

УДК 631.1:005.8:004.89(477)

DOI: 10.60022/2(3)-25S

Волкова Неля Василівна

кандидат економічних наук, доцент

Доцент кафедри підприємництва і права

Полтавський державний аграрний університет, Україна

Volkova Nelya

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

Associate Professor of the Department of Entrepreneurship and Law

Poltava State Agrarian University, Ukraine

ORCID: 0000-0002-8374-1546

Петренко Максим Андрійович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

Полтавський державний аграрний університет, Україна

Petrenko Maksym

PhD Student

Poltava State Agrarian University, Ukraine

ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ В АГРОБІЗНЕСІ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА СТРАТЕГІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

Анотація. У результаті аналітичного огляду виокремлено п'ять ключових елементів цифрового моніторингу, які найчастіше згадуються у світових дослідженнях: *IoT*-сенсори, штучний інтелект (AI), дистанційне зондування (RS), *edge computing* та системи підтримки прийняття рішень (DSS). Встановлено тенденцію до інтеграції зазначених інструментів у комплексні платформи з високим ступенем автономності, адаптивності та екологічної орієнтованості. Розроблено типові стратегії цифрового моніторингу для агропідприємств залежно від рівня цифрової зрілості та ресурсної спроможності. Запропоновано алгоритм впровадження адаптивної моделі цифрового моніторингу для агросектору України, що базується на послідовній інтеграції технологій з урахуванням інституційних, технічних та економічних умов. Проведене дослідження створює методологічне підґрунтя для розбудови інноваційної моделі цифрового агробізнесу, орієнтованої на стійкий розвиток.

Ключові слова: цифровий моніторинг, агробізнес, *IoT*, штучний інтелект, дистанційне зондування, системи підтримки рішень, *edge computing*, стратегія впровадження, сталий розвиток.

DIGITAL MONITORING SYSTEMS AS A STRATEGIC INSTRUMENT FOR IMPROVING THE ADAPTABILITY OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

Abstract. In the current context, digital monitoring of agricultural enterprises is gaining strategic importance as a tool to enhance the efficiency, resilience, and adaptability of agro-industrial production. Despite its high potential, the implementation of such technologies in Ukraine requires the generalization of scientific approaches and the adaptation of international experience to local conditions. The aim of this study is to systematize scientific approaches to the formation of digital monitoring systems in agribusiness, to identify key components and technological elements, and to develop implementation strategies for adaptive monitoring systems tailored to the Ukrainian agricultural sector. The study employed bibliographic analysis of sources, structural-logical generalization, comparative analysis of technological solutions, expert evaluation of digital monitoring tools, as well as elements of scenario modeling for implementation strategies.

Based on the analytical review, five key components of digital monitoring were identified as most frequently mentioned in global studies: *IoT* sensors, artificial intelligence (AI), remote sensing (RS), *edge computing*, and decision support systems (DSS). A trend was found toward the integration of these tools into complex platforms characterized by high levels of autonomy, adaptability, and environmental orientation. Typical digital monitoring strategies were developed according to the level of digital maturity and resource capacity of enterprises. An implementation algorithm for an adaptive digital monitoring model was proposed for the Ukrainian agribusiness, based on step-by-step technological integration in accordance with institutional,

technical, and economic conditions.

Digital monitoring constitutes the foundation of a modern agro-management model, ensuring precision, timeliness, and transparency in agricultural production processes. Its implementation in Ukraine requires an adaptive approach that considers technological readiness, digital infrastructure availability, and human capacity. This research provides a methodological basis for developing an innovative digital agribusiness model focused on sustainable development.

Keywords: *digital monitoring, agribusiness, precision agriculture, IoT, AI, remote sensing, Ukraine, adaptive strategies, sustainable development, decision support systems.*

Постановка проблеми. В умовах зростаючих кліматичних ризиків, волатильності аграрних ринків, геополітичної нестабільності та глобального тиску на продовольчі системи, пошук ефективних інструментів моніторингу стану агроєкосистем набуває ключового значення. Особливої актуальності набувають технології цифрового моніторингу, які поєднують можливості Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), дистанційного зондування Землі (RS), edge computing, хмарної аналітики, автоматизованих систем прийняття рішень (DSS) тощо [1; 2]. Ці інструменти дають змогу здійснювати комплексне, високоточно орієнтоване управління агровиробництвом у реальному часі, забезпечуючи своєчасне реагування на біотичні й абіотичні стреси, оптимізацію використання ресурсів і підвищення продуктивності.

