

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-64>

УДК 004.67

**СЕМЕНОВ СЕРГІЙ**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1244-9687>

e-mail: [semenov.s.y@nmu.one](mailto:semenov.s.y@nmu.one)

**ЛАКТИОНОВ ІВАН**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-7857-6382>

e-mail: [laktionov.i.s@nmu.one](mailto:laktionov.i.s@nmu.one)

## СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРОСТОРОВО- ЧАСОВИХ ДАНИХ АГРОМОНІТОРИНГУ

Цю статтю присвячено вирішенню актуальної науково-практичної задачі, що обумовлена потребою у високоефективних інформаційно-орієнтованих рішеннях трансформації просторово-часових даних агромоніторингу, які надходять у реальному часі від розподілених польових пристроїв. Метою статті є обґрунтування та формалізація структурно-алгоритмічної моделі програмного забезпечення, що реалізує багаторівневу агрегацію та обробку результатів агромоніторингу в межах інтегральної інформаційної технології на основі подієво-орієнтованих аналітичних засад і туманної обчислювальної архітектури. Під час досліджень цієї статті запропоновано контекстну та функціональну схеми програмно-алгоритмічного забезпечення інформаційної технології прогнозування врожаю агрокультур, що охоплює основні етапи збору, статистичної й інтелектуальної обробки та формування інтерпретованих рішень. Побудовано та описано принцип дії структурно-функціональної моделі взаємодії між обчислювальними рівнями програмно-алгоритмічного забезпечення, а також синтезовано діаграми послідовності обміну вимірювальними даними та діяльності програмних модулів. Запропоновано узагальнений формалізований вираз логіки комплексної програмної трансформації агроданних. Одержані результати можуть слугувати функціональною основою для впровадження інтелектуальних інформаційних і цифрових рішень у галузі сільського господарства, зокрема під час використання систем автоматизованої підтримки управлінських рішень у режимі реального часу. Перспективні напрямки подальших досліджень полягають у побудові та валідації адаптивних моделей та інтеграції алгоритмів пояснювального й генеративного штучного інтелекту до запропонованої архітектури.

Ключові слова: формалізація, структура, алгоритм, дані, агромоніторинг, прогнозування врожаю.

**SEMENOV SERGII, LAKTIONOV IVAN**

Dnipro University of Technology

## STRUCTURAL AND ALGORITHMIC FORMALISATION OF SOFTWARE FOR COMPREHENSIVE TRANSFORMATION OF SPATIAL AND TEMPORAL DATA OF AGRICULTURAL MONITORING

This article addresses a relevant scientific and practical problem arising from the need for highly efficient information-oriented solutions for transforming spatial and temporal agromonitoring data received in real time from distributed field devices. The aim of the study is to substantiate and formalise a structural and algorithmic model of software that enables multilevel aggregation and processing of agromonitoring results within an integrated information technology framework, based on event-driven analytical principles and a fog computing architecture. The research presents both contextual and functional diagrams of the software and algorithmic infrastructure for agricultural yield prediction systems, encompassing the key stages of data acquisition, statistical and intelligent processing and generation of interpretable decisions. The study also describes the operational foundations of the structural and functional interaction model across computational levels and synthesises sequence diagrams for data exchange and activity diagrams for software modules. A generalised formal expression of the logic for the comprehensive software-based transformation of agromonitoring data has been proposed. The obtained results provide a functional basis for implementing intelligent information and digital solutions in agriculture, particularly in deploying automated decision support systems operating in real-time environments. The prospects and importance of further research on the synthesis of software and algorithmic support for information-oriented crop yield forecasting are substantiated on the basis of the proposed formalized description of the process of intellectual transformation of agromonitoring data using modern intelligent information and digital technologies.

Keywords: formalisation, structure, algorithm, data, agromonitoring, yield prediction.

