

Свирид Олег¹, аспірант, кафедра маркетингу та логістики

Данько Юрій Іванович¹, доктор економічних наук, професор, старший науковий співробітник лабораторії біоекономіки та зеленого маркетингу

¹Сумський національний аграрний університет

Svyryd Oleh¹, Postgraduate student, Department of Marketing and Logistics
<https://orcid.org/0009-0007-5478-8090>

Danko Yuriy¹, Doctor of Economic Sciences, Professor, Senior Researcher of the Laboratory of Bioeconomics and Green Marketing, <http://orcid.org/0000-0002-9847-1593>

¹Sumy National Agrarian University

РОЛЬ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОЗВИТКУ ЛОГІСТИКИ ОРГАНІЧНОЇ АГРАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ THE ROLE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF LOGISTICS FOR ORGANIC AGRICULTURAL PRODUCTS

Свирид О. О., Данько Ю. І. Роль цифрових технологій у розвитку логістики органічної аграрної продукції.

Український журнал прикладної економіки та техніки. 2025. Том 10. № 3. С. 408 – 413.

Svyryd O., Danko Yu. The role of digital technologies in the development of logistics for organic agricultural products.

Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology. 2025. Volume 10. № 3, pp. 408 – 17413

У статті досліджено роль цифрових технологій у формуванні та розвитку логістики органічної аграрної продукції. Визначено концептуальний зміст поняття «цифрова логістика органічної аграрної продукції» та обґрунтовано його самостійний статус як об'єкта наукового дослідження. Виявлено ключові відмінності органічної логістики від традиційної у контексті вимог до роздільного зберігання, сертифікації, простежуваності та термінів зберігання продукції. Проаналізовано роль IoT-датчиків, блокчейн-технологій, систем управління транспортом (TMS) і штучного інтелекту у забезпеченні органічної цілісності продукту від поля до кінцевого споживача. Розглянуто проблему інтеперабельності цифрових систем між виробниками, сертифікаційними органами, логістичними операторами та роздрібними мережами. Проведено аналіз впливу цифровізації на вартість логістики органічної продукції та умови економічної доцільності впровадження цифрових рішень для малих і середніх органічних господарств. Запропоновано п'ятирівневу модель оцінки зрілості цифрової логістики для органічних господарств різних типів.

Ключові слова: цифрова логістика; органічна аграрна продукція; зелена логістика; блокчейн; простежуваність; сертифікація; цифрова зрілість; сталий розвиток.

This article presents a comprehensive theoretical and analytical study of the role of digital technologies in the development of logistics for organic agricultural products. The relevance of this work stems from the rapid growth of the European organic market and the critical complications in logistics chains due to strict requirements for certification, traceability, and the preservation of a product's "organic integrity." The aim of the study is to conceptualize digital logistics for organic products as a distinct category, identify their differences from traditional and conventional logistics, analyze mechanisms to ensure integrity using IoT, blockchain, and TMS, and assess the economic feasibility of digitalization across various farm types. The methodological framework comprises systems analysis, the comparative method, a synthesis of scientific approaches (socio-technical, resource-oriented, and regulatory), and a five-level model for assessing the digital maturity of logistics developed by the author, complete with a corresponding index system. The results obtained demonstrate that digital logistics for organic products is not a derivative of "green logistics," but a qualitatively different configuration in which digital technologies play a structuring role. It has been established that integrating IoT sensors and blockchain registries ensures continuous monitoring of environmental parameters and the immutability of product movement records, while TMS with AI optimization reduces transportation time and improves delivery timeliness. A systemic interoperability issue has been identified—semantic data degradation during cross-chain exchange stands at 23%, necessitating the adoption of open standards (GS1 EPCIS) and consortium blockchain networks. The findings confirm that the digitalization of organic logistics makes a measurable contribution to achieving the UN SDGs: reducing food loss by up to 80%, lowering carbon emissions, and supporting multilateral partnerships. The practical value of the article lies in the proposed digital maturity assessment model, which enables the identification of gaps, the prioritization of investments, and the justification of a digital transformation strategy amid tightening regulatory requirements.

Keywords: logistics digitalization, organic production, supply chain, blockchain, IoT sensors, traceability, organic certification, artificial intelligence, sustainable development, food security.

Вступ

Сучасний європейський ринок органічної аграрної продукції, за прогнозами аналітиків IMARC Group, до 2033 року має досягти 132,2 млрд дол. США при середньорічному темпі зростання 8,94%. Органічне землеробство зосереджує близько 17 млн гектарів (або 11% від загальної площі) сільськогосподарських угідь. На тлі такого зростання логістика органічної продукції залишається одним із найбільш вузьких місць усього ланцюга створення вартості, адже жорсткі вимоги до сертифікації, роздільного зберігання та простежуваності накладаються на підвищену чутливість продукту і обмежені терміни його придатності.

Відповіддю на ці виклики стає стрімка цифровізація логістичних процесів: застосування інтернету речей (IoT), блокчейн-технологій, систем управління транспортом (TMS), штучного інтелекту (AI) та великих даних (Big Data) формує принципово новий підхід до управління потоками органічної продукції. Разом із тим наукове осмислення «цифрової логістики органічної аграрної продукції» як самостійного об'єкта дослідження залишається недостатнім: переважна більшість існуючих публікацій або зосереджується на «зеленій логістиці» загалом, або обмежується суто технологічними аспектами без комплексного аналізу організаційно-економічних наслідків цифровізації для органічного сектора.