Водночас, в українському контексті впровадження цифрового моніторингу має фрагментарний характер, що зумовлено нерівномірним розвитком цифрової інфраструктури, обмеженістю фінансових ресурсів, нестачею кваліфікованих кадрів та відсутністю адаптованих методичних підходів. У зв'язку з цим, систематизація наукових концептів, порівняльний аналіз міжнародного досвіду та розробка стратегій впровадження цифрового моніторингу в аграрну практику України набувають не лише теоретичної, а й високої прикладної цінності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковому дискурсі останніх років значну увагу приділено цифровій трансформації аграрного сектору, зокрема в контексті впровадження інтелектуальних технологій моніторингу для забезпечення стійкості та адаптивності агропідприємств.

Цифрова аграрна інфраструктура, як доводять S. Mandal, A. Yadav та співавтори [3], формується на основі інтеграції інтернету речей (IoT) і штучного інтелекту (AI), що дає змогу оптимізувати операційні процеси та адаптувати агросистеми до викликів кліматичних і економічних змін. Аналогічно, у дослідженні P. Rajak і колег [4] наголошено на перевагах сенсорного моніторингу агроєкологічних параметрів - вологи, складу ґрунту, температури, а також на функціональності IoT-систем у ранньому виявленні хвороб і прийнятті агрономічних рішень. Водночас акцент зроблено на бар'єрах: високій вартості, браку цифрових навичок та загрозах безпеці даних.

У рамках інтегративного підходу G. Gebresenbet та співавтори [5] обґрунтовують потребу у побудові багаторівневих систем збору й аналізу даних, які охоплюють хмарні сервіси, edge computing, блокчейн, DSS-платформи та кібербезпеку. Такий підхід, за їхніми висновками, забезпечує зростання продуктивності та конкурентоспроможності агросектору. Роботи K. Sharma і S. K. Shivandu [6], присвячені роботизованим агросистемам і SCADA-рішенням, демонструють можливості цифрових технологій у точному керуванні виробництвом.

Використання супутникових знімків і вегетаційних індексів для моніторингу агротехнічних заходів обґрунтовано A. San Bautista та співавторами [7] на прикладі біостимуляторів для вирощування рису. Своєю чергою, дослідницька група на чолі з I. Mouratiadou [8] представила інноваційну систему DAKIS, яка поєднує супутникові, сенсорні та соціальні дані для прийняття адаптивних агрорішень.

Аналіз A. Ashraf та колег [9] засвідчує широкі можливості дистанційного зондування у поєднанні з IoT і метеоданими для оцінки стану ґрунту, врожайності, водозабезпечення. Водночас R. Finger [10] у своєму огляді підкреслює важливість подолання цифрової нерівності через політики підтримки впровадження технологій у малих і середніх господарствах.

Ефективність систем реального моніторингу з використанням сенсорів і хмарної аналітики підтверджено у дослідженні S. C. Pramanik [11], тоді як A. A. Abdelmoneim [12] у своєму системному огляді визначає іригаційні IoT-рішення як інструмент підвищення водної ефективності. З екологічного боку, S. K. Balasundram та співавтори [13] розглядають digital agriculture як механізм пом'якшення впливу змін клімату на харчову безпеку.

Узагальнення E. Omia, H. Bae і B.-K. Cho [14] засвідчує ефективність мультиспектральної

та гіперспектральної зйомки, а також технологій злиття даних для прийняття рішень щодо поливу, удобрення, боротьби зі шкідниками. Значний інтерес викликає робота V. H. U. Eze та співавторів [15], у якій продемонстровано синергію IoT та ML через алгоритми reinforcement learning і edge computing як факторів підвищення адаптивності агросистем.

Отже, незважаючи на високий рівень напрацювань, залишаються відкритими питання інституційного впровадження, стандартизації даних, масштабованості систем для малих господарств і подолання цифрового розриву. Наше дослідження спрямоване на інтеграцію ключових елементів цифрового моніторингу в адаптивну модель управління агропідприємствами України, що враховує реалії воєнного часу, ресурсні обмеження та вимоги до стійкості.

