

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-77>

УДК 004.738

**ЛАКТИОНОВ ІВАН**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

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

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

**ЖАБКО ОЛЕКСАНДР**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0002-7996-9115>

[zhabko.o.s@nmu.one](mailto:zhabko.o.s@nmu.one)

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОРІВНЕВИХ ІОТ-МЕРЕЖ У ЗАДАЧАХ АГРОМОНІТОРИНГУ

У статті досліджено програмно-орієнтований підхід до аналізу ефективності багаторівневих ІоТ-мереж, призначених для задач агромоніторингу. Основну увагу зосереджено на методології моделювання взаємодії різномірних бездротових технологій зв'язку під час функціонування в умовах сільськогосподарських виробництв рослинництва. Розглянуто принципи інтеграції мереж стільникового, локального та сенсорного рівнів із урахуванням обмежень за енергоспоживанням, пропускною здатністю та зоною покриття. Запропонований підхід дозволяє формалізувати вплив архітектури мережі на ключові показники її функціонування та створює передумови для обґрунтованого вибору інфокомунікаційних рішень у процесі проєктування систем агромоніторингу. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку програмно-алгоритмічних засобів аналізу й оптимізації ІоТ-інфраструктур у сільському господарстві.

**Ключові слова:** ІоТ-інфраструктура, агромоніторинг, комп'ютерне моделювання, мережа, архітектура.

LAKTIONOV IVAN, ZHABKO OLEKSANDR

Dnipro University of Technology

## RESULTS OF MODELLING AND PERFORMANCE EVALUATION OF MULTI-TIER IoT-NETWORKS IN AGRICULTURAL MONITORING APPLICATIONS

This paper presents a software-oriented evaluation of integrated IoT communication architectures applied to agricultural monitoring systems. The integration of multi-level wireless networks in agricultural monitoring systems is the subject of numerous scientific studies, which emphasize the advantages of combining several infocommunication technologies to overcome specific challenges in agriculture. The study focuses on practical deployment scenarios where heterogeneous wireless technologies, including cellular, local-area, and low-power sensor networks, are jointly used to support data acquisition and transmission in agricultural environments. Simulation results highlight the impact of network architecture on throughput, latency, energy efficiency, and coverage area under varying operational conditions. The outcomes demonstrate that multi-tier IoT network configurations offer greater adaptability and robustness than single-technology solutions. The results of simulation modeling provide both a quantitative and qualitative assessment of the effectiveness of using these technologies in the context of increasing agricultural production productivity. The main results of the study are as follows. As a result of the modeling, it was found that 5G technology provides a maximum data transfer rate, which significantly exceeds the corresponding indicators of LTE and Wi-Fi. At the same time, Zigbee technology, characterized by a low data transfer rate of 20 Kbit/s, demonstrates high energy efficiency with a consumption of about 0.05 W per device. The results of the simulation experiments allowed us to assess the effectiveness of the multi-level IoT network in agricultural applications. The main obtained indicators are summarized in the tables. The proposed approach provides practical insights for designing scalable and resilient communication infrastructures for precision agriculture applications.

**Keywords:** IoT-infrastructure, agricultural monitoring, computer modelling, network, architecture.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Лактіонов Іван, Жабко Олександр

### Вступ

Сільськогосподарський сектор характеризується зростаючими вимогами до оперативного моніторингу та керування даними з метою підвищення продуктивності й ефективності використання ресурсів. У міру того як агропромислові практики стають дедалі більш технологічно орієнтованими, зростає потреба в надійних і гнучких інфокомунікаційних мережах. У цій роботі обґрунтовується доцільність використання багаторівневих ІоТ-мереж у системах агромоніторингу та доводиться, що інтеграція різних бездротових технологій здатна ефективно враховувати специфічні особливості й виклики аграрного середовища [1].

Метою дослідження є формування узагальненої моделі, яка дозволяє описати динамічну взаємодію різних стандартів бездротового зв'язку та оцінити їх сукупний вплив на функціонування систем агромоніторингу. Використання переваг кожної технології, зокрема високої швидкості передавання даних у мережах 5G, широкої зони покриття LTE, а також низького енергоспоживання Zigbee і Wi-Fi, створює передумови для оптимізації характеристик мережевої інфраструктури в прикладних задачах сільськогосподарського моніторингу [2].