Стаття надійшла до редакції / Received 15.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 28.05.2025

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Науково-прикладна задача забезпечення високоефективної трансформації результатів інструментальних спостережень щодо стану агровиробничих об'єктів, зокрема у контексті прогнозування врожаю сільськогосподарських культур, передбачає агрегування й обробку динамічних потоків гетерогенних даних, що надходять від географічно розподілених сенсорних пристроїв у режимі реального часу [1, 2]. Ці вимірювальні дані відзначаються певним рівнем неструктурованості, інформаційною нерівномірністю, значною динамікою інформативних параметрів і дестабілізуючих факторів, а також наявністю шумової складової. Таким чином, постановка й розв'язання зазначеної

науково-прикладної задачі обумовлює потребу в структурно-алгоритмічній формалізації інформаційно-орієнтованої моделі програмного забезпечення комплексної трансформації даних агромоніторингу, що здатна ефективно функціонувати в умовах просторово-часової неоднорідності результатів спостережень та забезпечувати оперативну автоматизовану підтримку прийняття рішень на основі подієвої аналітики поточних результатів інструментального моніторингу [3, 4].

Ключовою відмінною рисою вимірювальних даних, що характеризують стан аграрних об'єктів і процесів, є їхня безперервна онлайн-генерація з чіткою геолокаційною й часовою прив'язкою, що обумовлює необхідність у високошвидкісній реакції програмно-алгоритмічних засобів агрегування та обробки в рамках інтегральних архітектур автоматизованих систем підтримки управлінських рішень у агросекторі. У сьогоденній практиці створення й використання інформаційних сервісів і цифрових платформ для опрацювання таких потоків даних значного поширення набули дві основні архітектурні парадигми, а саме: хмароцентрична та периферійно-розподілена [5, 6]. Їх принципи відмінності полягають у механізмах розподілу обчислювального навантаження між архітектурними рівнями: від локальних (польових) пристроїв до віддалених серверних потужностей за умови забезпечення єдиної логіки побудови мережевої інфраструктури агромоніторингу. Зазначена інфраструктура в більшості практичних додатків корелює з еталонною моделлю Інтернету речей [7, 8]. Саме в розрізі такої моделі реалізується сучасна цифрова трансформація агровиробничих процесів, де значна увага приділяється здатності систем до гнучкої, масштабованої та релевантної обробки просторово-часових даних у режимі реального часу.

Таким чином, основна мета цієї статті полягає в обґрунтуванні підходів до вискоефективної цифрової трансформації сільськогосподарської галузі завдяки розробці та дослідженню структурно-алгоритмічного забезпечення формалізації програмних засобів комплексної трансформації просторово-часових даних агромоніторингу під час прогнозування врожаю польових агрокультур.

**Підходи та методологія досліджень**

Методологічним базисом досліджень цієї статті є міждисциплінарний підхід на основі поєднання загальнонаукових і прикладних методів, що дозволяють обґрунтувати та формалізувати програмно-алгоритмічну архітектуру комплексної трансформації просторово-часових результатів інструментальних спостережень щодо стану об'єктів рослинництва відкритого ґрунту в умовах підвищеної варіативності інформаційних потоків та сенсорних даних.

Деталізацію застосованих методів і підходів досліджень статті наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Деталізація методологічних засад досліджень**

Метод / підхід до досліджень	Змістове призначення
Компаративний аналіз	Обґрунтування актуальності та мети досліджень цієї статті, а також доведення доцільності впровадження периферійно-розподіленої архітектури під час інформаційно-орієнтованого прогнозування врожаю агрокультур
Системний аналіз	Обґрунтування загальної структури досліджуваного програмно-алгоритмічного забезпечення та опису логіки роботи програмних компонент попередньої обробки, інтелектуального аналізу та генерації інтерпретованих рішень
Формалізація алгоритмічних процесів	
Структурне моделювання	Розробка та опис принципу дії структурно-функціональних моделей досліджуваного програмно-алгоритмічного забезпечення агромоніторингу
Критичний аналіз та логічне узагальнення	Оцінка показників ефективності формалізованого опису запропонованого програмно-алгоритмічного забезпечення агромоніторингу під час прогнозування врожаю сільськогосподарських культур та формулювання перспектив подальших досліджень

Функціональну основу досліджень цієї статті становить запропонована периферійно-розподілена (туманна) архітектура програмно-алгоритмічного забезпечення трансформації даних агромоніторингу (див. рис. 1), яка була обрана в якості базової на підставі компаративного аналізу релевантних наукових джерел [9, 10]. Проведений аналіз дозволив довести доцільність застосування такої архітектури в контексті задачі інформаційно-орієнтованого прогнозування врожаю агрокультур, як показано на рис. 2.