Метою статті є узагальнення наукових підходів до структури цифрових систем моніторингу в агросфері, виокремлення ключових елементів та інструментів, а також розробка адаптивних стратегій впровадження цифрового моніторингу в аграрних підприємствах України з урахуванням типу господарювання, цифрової готовності та кліматичних особливостей регіонів.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах цифровий моніторинг поступово трансформується з інструмента оперативного контролю на комплексний елемент стратегічного управління агропідприємствами [16; 17]. Його запровадження забезпечує можливість своєчасного реагування на кліматичні коливання, виявлення загроз для врожаю, оптимізацію використання ресурсів, підвищення продуктивності та ухвалення обґрунтованих управлінських рішень. Цей підхід базується на інтеграції різноманітних компонентів - сенсорних систем, IoT-платформ, технологій штучного інтелекту, хмарної та edge-аналітики, цифрових моделей та інформаційно-аналітичних інтерфейсів, що в сукупності формують єдину цифрову екосистему агропідприємства.

Сутність цифрового моніторингу в агросекторі в науковій літературі трактується різними дослідниками з позицій функціонального, технічного та управлінського підходів. Так, S. Mandal, A. Yadav та співавтори [3] акцентують на smart-додатках, що поєднують IoT і AI для оптимізації виробничих процесів та адаптації до аграрних викликів. На їхню думку, саме поєднання великих даних, сенсорів, хмарних сервісів і мобільних платформ забезпечує ефективність сучасного землеробства. G. Gebresenbet та співавтори [5] розглядають цифровий моніторинг як багатокомпонентну систему збору та інтеграції агроекологічної інформації, в якій ключову роль відіграють блокчейн, системи підтримки прийняття рішень (DSS), інфраструктура обміну даними й інструменти кібербезпеки. Зі свого боку, R. Finger [10] вказує, що цифрові технології, зокрема дистанційне зондування, агророботика, цифрові двійники та інші інновації, формують нову модель сталого агровиробництва, де моніторинг виступає не лише засобом фіксації змін, а й основою для прийняття стратегічно вивірених управлінських рішень.

З метою узагальнення наукових підходів до структурування систем цифрового моніторингу було здійснено аналітичний огляд провідних досліджень останніх років. На основі цього сформовано табл. 1, у якій відображено ключові інструменти цифрового моніторингу, їхню змістову характеристику та ефекти від застосування в логістиці агробізнесу.

Таблиця 1

Елементи систем цифрового моніторингу в агробізнесі за даними сучасних досліджень

Інструмент	Суть	Значення в агробізнесі	Автори
IoT-сенсори	Збір даних з поля (вологість, температура, склад ґрунту)	Моніторинг умов зростання культур, автоматизація процесів	S. Mandal та співавтори [3], P. Rajak та співавтори [4], R. Finger [10], V. H. U. Eze та співавтори [15]
Штучний інтелект (AI)	Аналіз даних, прогнозування, виявлення аномалій	Підтримка прийняття рішень, оптимізація врожайності	S. Mandal та співавтори [3], K. Sharma, S. Shivandu [6], I. Mouratiadou та співавтори [8]
Машинне навчання (ML)	Побудова моделей на основі польових даних	Прогноз врожаю, виявлення шкідників, оптимізація ресурсів	A. Abdelmoneim та співавтори [12], S. Balasundram та співавтори [13], V. H. U. Eze та співавтори [15]
Edge computing	Локальна обробка даних на пристрої	Зниження затримки, автономність у польових умовах	G. Gebresenbet та співавтори [5], A. Abdelmoneim та співавтори [12], V. H. U. Eze та співавтори [15]
Хмарні платформи (Cloud)	Зберігання, візуалізація, обробка великих обсягів даних	Централізація даних, доступ до аналітики	S. Mandal та співавтори [3], S. C. Pramanik та співавтори [11]