### Аналіз відомих науково-прикладних робіт

Інтеграція багаторівневих бездротових мереж у системах агромоніторингу є предметом численних наукових досліджень, у яких підкреслюються переваги поєднання декількох інфокомунікаційних технологій для подолання специфічних викликів сільського господарства. До таких викликів, зокрема, належать значні

площі сільськогосподарських угідь, різноманітність рельєфу, а також потреба у надійному і швидкодіючому зв'язку для підтримки сучасних агротехнологій, що керуються даними.

Низка досліджень зосереджена на ролі технології 5G у підвищенні ефективності агровиробничих процесів. Так, інтеграція 5G з Internet of Things (IoT) забезпечує суттєві переваги для точного землеробства завдяки можливості збору даних у режимі реального часу та підвищенню обґрунтованості процесів прийняття рішень [1, 3–6]. Це має вагоме значення під час моніторингу стану посівів, ґрунтових характеристик та інших факторів, що безпосередньо впливають на врожайність агрокультур. Окрім цього, 5G сприяє розвитку комп'ютеризації сільського господарства шляхом забезпечення швидкого й надійного обміну даними між пристроями, що є критично важливим для застосувань розумного фермерства [2, 7, 8]. Зокрема, така інфраструктура підтримує функціонування автономної техніки, а також забезпечуючи точне та ефективне виконання польових операцій.

Поєднання технологій LTE та Wi-Fi розглядається в контексті багаторівневих мереж як підхід до формування більш ефективних рішень для розумного сільського господарства за рахунок підвищення зони покриття та надійності зв'язку у сільській місцевості [2, 9]. Такі комбіновані рішення дозволяють зменшити «прогалини» покриття та забезпечити стабільне передавання даних під час моніторингу агротехнологічних процесів, особливо в регіонах, де розгортання суцільної інфраструктури 5G наразі є технічно неможливим або економічно недоцільним. Інтеграція різних мережевих технологій створює умови для побудови та гнучкого розгортання систем агромоніторингу без потреби у масштабних інфраструктурних витратах.

Важливу роль у багаторівневих мережах відіграє також технологія Zigbee, особливо в поєднанні з іншими засобами зв'язку, що зумовлено її низьким енергоспоживанням та придатністю до впровадження в сенсорних мережах, розгорнутих на великих територіях [10]. Бездротові сенсорні мережі (WSN) на основі Zigbee забезпечують ефективний моніторинг параметрів довкілля, зокрема температури, вологості повітря та ґрунту, що є критично важливими для точного землеробства. В сучасних дослідженнях також розглянуто різні реалізації сенсорів NPK, які демонструють можливості WSN щодо підвищення ефективності контролю ґрунтових характеристик і управління поживними речовинами в агровиробничих умовах [11]. Такі сенсори є дієвими під час підтримання родючості ґрунтів і забезпечення оптимальних рівнів азоту, фосфору та калію, що безпосередньо впливає на продуктивність агрокультур.

Окрім цього, комплексний аналіз бездротових мереж часто доповнюється бібліометричними дослідженнями, які дозволяють глибше оцінити тенденції та ключові напрями розвитку відповідних технологій [12]. Подібні підходи сприяють кращому розумінню еволюції цифрового сільського господарства та ідентифікації перспективних напрямів подальших досліджень, що можуть привести до створення більш ефективних багаторівневих мережевих рішень. Паралельно з цим активно досліджуються IoT-застосування у сфері точного землеробства, оскільки вони забезпечують інтеграцію сенсорних пристроїв, автоматизованих систем і засобів аналітики даних. Результати досліджень свідчать, що використання IoT у сільському господарстві сприяє підвищенню точності прогнозування врожаю, виявленню шкідників і оптимізації зрошення, що є критично важливими складовими сталого агровиробництва [4, 13, 14]. У цілому майбутнє аграрної галузі пов'язується з інтеграцією декількох бездротових технологій, кожна з яких виконує визначену функцію в підвищенні ефективності та надійності збору даних і взаємодії пристроїв у різноманітних аграрних умовах.