Отже, беручи до уваги специфіку агротехнічних виробництв відкритого ґрунту як об'єктів комп'ютерного моніторингу встановлено, що периферійно-розподілена архітектура дозволяє забезпечити ефективну подієво-орієнтовану аналітику даних, які генеруються в мінливих агрокліматичних умовах, завдяки об'єктивному розподілу агрегаційних і обчислювально-аналітичних процедур між архітектурними рівнями інформаційних технологій сільськогосподарського призначення,

що своєю чергою доводить перспективність і важливість розробки й упровадження таких архітектур до реальних умов використання.

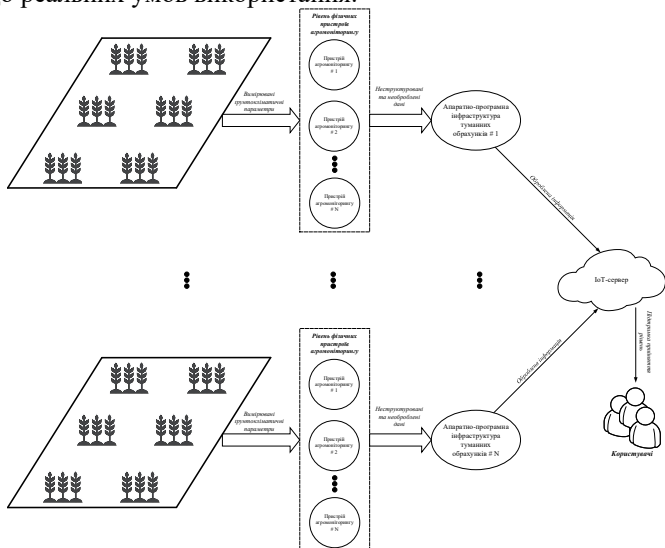


Рис. 1. Узагальнена периферійно-розподілена архітектура програмно-алгоритмічного забезпечення прогнозування врожаю агрокультур

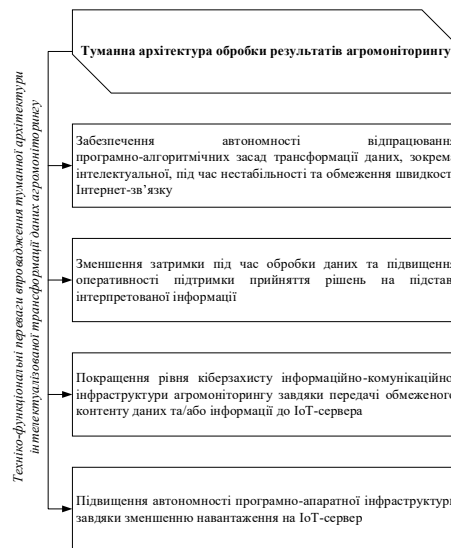


Рис. 2. Техніко-функціональні переваги використання туманної архітектури трансформації даних агромоніторингу

Результати досліджень

Розробка програмно-алгоритмічного забезпечення, що реалізує засади комплексної інтелектуальної обробки агромоніторингових даних у контексті туманної обчислювальної архітектури, потребує реалізації багаторівневого процесу трансформації різнотипної просторово-часової інформації. Задля цього на першому етапі досліджень було запропоновано контекстну структуру, яка дозволяє описати взаємодію між польовою сенсорною інфраструктурою, периферійними модулями попередньої обробки, засобами агрегації та предикативної аналітики, а також центральними сервісами, як показано на рис. 3. Своєю чергою ця контекстна структура дозволила деталізувати структурно-функціональне забезпечення формалізації розподілу комплексу агрегаційних, обчислювальних і аналітичних задач між ієрархічними рівнями програмно-алгоритмічного забезпечення агромоніторингу з обліком засад їх міжрівневої інфокомунікаційної взаємодії, як показано на рис. 4.