Продовження таблиці 1

SCADA, DSS, цифрові інтерфейси	Системи керування та підтримки рішень	Автоматизація агрооперацій, зменшення людського фактору	K. Sharma, S. Shivandu [6], R. Finger [10], A. Abdelmoneim та співавтори [12]
Супутникове зондування, дрони	Дистанційне зондування (MSI, HSI, NDVI, індекси)	Моніторинг культур, прогнозування врожайності, оцінка біомаси	A. San Bautista та співавтори [7], A. Ashraf та співавтори [9], E. Omia та співавтори [14]
Інтеграція мультиджерельних даних	Об'єднання даних із сенсорів, супутників, моделей	Комплексне розуміння агросистеми	I. Mouratiadou та співавтори [8], E. Omia та співавтори [14]
Роботизовані системи (AgroBots)	Збір, сортування, догляд за культурами	Зменшення витрат праці, точність обробки	K. Sharma, S. Shivandu [6]
Blockchain / прозорість ланцюгів	Верифікація даних, довіра в агропостачанні	Прозорість, контроль якості, цифрова етика	G. Gebresenbet та співавтори [5], R. Finger [10], A. Abdelmoneim та співавтори [12]
Прогнозування кліматичних ризиків	Аналіз погодних сценаріїв	Планування сівозмін, захист врожаю	S. Balasundram та співавтори [13]
Вегетаційні індекси	NDVI, SAVI, EVI2 тощо для оцінки стану рослин	Рання діагностика проблем, оцінка ефективності агросасобів	A. Bautista та співавтори [7], A. Ashraf та співавтори [9]

Джерело: сформовано за [3-15]

Зіставлення позицій авторів дозволяє виокремити найбільш репрезентативні елементи цифрового моніторингу, серед яких провідну роль відіграють IoT-сенсори, штучний інтелект, дистанційне зондування, edge computing та системи підтримки прийняття рішень. Спостерігається тенденція до інтеграції цих інструментів у багаторівневі аналітичні платформи, що охоплюють як технічні, так і управлінські аспекти агровиробництва. Це свідчить про формування нового підходу до управління агропідприємствами, що базується на оперативності, точності та передбачуваності дій. Таким чином, цифровий моніторинг розглядається як не лише технологічне рішення, а й як стратегічна основа для сталого розвитку аграрної сфери.

З огляду на різноманіття доступних цифрових технологій, а також структурну та ресурсну неоднорідність аграрного сектора України, впровадження цифрового моніторингу доцільно здійснювати диференційовано - через призму типології сільськогосподарських підприємств. Такий підхід забезпечує цільове застосування інструментів відповідно до потреб, функціональної специфіки, обсягів виробництва та рівня цифрової готовності господарюючих суб'єктів. Особливої уваги потребує врахування факторів масштабу діяльності, доступу до цифрової інфраструктури, кадрового потенціалу, рівня технологічної зрілості та виду агровиробництва (рослинництво, тваринництво, тепличне господарство тощо).

У цьому контексті табл. 2 узагальнює можливі напрями адаптації цифрових рішень на основі типізації підприємств, демонструючи логіку поєднання окремих інструментів моніторингу з очікуваними ефектами від їх впровадження. Такий формат дозволяє не лише визначити релевантні технологічні рішення, а й обґрунтувати їхню доцільність у розрізі конкретних організаційно-виробничих умов. Крім того, представлена класифікація ґрунтується на результатах системного аналізу сучасної наукової літератури, що надає їй як емпіричну обґрунтованість, так і аналітичну цінність для розроблення дорожніх карт цифрової трансформації аграрних підприємств.

Таблиця 2

Напрями впровадження цифрового моніторингу в аграрних підприємствах України

Тип підприємства	Рекомендовані інструменти	Очікувані переваги	Джерело
Фермерські господарства (ФГ)	IoT-сенсори, мобільні застосунки, прості DSS	Оперативний контроль стану ґрунту, оптимізація поливу	S. Mandal та співавтори [3], V. H. U. Eze та співавтори [15]
Агрохолдинги	SCADA-системи, AgroBots, HSI, AI-аналітика	Автоматизація, зниження витрат, звітність для ESG	K. Sharma, S. Shivandu [6], E. Omia та співавтори [14]
Тепличні комплекси	Edge computing, сенсори мікроклімату, RL-моделі	Точне керування середовищем, прогнозування врожаю	A. Abdelmoneim та співавтори [12], S. C. Pramanik та співавтори [11]

Продовження таблиці 2

ОТГ / Кооперативи	Платформи для агрегації даних, блокчейн-прозорість, цифрова освіта	Посилення цифрової інклюзії, стратегічне планування	R. Finger [10], G. Gebresenbet та співавтори [5]
Сади / ягідники	Дрони, спектральна зйомка, image segmentation	Моніторинг шкідників, точне оброблення	P. Rajak та співавтори [4], K. Sharma, S. Shivandu [6]

Джерело: сформовано за [3-15]

Продовжуючи аналітику, наведені в таблиці 2 напрямки впровадження цифрового моніторингу в аграрних підприємствах України дозволяють встановити тісний взаємозв'язок між технологічною складністю інструментів, масштабом підприємства та рівнем їхньої цифрової зрілості. Застосування IoT-сенсорів і мобільних платформ у фермерських господарствах забезпечує базову цифрову трансформацію за умов обмеженого доступу до складної інфраструктури. Такі інструменти, згідно з дослідженнями S. Mandal [3], V. H. U. Eze та співавторів [15], дозволяють фермерам отримувати критичну інформацію щодо стану ґрунту і погодних умов, сприяючи прийняттю оперативних рішень щодо поливу чи обробки культур.