Зазначені тенденції свідчать про те, що інтеграція багаторівневих бездротових мереж, зокрема шляхом поєднання 5G, LTE, Wi-Fi, Zigbee та інших IoT-технологій, є не лише перспективним напрямом, а й об'єктивною необхідністю для подальшого розвитку сільського господарства з урахуванням його технологічних викликів.

### Методологія досліджень

Імітаційне моделювання багаторівневої IoT-мережі виконано з використанням програмного середовища NS-3, яке забезпечує можливість відтворення взаємодії мережевих компонентів, наближеної до реальних умов функціонування. Застосування цього інструментарію є доцільним для аналізу показників ефективності багаторівневих мереж у системах агромоніторингу. Схематичне подання обраної мережі наведено на рис. 1.

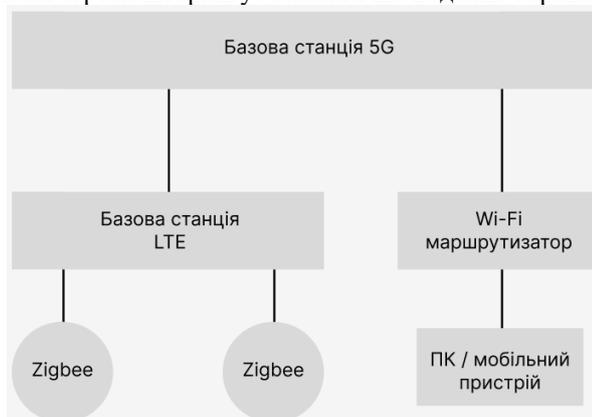


Рис. 1. Схеми імітаційної моделі багаторівневої IoT-мережі

Основні параметри мережі, які було враховано під час імітаційного моделювання, подано в табл. 1.

Таблиця 1

**Основні параметри мережі, використані в процесі моделювання**

Параметр мережі	Опис
Швидкість передавання даних	Для кожної технології (5G, LTE, Wi-Fi, Zigbee) змодельовано відповідні значення пропускної здатності
Частотні діапазони	Враховано взаємні завади між технологіями під час одночасної роботи в спільному середовищі
Енергоспоживання	Оцінено споживання енергії різними типами пристроїв (сенсори, базові станції, маршрутизатори)
Топологія мережі	Розміщення базових станцій, Wi-Fi-маршрутизаторів і Zigbee-сенсорів здійснено з урахуванням вимог аграрних систем
Інтегровані бездротові стандарти	5G, LTE, Wi-Fi, Zigbee з індивідуальними характеристиками для кожної технології

Основні параметри IoT-мережі, що враховувалися під час проведення комп'ютерних експериментів, наведено в табл. 2. Для дослідження взаємодії різних бездротових технологій було запропоновано декілька сценаріїв, які дозволяють оцінити ефективність їх спільного функціонування в задачах агромоніторингу.

Таблиця 2

**Опис змодельованих сценаріїв**

Сценарій	Опис
1	Взаємодія між LTE та Wi-Fi: перемикання з LTE на Wi-Fi при вході пристрою в зону покриття Wi-Fi з метою зменшення навантаження на стільникову мережу та підвищення енергоефективності
2	Інтеграція Zigbee з LTE/5G: передавання даних від сенсорів через Zigbee до вузлів агрегації, підключених до LTE або 5G, з урахуванням енергоспоживання та затримки
3	Використання 5G для моніторингу в режимі реального часу та автономного керування: забезпечення стабільного з'єднання для керування дронами й роботизованими системами на великих сільськогосподарських площах

Дослідження взаємодії компонентів IoT-мережі в процесі тестування здійснювалося у кілька етапів, детально описаних у табл. 3.

Таблиця 3

**Схема тестування**

Етап тестування	Опис
Налаштування параметрів	Визначення ключових показників ефективності, зокрема швидкості передавання даних, затримки, втрат пакетів та енергоспоживання
Збирання даних	Реєстрація даних із мережевих пристроїв для оцінювання якості передавання та стабільності з'єднання за різних умов
Керування переходами між технологіями	Тестування сценаріїв перемикання між технологіями залежно від рівня сигналу, навантаження мережі або енергоефективності, що забезпечує адаптацію мережі до змінних умов

**Результати досліджень**

Результати проведених імітаційних експериментів дозволили оцінити ефективність багаторівневої IoT-мережі в умовах сільськогосподарського застосування. Основні отримані показники узагальнено в табл. 4.