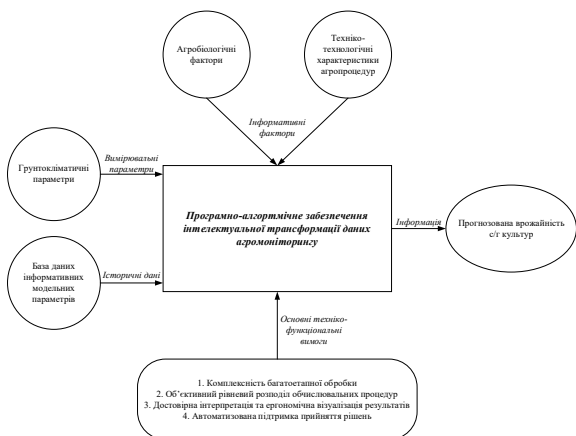


Рис. 3. Узагальнена контекстна структура комплексної трансформації результатів агромоніторингу

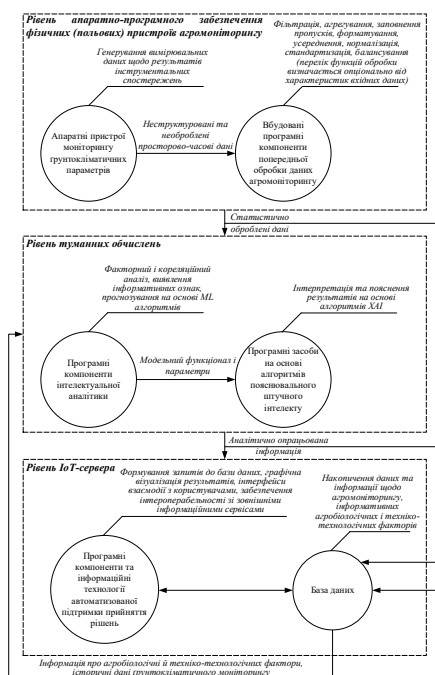


Рис. 4. Деталізована структура програмно-алгоритмічного забезпечення обробки агроданих

У відповідності до вищезазначеного запропоновано блок-схему алгоритму, що визначає зв'язки між процедурами розробки, розгортання й використання програмно-алгоритмічних рішень трансформації результатів агромоніторингу (див. рис. 5), що узгоджується із запропонованою структурою (див. рис. 4).

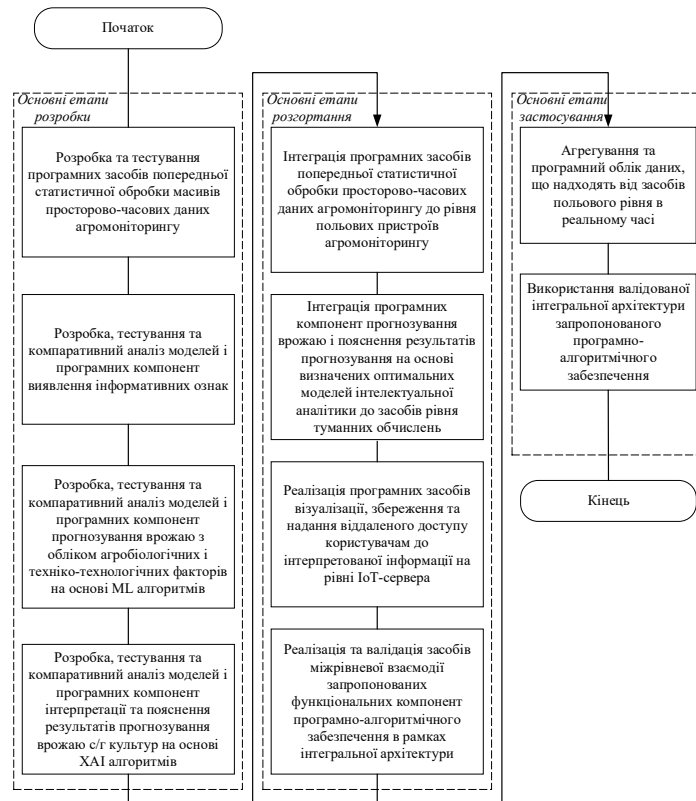


Рис. 5. Блок-схема алгоритму комплексних досліджень із розробки та застосування програмно-алгоритмічних рішень комплексної трансформації результатів агромоніторингу

У зазначених умовах науково обґрунтованим із методологічної точки зору підходом до формалізації логіки функціональної взаємодії між архітектурними рівнями та обчислювально-аналітичними модулями досліджуваного програмно-алгоритмічного забезпечення є побудова діаграм послідовності [11] та діяльності [12], як відповідно показано на рис. 6 і 7.