На відміну від цього, агрохолдинги характеризуються наявністю високотехнологічної бази та доступу до інвестиційних ресурсів, що обґрунтовує використання SCADA-систем, агроботів, штучного інтелекту й гіперспектрального зондування. Як зазначено у працях K. Sharma, S. Shivandu [6], E. Omia та співавторів [14], такі рішення дають змогу створити цифрові двійники виробництва, забезпечити автоматизований контроль процесів, збір ESG-метрик та реалізацію стратегій сталого розвитку.

У тепличних господарствах пріоритетом виступає точне керування параметрами мікроклімату, де edge computing і моделі машинного навчання (RL) дозволяють не лише підтримувати оптимальні умови, а й прогнозувати ризики урожайності. Відповідно до A. Abdelmoneim [12], S. C. Pramanik та співавторів [11], ці інструменти є незамінними для інтенсивного вирощування в умовах обмеженого простору.

У контексті об'єднаних територіальних громад (ОТГ) та кооперативів особливого значення набувають платформи для агрегування даних, механізми прозорої взаємодії (наприклад, блокчейн) та освітні інструменти. Це дозволяє не лише інтегрувати дрібних виробників у цифрову екосистему, але й посилити управлінську спроможність громад. Роботи R. Finger [10], G. Gebresenbet та співавторів [5] доводять, що цифрова інклюзія через спільні інфраструктурні рішення забезпечує масштабний ефект трансформації навіть за обмежених ресурсів.

Для садів та ягідників актуальними є інструменти дистанційного моніторингу, зокрема спектральна зйомка та алгоритми семантичного розпізнавання зображень. Дослідження P. Rajak та співавторів [4], K. Sharma, S. Shivandu [6] підкреслюють їхню ефективність у виявленні фітопатологій, що дозволяє оперативно застосовувати захисні заходи з мінімальними втратами врожаю.

Отже, типізація агропідприємств і узгодження технологічних рішень із їхніми потребами дає змогу не лише забезпечити адаптивне управління, а й сформувати підґрунтя для цифрової трансформації агросектору в цілому. Рациональний добір інструментів цифрового моніторингу має спиратися на принцип диференціації за критеріями функціональної мети, масштабів господарювання, доступу до цифрової інфраструктури та рівня компетенцій персоналу. У цьому контексті подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку типових моделей впровадження цифрових технологій із урахуванням регіональних та інституційних особливостей українського агросектору.

З огляду на різноманітність технологічних рішень цифрового моніторингу та специфіку українського агробізнесу, постає необхідність у системному підході до впровадження таких інструментів. Ефективність цифровізації значною мірою залежить не лише від доступу до технологій, а й від здатності підприємства інтегрувати їх у виробничі, логістичні та управлінські процеси. У цьому контексті стратегія впровадження розглядається як цілісна модель дій, що враховує масштаби діяльності, ресурсну спроможність, екосистемні особливості регіону та рівень цифрової готовності.

Умовно можна виокремити п'ять типових стратегій, кожна з яких відображає певну траєкторію цифрового розвитку. Вони охоплюють як мінімальний рівень технічної адаптації (наприклад, базова цифровізація через прості IoT-рішення), так і високотехнологічні моделі управління на основі штучного інтелекту та автоматизованих систем. Окреме місце займає екологічно-орієнтована стратегія, яка акцентує увагу на відстеженні сталості агровиробництва, а також освітньо-адаптивна модель, що передбачає формування компетенцій серед фермерів та аграрного персоналу.

Кожна зі стратегій має свою логіку реалізації, набір ключових інструментів та приклади практичного застосування. Їх порівняння подано у табл. 3.