Таблиця 4

**Ключові показники ефективності бездротових технологій**

Показник	5G	LTE	Wi-Fi	Zigbee
Швидкість передавання даних (Мбіт/с)	Висока (до 1000 Мбіт/с)	Середня (до 300 Мбіт/с)	Середня (до 150 Мбіт/с)	Низька (до 1 Мбіт/с)
Затримка (мс)	Низька (<10 мс)	Середня (20–50 мс)	Низька–середня (10–30 мс)	Висока (понад 100 мс)
Зона покриття (м)	Широка (декілька км, міські та сільські умови)	Широка (до кількох км)	Локальна (до 100–200 м)	Мала (10–100 м, оптимально для сенсорів)
Енергоспоживання	Середнє (з адаптивним керуванням потужністю)	Високе (потребує стабільних джерел живлення)	Середнє–високе (залежить від режиму використання)	Дуже низьке (оптимізоване для сенсорних мереж)

Оцінювання показника енергоспоживання здійснювалося для різних бездротових технологій окремо. Узагальнені результати наведено в табл. 5.

Таблиця 5

## Характеристики енергоспоживання бездротових технологій

Технологія	Енергоспоживання	Тривалість роботи від батареї	Зона покриття	Призначення
5G	~2–3 Вт	Потребує стабільного живлення	до 1 км (у сільській місцевості)	дистанційний моніторинг великих територій
LTE	~2–3 Вт	Потребує стабільного живлення	до 10 км	довготривалий моніторинг у віддалених районах
Wi-Fi	~1–2 Вт	Обмежена через підвищене енергоспоживання	50–100 м (на відкритій місцевості)	локальне підключення для швидкого передавання даних
Zigbee	~0,01–0,1 Вт	Кілька місяців або років	до 100 м	низькопотужні IoT-сенсори для теплиць або невеликих ділянок

На підставі оцінки характеристик досліджуваних мережевих технологій було синтезовано сукупність переваг їх інтеграції в межах однієї інфокомунікаційної інфраструктури, як в узагальненому вигляді наведено в табл. 6.

Таблиця 6

## Переваги інтеграції багаторівневої мережі для аграрних систем

Перевага інтеграції	Вплив на системи агромоніторингу	Механізм реалізації	Чинники, що сприяють реалізації
Розширені можливості покриття	Розширює робочу зону в різних ландшафтах, забезпечуючи доступ до віддалених полів	Поєднання широкої зони покриття 5G із надійністю LTE дозволяє адаптувати мережу до різних умов	Використання комплементарних частотних діапазонів і сучасних методів модуляції 5G та LTE
Оптимізоване використання енергії	Зменшує енергоспоживання та забезпечує тривалу роботу сенсорних мереж	Низьке енергоспоживання Zigbee забезпечує сталу роботу сенсорів із тривалим ресурсом акумуляторів	Застосування Zigbee для низькопотужних застосувань та оптимізація режимів сну/пробудження пристроїв
Безперервний зв'язок завдяки перемикачню технологій	Забезпечує стабільне передавання даних і мінімізує простій систем моніторингу	Динамічне перемикачню між LTE, 5G та Wi-Fi відповідно до поточних умов	Використання адаптивних протоколів маршрутизації та інтелектуальних механізмів керування мережею
Підвищена надійність і відмовостійкість мережі	Підвищує надійність передавання даних у критично важливих аграрних застосуваннях	Перенаправлення трафіку альтернативними каналами в разі відмови окремих технологій	Інтеграція кількох комунікаційних каналів і протоколів із підтримкою механізмів резервування

Графічну інтерпретацію технічних і функціональних характеристик досліджуваних IoT-технологій мережевої організації систем агромоніторингу, які одержано в результаті серії комп'ютерних експериментів, наведено на рис. 2 і 3.

Отримані результати ілюструють, що багаторівневий підхід дозволяє ефективно поєднувати сильні сторони кожної технології, формуючи комплексне рішення для різноманітних задач аграрного сектору. Найбільш ефективні комбінації технологій узагальнено в табл. 7.