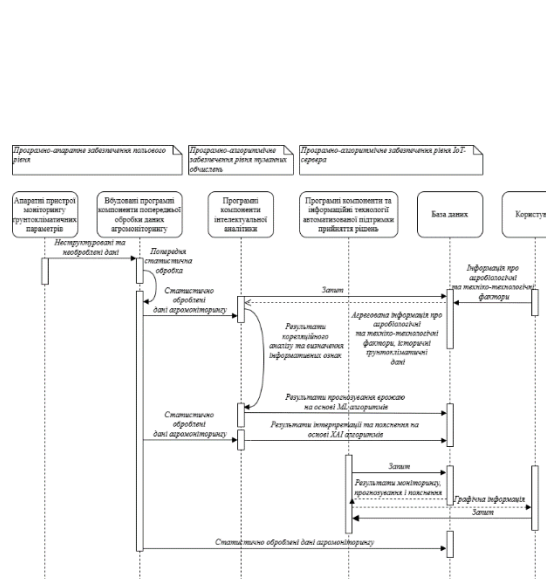


Рис. 6. Діаграма послідовності обміну вимірювальними даними в досліджуваному програмно-алгоритмічному забезпеченні

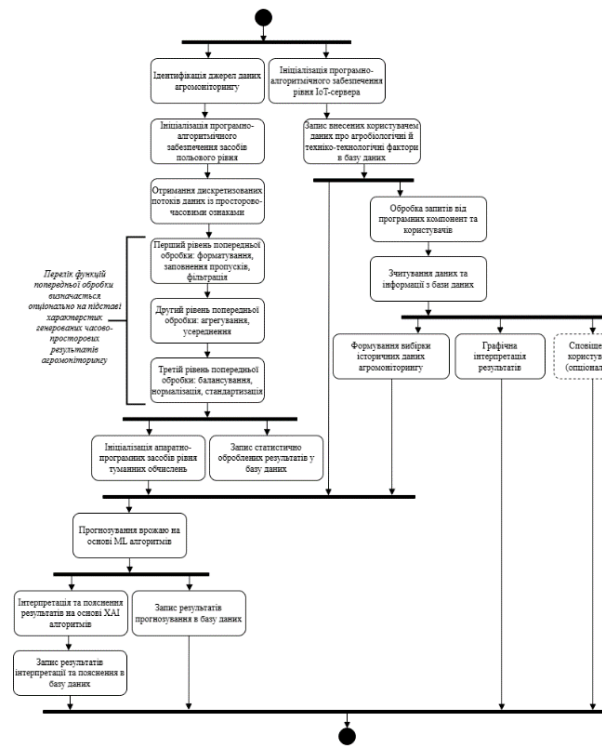


Рис. 7. Діаграма діяльності досліджуваного програмно-алгоритмічного забезпечення

З обліком функціональних засад потокового опрацювання вимірювальних даних і інформаційних повідомлень [13], а також запропонованих модельних діаграм (див. рис. 3–7), що описують логіку комплексної багатоетапної трансформації результатів агромоніторингу, було

запропоновано узагальнений формульний вираз, який у композиційній формі відтворює логіку реалізації агрегаційних, обчислювальних і аналітичних процедур:

$$\text{Results} = (F_{\text{interaction}} \circ F_{\text{analytics}} \circ F_{\text{preprocessing}})(\text{Data}, \text{Factors}), \quad (1)$$

де *Results* – інтерпретована інформація щодо результатів багатоетапного опрацювання даних, які доступні для ергономічного використання користувачами;  $F_{\text{interaction}}$  – функції та процедури візуалізації результатів обрахунків, інтерфейсної реалізації механізмів взаємодії з користувачами, а також забезпечення інтероперабельності з інформаційними сервісами;  $F_{\text{analytics}}$  – функції та процедури, які реалізують обчислювальні й аналітичні засади інтелектуальної обробки результатів моніторингу;  $F_{\text{preprocessing}}$  – функції та процедури, які реалізують обчислювальні алгоритми попередньої обробки вимірювальних даних; *Data* – гетерогенні дані агромоніторингу (поточні та історичні); *Factors* – алгоритмізовані техніко-технологічні й агробіологічні фактори;  $\circ$  – функція композиції.