Таблиця 3

Типологія стратегій цифрового моніторингу для агробізнесу України

Назва стратегії	Ціль впровадження	Ключові інструменти	Типові приклади застосування
Базова цифровізація (малі фермерські господарства)	Отримання базових агроданих для прийняття рішень	IoT-сенсори, мобільні додатки, хмарні сервіси, DSS	Вологоміри, прості системи оповіщення, мобільна агроаналітика
Інфраструктурне зміцнення (ОТГ, середні підприємства)	Агрегація та спільне використання даних	Edge computing, блокчейн, локальні агроплатформи	Метеостанції в громаді, кооперативне управління агроданими
Інтелектуалізація виробництва (агрохолдинги, теплиці)	Повна автоматизація і прогнозування	AgroBots, SCADA, AI-аналітика, RL-моделі, спектральний аналіз	Smart-іригація, автоматизоване сортування, роботи в теплицях
Екологічно-ESG-орієнтована стратегія	Моніторинг екологічного впливу, звітність	NDVI, NCMI, HSI, супутниковий моніторинг	Оцінка біорізноманіття, вуглецевого сліду, ESG-аудит
Адаптивно-освітня стратегія (перехресна)	Підвищення цифрової грамотності, інституційна сталість	Онлайн-курси, демоферми, консультативні сервіси	Тренінги з IoT, мобільні помічники, інтеграція з аграрною освітою

Джерело: сформовано за [1-19]

Запропоноване типологічне групування дозволяє узгодити рівень цифрової складності систем моніторингу з технічно-організаційними можливостями агровиробників. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного навантаження на підприємства з обмеженим ресурсним потенціалом та водночас відкриває перспективи для високотехнологічного розвитку найбільш спроможних гравців ринку. Крім того, адаптивно-освітня стратегія є ключовою умовою довготривалої трансформації агросектору, оскільки забезпечує підготовку кадрів та включення фермерів у цифрові ланцюги створення вартості.

Висновки. Результати проведеного дослідження підтверджують зростаюче значення цифрового моніторингу як одного з фундаментальних чинників трансформації аграрного сектору у бік більш стійкого, адаптивного та ресурсоефективного розвитку. Комплексне зіставлення сучасних наукових підходів дозволило виокремити ключові компоненти цифрових агросистем, серед яких найвищу релевантність демонструють IoT-сенсори, алгоритми штучного інтелекту, системи дистанційного зондування, edge computing та платформи підтримки управлінських рішень. Ці елементи формують не лише технологічне підґрунтя для точного агровиробництва, а й нову парадигму управління - інтегровану, прогностичну та орієнтовану на ризик-менеджмент.

З урахуванням контексту України проведено класифікацію можливих сценаріїв упровадження цифрового моніторингу відповідно до типів аграрних підприємств, рівня їх цифрової зрілості та специфіки виробничих процесів. Запропонований підхід дає змогу адаптувати сучасні цифрові рішення до умов дрібних фермерських господарств, тепличних комплексів, кооперативів та агрохолдингів, забезпечуючи гнучке поєднання економічної доцільності, технологічної ефективності та організаційної спроможності.

Література

1. Mandal S., Yadav A., Panme F. A., Devi K. M., Kumar S. M. Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>
2. Rajak P., Ganguly A., Adhikary S., Bhattacharya S. Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>
3. Gebresenbet G., Bosona T., Patterson D., Persson H., Fischer B., Mandaluniz N., Chirici G., Zacepins A., Komasilovs V., Pitulac T., Nasirahmadi A. A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100431>

org/10.1016/j.atech.2023.100255.

4. Sharma K., Shivandu S. K. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International*. 2024. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292>

5. San Bautista A., Fita D., Franch B., Castiñeira-Ibáñez S., Arizo P., Sánchez-Torres M. J., Becker-Reshef I., Uris A., Rubio C. Crop monitoring strategy using remote sensing to evaluate the impact of Glycinebetaine biostimulant on rice yield. *Agronomy*. 2022. Vol. 12, № 3. P. 708. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030708>

6. Mouratiadou I., Lemke N., Chen C., Wartenberg A., Bloch R., Donat M., Gaiser T., Basavegowda D. H., Helming K., Hosseini Yekani S. A., Krull M., Lingemann K., Macpherson J., Melzer M., Nendel C., Piorr A., Shaaban M., Zander P., Weltzien C., Bellingrath-Kimura S. D. The Digital Agricultural Knowledge and Information System (DAKIS): Employing digitalisation to encourage diversified and multifunctional agricultural systems. *Environmental Science and Ecotechnology*. 2023. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100274>.