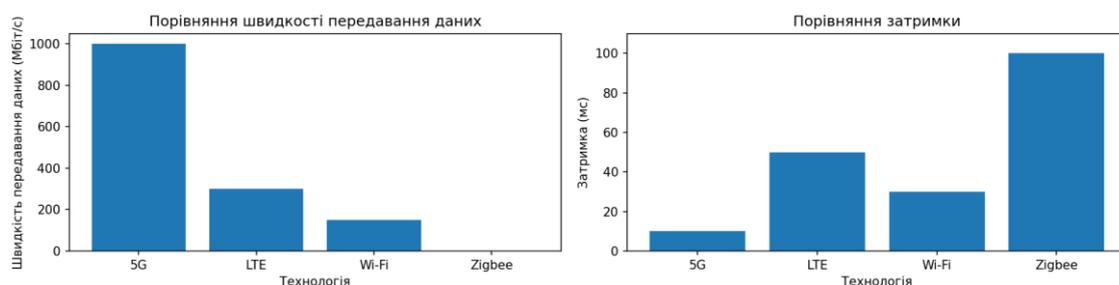


Рис. 2. Гістограми порівняння швидкості передавання даних та затримки між технологіями

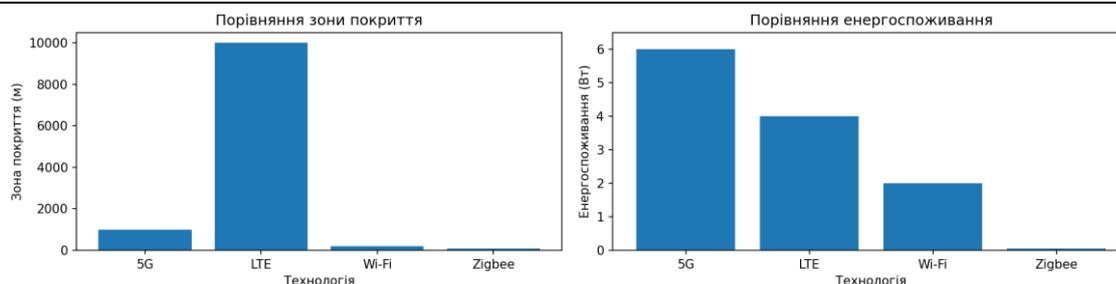


Рис. 3. Гістограми порівняння зони покриття та рівнів енергоспоживання між технологіями

Таблиця 7

**Ефективні комбінації бездротових технологій**

Комбінація	Перевага
5G + LTE	Результати моделювання показали, що 5G забезпечує швидкість передавання даних до 1 Гбіт/с, тоді як LTE підтримує стабільне з'єднання на рівні 250 Мбіт/с. Така комбінація гарантує безперервний зв'язок на великих сільськогосподарських територіях, де LTE може виконувати роль резервного каналу за відсутності покриття 5G
LTE + Wi-Fi	LTE забезпечує покриття віддалених ділянок зі швидкістю до 250 Мбіт/с на відстані 8000 м, тоді як Wi-Fi надає високошвидкісний доступ до 150 Мбіт/с у межах 250 м. Поєднання цих технологій підвищує ефективність обміну даними в локалізованих зонах агропідприємств
5G + Zigbee	Моделювання підтвердило ефективність збору даних від сенсорів Zigbee з енергоспоживанням ~0,05 Вт (на 1 пристрій) і швидкістю 20 Кбіт/с, тоді як високошвидкісні канали 5G забезпечують оперативне передавання цієї інформації до центрів обробки даних
Багаторівнева інтеграція	Ієрархічна структура мережі передбачає використання 5G і LTE як магістрального рівня, тоді як Wi-Fi та Zigbee забезпечують локальний і енергоефективний обмін даними. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до різноманітних аграрних умов, підвищуючи масштабованість і загальну ефективність мережі

Отримані результати свідчать, що багаторівнева IoT-мережа не лише покращує показники зв'язку та енергоефективності, а й формує надійну інфокомунікаційну інфраструктуру, здатну підтримувати широкий спектр аграрних застосувань. Інтеграція різних бездротових технологій забезпечує підвищення гнучкості, масштабованості та адаптивності систем агромоніторингу до змінних експлуатаційних умов.

