v15.no4.597>

5. Maculyak M. V. Mathematical models of yield dynamics and identification of yield enhancement locations / M. V. Maculyak // III International Scientific-Practical Conference "INNOVATION AND DEVELOPMENT IN WORLD SCIENCE", 29-31.12.2025, Zurich, Switzerland : collection of abstracts. – 2025. – P. 136. (0.2 p.s.; personal contribution: developed mathematical models of yield dynamics and methods for identifying yield enhancement locations).

6. Maculyak M. V. Software architecture for agricultural crop yield dynamics modeling based on UAV data / M. V. Maculyak // INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION, 25-27.12.2025 : collection of abstracts. – 2025. – P. 116. (0.2 p.s.; personal contribution: developed software architecture for modeling agricultural crop yield dynamics based on UAV data).

7. Pasichnyk R.M., Machulyak M.V. "Architectural features of decision support system implementation in grain crop yield management," Opt.-el. inf.-energ. techn., vol. 50, no. 2, pp. 96-103, Dec. 2025. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-96-103>; (ISSN 2311-2662 (Online), ISSN 1681-7893 (Print)) (0.4 p.s.; personal

contribution of M.V. Machulyak constitutes 80%: developed conceptual architecture of preventive decision support system; programmatically implemented algorithms for trend analysis of vegetation indices NDVI and MTCI; conducted experimental verification of forecasting method effectiveness with 7-14 days advance prediction relative to visual stress symptoms in crops).