Таким чином, одержані результати досліджень зі структурно-алгоритмічної формалізації програмного забезпечення комплексної трансформації просторово-часових даних агромоніторингу являють собою методологічний базис під час розробки, валідації та прикладного застосування програмно-алгоритмічних рішень цифрової трансформації агровиробничих процесів у контексті прогнозування врожаю агрокультур. До ключових перспектив науково-прикладних досліджень і розробок у контексті отриманих результатів у цій статті відносяться такі: реалізація програмно-алгоритмічних компонент адаптивної до конкретних типів агрокультур аналітики, зокрема шляхом інтеграції механізмів автоматизованого налаштування модельних параметрів у залежності від умов вирощування; впровадження алгоритмізованих засад пояснювального штучного інтелекту для підвищення інтерпретованості та об'єктивності прогнозних результатів; архітектурна інтеграція механізмів генеративного штучного інтелекту задля оперативної підтримки прийняття рішень щодо планування агропроцедур із підвищення стресостійкості польових культур.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Під час досліджень цієї статті було запропоновано та досліджено прикладні підходи щодо вирішення науково-практичної задачі, що полягала у формалізації структурно-функціональної організації програмно-алгоритмічного забезпечення інтелектуальної трансформації даних агромоніторингу в контексті прогнозування врожаю сільськогосподарських культур зі застосуванням концептуальних засад периферійно-розподіленої обчислювальної архітектури. Основні теоретичні положення й результати прикладної реалізації, отримані в межах цієї статті, полягають у такому:

1. Запропоновано узагальнену архітектурну модель периферійно-розподіленої інформаційної технології задля вирішення задач багаторівневої обробки просторово-часових результатів агромоніторингу, яка забезпечує децентралізований і подієво-орієнтований підхід до агрегування й аналітики вимірювальних даних в умовах динамічної мінливості агрокліматичних факторів.

2. Розроблено структурно-функціональний опис інформаційної технології агротехнічного спрямування, що формалізує кросрівневу взаємодію польових бездротових сенсорних пристроїв, засобів периферійних обчислень та серверної інфраструктури під час прогнозування врожаю агрокультур. Запропонований підхід враховує всі основні етапи побудови програмно-алгоритмічних рішень трансформації даних, а саме: розробку, тестування, валідацію, розгортання й експлуатацію.

3. Розроблено сукупність базових структурно-алгоритмічних моделей поведінки й взаємодії компонентів інформаційної технології, що дозволило обґрунтувати логіку функціонування, деталізувати інформаційні сценарії та забезпечити формалізоване представлення етапів реалізації основних процедур.

4. Обґрунтовано перспективність і важливість подальших досліджень із синтезу програмно-алгоритмічного забезпечення інформаційно-орієнтованого прогнозування врожаю агрокультур на основі запропонованого формалізованого опису процесу інтелектуальної трансформації даних агромоніторингу зі застосуванням сучасних інтелектуальних інформаційних і цифрових технологій.

### Впровадження і використання отриманих результатів

Дослідження цієї статті виконано в розрізі науково-дослідної теми «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час» (0124U000289), що виконується на замовлення Міністерства освіти і науки України.

### Література

1. Лактіонов І.С., Гнатушенко В.В., Каштан В.Ю., Дяченко Г.Г. Інтелектуальні інформаційні та комп'ютерні технології збору та аналізу даних агромоніторингу: монографія. Дніпро: НТУ «ДП», 2025. 235 с.
2. Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabarлак K., Shedlovska Y. A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 225. P. 1–31.

3. Yotov O., Aleksieva-Petrova A. Data-Driven Prediction Model for Analysis of Sensor Data. *Electronics*. 2024. Vol. 13 (10). P. 1–15.
4. Abioye E.A., Abidin M.S.Z., Mahmud M.S.A., Buyamin S., AbdRahman M.K.I, Otuozee A.O., Ramli M.S.A., Ijike O.D. IoT-based monitoring and data-driven modelling of drip irrigation system for mustard leaf cultivation experiment. *Information Processing in Agriculture*. 2021. Vol. 8 (2). P. 270–283.
5. Al Masarweh M., Alwada'n T., Afandi W. Fog Computing, Cloud Computing and IoT Environment: Advanced Broker Management System. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2022. Vol. 11 (4). P. 1–17.
6. Pisani F., Martins do Rosario V., Borin E. Fog vs. Cloud Computing: Should I Stay or Should I Go? *Future Internet*. 2019. Vol. 11 (2). P. 1–31.
7. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Технології інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 126 Інформаційні системи та технології, спеціалізації «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с.
8. CISCO: The Internet of Things Reference Model. URL: <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/0f1d1327c5195d1922175dd77878b9fb.pdf> (дата звернення 07.06.2025).
9. Fernando N., Shrestha S., Loke S.W., Lee K. On Edge-Fog-Cloud Collaboration and Reaping Its Benefits: A Heterogeneous Multi-Tier Edge Computing Architecture. *Future Internet*. 2025. Vol. 17 (1). P. 1–23.
10. Cao H., Wachowicz M. An Edge-Fog-Cloud Architecture of Streaming Analytics for Internet of Things Applications. *Sensors*. 2019. Vol. 19 (16). P. 1–32.
11. Lucidchart: UML Sequence Diagram Tutorial. URL: <https://www.lucidchart.com/pages/uml-sequence-diagram> (дата звернення 08.06.2025).
12. Lucidchart: UML Activity Diagram Tutorial. URL: <https://www.lucidchart.com/pages/uml-activity-diagram> (дата звернення 08.06.2025).
13. Krishnamurthi R., Kumar A., Gopinathan D., Nayyar A., Qureshi B. An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques. *Sensors*. 2020. Vol. 20 (21). P. 1–23.