**Висновки з даного дослідження та практичні рекомендації**

У роботі показано, що багаторівневі IoT-мережі є перспективним рішенням для задоволення інфокомунікаційних потреб систем агромоніторингу. Інтеграція декількох бездротових технологій, зокрема 5G, LTE, Wi-Fi та Zigbee, дозволяє оптимізувати характеристики мережі в різних умовах сільськогосподарського застосування. Результати імітаційного моделювання забезпечують як кількісну, так і якісну оцінку ефективності використання зазначених технологій у контексті підвищення продуктивності аграрного виробництва. Основні результати дослідження полягають у такому. У результаті моделювання встановлено, що технологія 5G забезпечує максимальну швидкість передавання даних, що суттєво перевищує відповідні показники LTE та Wi-Fi. Водночас технологія Zigbee, характеризуючись низькою швидкістю передавання даних на рівні 20 Кбіт/с, демонструє високу енергоефективність зі споживанням близько 0,05 Вт на один пристрій. Це підкреслює компроміс між швидкістю передавання даних та енергоспоживанням при виборі технологій для конкретних прикладних задач. Отримані результати підтверджують доцільність використання 5G для застосувань у режимі реального часу в аграрному секторі, зокрема для керування автономною технікою та моніторингу за допомогою безпілотних літальних апаратів. Використання Zigbee у складі сенсорних мереж дозволяє суттєво знизити загальний рівень енергоспоживання багаторівневої системи. Поєднання низькопотужних сенсорних технологій із високошвидкісними каналами зв'язку, такими як 5G, забезпечує ефективне передавання даних без значного виснаження енергетичних ресурсів, що сприяє подовженню терміну експлуатації пристроїв. На підставі досліджень доведено, що багаторівневий підхід до побудови IoT-мереж забезпечує суттєві переваги з погляду швидкості передавання даних та енергоефективності, що робить його ефективним інструментом підвищення продуктивності та сталості сільськогосподарського виробництва. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення механізмів інтеграції окремих технологій, зокрема в умовах необхідності швидкого масштабування систем. Систематичне оцінювання й оптимізація характеристик багаторівневих мереж створюють передумови для впровадження більш інтелектуальних і ефективних систем агромоніторингу.

**Впровадження і використання отриманих результатів**

Дослідження статті виконані в рамках науково-дослідної теми «Програмно-алгоритмічні рішення інформаційно-аналітичних систем сільськогосподарського призначення на основі штучного інтелекту в мінливих агрокліматичних умовах», що виконується на замовлення Міністерства освіти і науки України.

## Література

1. Alahmad T., Neményi M., Nyéki A. Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (10). P. 1–20.
2. Karunathilake E.M.B.M., Le A.T., Heo S., Chung Y.S., Mansoor S. The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*. 2023. Vol. 13 (8). P. 1–26.
3. Haque A.K.M.B., Mondol Zihad M.O., Hasan M.R. 5G and Internet of Things – Integration Trends, Opportunities, and Future Research Avenues. In: *B. Bhushan et al. (eds), 5G and Beyond, Singapore*. 2023. P. 217–245.
4. Abu N.S., Wan Daud W.M.B., Ong C.H., Kassim A.M., Izzuddin T.A., Sukhaimie M.N., Norasikin M.A., Rasid A.F.A. Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*. 2022. Vol. 3 (3). P. 338–347.
5. Fuentes-Peñailillo F., Gutter K., Vega R., Carrasco G. Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. Vol. 13 (4). P. 1–26.
6. Liu J., Shu L., Lu X., Liu Y. Survey of Intelligent Agricultural IoT Based on 5G. *Electronics*. 2023. Vol. 12 (10). P. 1–46.
7. Sivasubramaniam R., Kavitha R., Gitanjali J., Saiprasanth R. Role of 5G Technology in Enhancing Agricultural Mechanization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1258 (1). P. 1–8.
8. Deepakraj D., Raja K. Hybrid Data Aggregation Algorithm for Energy Efficient Wireless Sensor Networks, In: *Third Int. Conf. on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*. 2021. P. 1–6.
9. Bilal M., Tayyab M., Hamza A., Shahzadi K., Rubab F. The Internet of Things for Smart Farming: Measuring Productivity and Effectiveness. *Eng. Proc.* 2023. Vol. 58 (1). P. 1–7.
10. Laktionov I.S., Vovna O.V., Kabanets M.M., Sheina H.O., Getman I.A. Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instrumentation Measure Metrologie*. 2021. Vol. 20 (6). P. 289–300.
11. Musa P., Sugeru H., Wibowo E.P. Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*. Vol. 24 (1). 2024. P. 1–14.
12. Abdollahi A., Rejeb K., Rejeb A., Mostafa M., Zailani S. Wireless Sensor Networks in Agriculture: Insights from Bibliometric Analysis. *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (21). P. 1–22.
13. Kiran, Saikanth D.R.K., Saikia A.R., Chintey R., Talukdar N., Bahadur R., Vasuki A. Smart Agriculture: Technologies, Practices, and Future Directions. *Int. J. of Environ. and Climate Change*. 2023. Vol. 13 (12). P. 689–695.
14. Friha O., Ferrag M.A., Shu L., Maglaras L., Wang X. Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. *IEEE/CAA Journal of Autom. Sinica*. Vol. 8 (4). 2021. P. 718–752.