7. Ashraf A., Ahmad D., Ferooz K., Nazir S. et al. Remote Sensing as a Management and Monitoring Tool for Agriculture: Potential Applications. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. Vol. 13, № 8. P. 324–343. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i81957>

8. Finger R. Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*. 2023. Vol. 50, № 4. P. 1277–1309. DOI: <https://doi.org/10.1093/erae/jbad021>

9. Pramanik S. C., Saha G. C., Saha H. et al. IoT Based Smart Agricultural Crop Monitoring in Terms of Temperature and Moisture. *ResearchGate*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25726.15684>

10. Abdelmoneim A. A., Kimaita H. N., Al Kalaany C. M., Derardja B., Dragonetti G., Khadra R. IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects. *Sensors (Basel)*. 2025. Vol. 25, № 7. P. 2291. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072291>

11. Balasundram S. K., Shamshiri R. R., Sridhara S., Rizan N. The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065325>.

12. Omia E., Bae H., Park E., Kim M. S., Baek I., Kabenge I., Cho B.-K. Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15020354>.

13. Eze V. H. U., Eze E. C., Alaneme G. U., Bubu P. E., Nnadi E. O. E., Okon M. B. Integrating IoT sensors and machine learning for sustainable precision agroecology: enhancing crop resilience and resource efficiency through data-driven strategies, challenges, and future prospects. *Discover Agriculture*. 2025. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-025-00083-y>.

14. Пришляк К., Семененко Ю. Аналіз програмних засобів для адаптації та підвищення продуктивності людського капіталу в агросфері. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2025. № 340(2). С. 306–314. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-49>

15. Носач Н., Єгіозар'ян А. Побудова системи моніторингу та контролінгу на агропідприємстві. *Управління розвитком сфери обслуговування*. 2024. № 3. С. 254–259. DOI: [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-7\(43\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-7(43))

16. Волкова Н. В., Гарькава В. Ф., Скороход І. П. Роль діджитал-процесів в інноваційному розвитку українського бізнесу: економічний аспект. *Академічні візії*. 2023. № 19. URL: <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/345> (дата звернення 13.05.2025).

17. Волкова Н. В., Кіпятков В. С. Управлінські стратегії аграрних підприємств як інструмент досягнення конкурентних переваг на ринку. *Вісник Полтавського державного аграрного університету. Економіка, управління та фінанси*. 2024. № 2(44). С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.32782/pda.u.eco.2024.2.6>

18. Яловега Л. В., Лега О. В., Прийдак Т. Б. Циркулярна економіка як інструмент сталого розвитку: виклики та перспективи. *Управлінські парадигми сталого розвитку та інклюзивного економічного зростання: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції*. Суми: Сумський державний університет, 2024. С. 227–228. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/97484/3/Management_paradigms_2024.pdf#page=227 (дата звернення 13.05.2025).

19. Канцедал Н. А., Лега О. В. Інформаційна роль обліку в результативності інвестиційної стратегії аграрних підприємств. *Агросвіт*. 2021. № 11. С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2021.11.11>