#### References

1. Laktionov, I.S., Hnatushenko, V.V., Kashtan, V.Yu. & Diachenko, G.G. (2025). *Intelektualni informatsiini ta kompiuterni tekhnologii zboru ta analizu danykh ahromonitorynhu: monohrafiia [Intelligent information and computer technologies for collecting and analysing agro-monitoring data: a monograph]*. Dnipro. 235 p. (in Ukrainian).
2. Laktionov, I., Diachenko, G., Kashtan, V., Vizniuk, A., Gorev, V., Khabaralok, K. & Shedlovska, Y. (2024). A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 225, 1–31.
3. Yotov, O. & Aleksieva-Petrova, A. (2024). Data-Driven Prediction Model for Analysis of Sensor Data. *Electronics*, Vol. 13 (10), 1–15.
4. Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., AbdRahman, M.K.I, Otuozee, A.O., Ramli, M.S.A. & Ijike, O.D. (2021). IoT-based monitoring and data-driven modelling of drip irrigation system for mustard leaf cultivation experiment. *Information Processing in Agriculture*, Vol. 8 (2), 270–283.
5. Al Masarweh, M., Alwada'n, T. & Afandi W. (2022) Fog Computing, Cloud Computing and IoT Environment: Advanced Broker Management System. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 11 (4), 1–17.
6. Pisani, F., Martins do Rosario, V. & Borin, E. (2019). Fog vs. Cloud Computing: Should I Stay or Should I Go? *Future Internet*, Vol. 11 (2), 1–31.
7. Zhurakovskiy, B.Yu. & Zeniv, I.O. (2021). *Tekhnologii internetu rechei. Navchalnyi posibnyk [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 126 Informatsiini systemy ta tekhnologii, spetsializatsii «Informatsiine zabezpechennia robototekhnichnykh system» [Technologies of the Internet of Things. Study guide [Electronic resource]: a study guide for students majoring in 126 Information Systems and Technologies, specialisation 'Information Support of Robotic Systems']*. Kyiv. 271 p. (in Ukrainian).
8. CISCO: The Internet of Things Reference Model. Retrieved from: <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/0f1d1327c5195d1922175dd77878b9fb.pdf>.
9. Fernando, N., Shrestha, S., Loke, S.W. & Lee, K. (2025). On Edge-Fog-Cloud Collaboration and Reaping Its Benefits: A Heterogeneous Multi-Tier Edge Computing Architecture. *Future Internet*, Vol. 17 (1), 1–23.
10. Cao, H. & Wachowicz, M. (2019). An Edge-Fog-Cloud Architecture of Streaming Analytics for Internet of Things Applications. *Sensors*, 19 (16), 1–32.
11. Lucidchart: UML Sequence Diagram Tutorial. Retrieved from: <https://www.lucidchart.com/pages/uml-sequence-diagram>.
12. Lucidchart: UML Activity Diagram Tutorial. Retrieved from: <https://www.lucidchart.com/pages/uml-activity-diagram>.
13. Krishnamurthi, R., Kumar, A., Gopinathan, D., Nayyar, A. & Qureshi, B. (2020). An Overview of IoT Sensor Data Processing, Fusion, and Analysis Techniques. *Sensors*, Vol. 20 (21), 1–23.