## References

1. Alahmad, T., Neményi, M. & Nyéki, A. (2023). Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*, 13 (10), 1–20.
2. Karunathilake, E.M.B.M., Le, A.T., Heo, S., Chung, Y.S. & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, 13 (8), 1–26.
3. Haque, A.K.M.B., Mondol Zihad, M.O. & Hasan, M.R. (2023). 5G and Internet of Things—Integration Trends, Opportunities, and Future Research Avenues. In: *B. Bhushan et al. (eds), 5G and Beyond, Singapore*, 217–245.
4. Abu, N.S., Wan Daud, W.M.B., Ong, C.H., Kassim, A.M., Izzuddin, T.A., Sukhaimie, M.N., Norasikin, M.A. & Rasid A.F.A. (2022). Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*, 3 (3), 338–347.
5. Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R. & Carrasco, G. (2024). Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13 (4), 1–26.
6. Liu, J., Shu, L., Lu, X. & Liu, Y. (2023). Survey of Intelligent Agricultural IoT Based on 5G. *Electronics*, 12 (10), 1–46.
7. Sivasubramaniam, R., Kavitha, R., Gitanjali, J. & Saiprasanth, R. (2023). Role of 5G Technology in Enhancing Agricultural Mechanization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1258 (1), 1–8.
8. Deepakraj, D. & Raja, K. (2021). Hybrid Data Aggregation Algorithm for Energy Efficient Wireless Sensor Networks, In: *Third Int. Conf. on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, 1–6.
9. Bilal, M., Tayyab, M., Hamza, A., Shahzadi, K. & Rubab, F. (2023). The Internet of Things for Smart Farming: Measuring Productivity and Effectiveness. *Eng. Proc.*, 58 (1), 1–7.
10. Laktionov, I.S., Vovna, O.V., Kabanets, M.M., Sheina, H.O. & Getman, I.A. (2021). Information Model of the Computer-Integrated Technology for Wireless Monitoring of the State of Microclimate of Industrial Agricultural Greenhouses. *Instr. Measure Metrologie*, 20 (6), 289–300.
11. Musa, P., Sugeru, H. & Wibowo, E.P. (2024). Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*, 24 (1), 1–14.
12. Abdollahi, A., Rejeb, K., Rejeb, A., Mostafa, M. & Zailani, S. (2021). Wireless Sensor Networks in Agriculture: Insights from Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 13 (21), 1–22.
13. Kiran, Saikanth, D.R.K., Saikia, A.R., Chintey, R., Talukdar, N., Bahadur, R. & Vasuki, A. (2023). Smart Agriculture: Technologies, Practices, and Future Directions. *Int. J. of Environ. and Climate Change*, 13 (12), 689–695.
14. Friha, O., Ferrag, M.A., Shu, L., Maglaras, L. & Wang, X. (2021). Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. *IEEE/CAA Journal of Autom. Sinica*, 8 (4), 718–752.