References

1. Mandal, S., Yadav, A., Panme, F. A., Devi, K. M., & Kumar, S. M. (2024). Adaption of smart applications in agriculture to enhance production. *Smart Agricultural Technology*, 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>
2. Rajak, P., Ganguly, A., Adhikary, S., & Bhattacharya, S. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>
3. Gebresenbet, G., Bosona, T., Patterson, D., Persson, H., Fischer, B., Mandaluniz, N., Chirici, G., Zacepins, A., Komasilovs, V., Pitulac, T., & Nasirahmadi, A. (2023). A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. *Smart Agricultural Technology*, 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100255>
4. Sharma, K., & Shivandu, S. K. (2024). Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International*, 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292>
5. San Bautista, A., Fita, D., Franch, B., Castiñeira-Ibáñez, S., Arizo, P., Sánchez-Torres, M. J., Becker-Reshef, I., Uris, A., & Rubio, C. (2022). Crop monitoring strategy using remote sensing to evaluate the impact of Glycinebetaine biostimulant on rice yield. *Agronomy*, 12(3), 708. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030708>
6. Mouratiadou, I., Lemke, N., Chen, C., Wartenberg, A., Bloch, R., Donat, M., Gaiser, T., Basavegowda, D. H., Helming, K., Hosseini Yekani, S. A., Krull, M., Lingemann, K., Macpherson, J., Melzer, M., Nendel, C., Piorr, A., Shaaban, M., Zander, P., Weltzien, C., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2023). The Digital Agricultural Knowledge and Information System (DAKIS): Employing digitalisation to encourage diversified and multifunctional agricultural systems. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100274>
7. Ashraf, A., Ahmad, D., Ferooz, K., Nazir, S., et al. (2023). Remote sensing as a management and monitoring tool for agriculture: Potential applications. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(8), 324–343. DOI: <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i81957>
8. Finger, R. (2023). Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*, 50(4), 1277–1309. DOI: <https://doi.org/10.1093/erae/jbad021>
9. Pramanik, S. C., Saha, G. C., Saha, H., et al. (2024). IoT based smart agricultural crop monitoring in terms of temperature and moisture. *ResearchGate*. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25726.15684>
10. Abdelmoneim, A. A., Kimaita, H. N., Al Kalaany, C. M., Derardja, B., Dragonetti, G., & Khadra, R. (2025). IoT sensing for advanced irrigation management: A systematic review of trends, challenges, and future prospects. *Sensors (Basel)*, 25(7), 2291. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25072291>
11. Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The role of digital agriculture in mitigating climate change and ensuring food security: An overview. *Sustainability*, 15(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065325>
12. Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B.-K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15(2). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15020354>
13. Eze, V. H. U., Eze, E. C., Alaneme, G. U., Bubu, P. E., Nnadi, E. O. E., & Okon, M. B. (2025). Integrating IoT sensors and machine learning for sustainable precision agroecology: Enhancing crop resilience and resource efficiency through data-driven strategies, challenges, and future prospects. *Discover Agriculture*, 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-025-00083-y>
14. Pryshliak, K., & Semenenko, Yu. (2025). Analiz prohramnykh zasobiv dlia adaptatsii ta pidvyshchennia produktyvnosti liudskoho kapitalu v ahrosferi [Analysis of software tools for adaptation and increasing the productivity of human capital in the agricultural sector]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 340(2), 306–314. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-49>
15. Nosach, N., & Yehiiozarian, A. (2024). Pobudova systemy monitorynhu ta kontrolihnhu na agro-pidpriemstvi [Development of a monitoring and controlling system at an agricultural enterprise]. *Development Service Industry Management*, (3), 254–259. DOI: [https://doi.org/10.31891/dsim-2024-7\(43\)](https://doi.org/10.31891/dsim-2024-7(43))
16. Volkova, N. V., Harkava, V. F., & Skorokhod, I. P. (2023). Rol didzhital-protsesiv v innovatsiinomu rozvytku ukraïnskoho biznesu: ekonomichniy aspekt [The role of digital processes in the innovative development of Ukrainian business: Economic aspect]. *Akademychni vizii*, (19). Available at: <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/345> (accessed May 13, 2025)

17. Volkova, N. V., & Kipiatkov, V. S. (2024). Upravlinski stratehii ahrarnykh pidpryiemstv yak instrument dosiahnenia konkurentnykh perevah na rynku [Management strategies of agricultural enterprises as a tool for achieving competitive advantages in the market]. *Visnyk Poltavskoho derzhavnoho ahrarnoho universytetu. Ekonomika, upravlinnia ta finansy*, 2(44), 44–51. DOI: <https://doi.org/10.32782/pdau.eco.2024.2.6>

18. Yaloveha, L. V., Leha, O. V., & Pryidak, T. B. (2024). Tsyriuliarna ekonomika yak instrument staloho rozvytku: vyklyky ta perspektyvy [Circular economy as a tool for sustainable development: Challenges and prospects]. In *Upravlinski paradyhmy staloho rozvytku ta inkluzyvnoho ekonomichnoho zrostannia: Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 227–228). Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet. Available at: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/97484/3/Management_paradigms_2024.pdf#page=227 (accessed May 13, 2025)

19. Kantsedal, N. A., & Leha, O. V. (2021). Informatsiina rol obliku v rezultatyvnosti investytsiinoi stratehii ahrarnykh pidpryiemstv [The informational role of accounting in the effectiveness of the investment strategy of agricultural enterprises]. *Ahrosvit*, (11), 11–20. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2021.11.11>.