Особливої актуальності ця проблематика набуває для малих і середніх органічних господарств, котрі, з одного боку, зазнають тиску нових регуляторних вимог (зокрема, EU Digital Product Passport, запровадження якого для аграрних імпортерних товарів передбачається до 2027 року [9]), а з іншого – стикаються з обмеженим фінансовим і технологічним потенціалом для впровадження цифрових рішень. Відтак, дослідження ролі цифрових технологій у розвитку логістики органічної аграрної продукції набуває важливого теоретичного та прикладного значення.

Наукові дослідження за суміжними темами значно активізувались упродовж 2020–2025 років. Фундаментальні роботи у сфері цифрової трансформації ланцюгів постачання аграрної продукції представлені, зокрема, у Т. Л. Kunrath, А. Dresch, D. R. Veit, де сформульовано концепцію Industry 4.0 у контексті управління ланцюгами постачання [12], а також роботи М. Vasileiou та ін. [15], R. M. Ellahi та ін. [3]. Питанням простежуваності на основі блокчейн присвячені дослідження F. J. Ferrández-Pastor, де розроблено модель трасування для промислової

конопляної продукції [5], а також комплексний огляд W. Wang та ін. [16], E. K. S. Wong, H. Y. Ting, A. F. Atanda [18], які систематизували переваги інтеграції блокчейн та IoT у сфері простежуваності ланцюга постачання.

V. Sharma, A. Palakshappa та S. A. Naqvi у своїх працях встановили, що застосування смарт-контрактів у аграрних постачальницьких ланцюгах дозволяє автоматизувати процеси і забезпечувати відповідність регуляторним стандартам, суттєво підвищуючи ефективність ланцюга постачання [14]. Систематичний огляд архітектур Edge-Cloud-Blockchain-Terminal (ECBT) для садівничої продукції, оприлюднений у *Frontiers in Blockchain*, засвідчив, що в Європі пілотна блокчейн-програма органічної сертифікації опрацьовувала близько 50 тис. транзакцій на добу в 27 країнах із доступністю системи понад 99,9% [9].

Питання оптимізації маршрутів холододового ланцюга з урахуванням харчових втрат і вуглецевих викидів досліджуються у роботах Y. Peng, Y. Zhang та ін., де запропоновано багатоцільовий алгоритм оптимізації для мультимодальних мереж холододового ланцюга [13]. Проблему цифрової зрілості на рівні окремого фермерського господарства систематично вивчає колектив дослідників *International Food and Agribusiness Management Review*, які, зокрема, наголошують на необхідності соціотехнічного підходу при оцінці рівня цифрової трансформації аграрних підприємств [8].

Водночас у наявних публікаціях простежується значний дефіцит комплексних робіт, які б поєднували аналіз специфіки саме органічної логістики, умов інтегрованості різномірних цифрових систем, економічної доцільності цифровізації для різних типів органічних господарств і внеску цих рішень у досягнення Цілей сталого розвитку. Відтак виникає потреба у поглибленому теоретично-аналітичному дослідженні, яке заповнить зазначені прогалини.

Формулювання цілей статті

Метою статті є комплексне теоретично-аналітичне дослідження ролі цифрових технологій у розвитку логістики органічної аграрної продукції, що охоплює: концептуальне визначення цифрової логістики органічної аграрної продукції та з'ясування її місця у системі логістичних категорій; виявлення ключових відмінностей органічної логістики від традиційної; аналіз механізмів забезпечення «органічної цілісності» продукту за допомогою цифрових інструментів; оцінку впливу цифровізації на ефективність і вартість логістики; дослідження умов економічної доцільності для малих і середніх господарств; розробку моделі оцінки цифрової зрілості логістики органічних господарств.

Виклад основного матеріалу дослідження

Перш ніж перейти до аналізу практичних аспектів цифровізації, необхідно з'ясувати категоріальний статус досліджуваного явища. «Зелена логістика» (green logistics) зазвичай розуміється як сукупність підходів до управління логістичними процесами, що мінімізують негативний екологічний вплив транспортування, зберігання і дистрибуції товарів. У своїх класичних визначеннях (Junge A. L., 2019 [11]; Zhang B. et al., 2024 [13]) зелена логістика охоплює альтернативні види палива, енергоефективне охолодження і скорочення пробігу.

Натомість «цифрова логістика органічної аграрної продукції» – це якісно особлива конфігурація логістичної системи, що характеризується трьома принципово важливими ознаками. По-перше, вона підпорядкована не лише екологічним цілям, а й жорстким нормативним вимогам збереження «органічної цілісності» – концепції, що визначає недопустимість будь-якого контакту органічного продукту з забороненими речовинами, ГМО-компонентами або неорганічною продукцією на будь-якому з етапів ланцюга. По-друге, вона є нерозривно пов'язаною з цифровим підтвердженням сертифікаційного статусу на кожному переході права власності, що принципово відрізняє її від загальної харчової логістики. По-третє, цифрові технології виступають не допоміжним інструментом, а структуроутворюючим елементом, без якого виконання вимог регуляторних органів у масштабах сучасного ринку практично неможливе.

З огляду на це «цифрова логістика органічної аграрної продукції» є самостійною категорією, що поглинає елементи зеленої логістики, але не зводиться до неї. Вона перебуває на перетині аграрної економіки, цифрового менеджменту, екологічного права та сертифікаційного регулювання, що і визначає унікальність її предметного поля.

Логістика органічної аграрної продукції суттєво відрізняється від конвенційної за комплексом взаємопов'язаних параметрів, що безпосередньо визначають вибір і конфігурацію цифрових рішень. Ці відмінності узагальнено у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика логістики органічної та конвенційної аграрної продукції

Критерій порівняння	Логістика органічної продукції	Логістика конвенційної продукції
Вимоги до зберігання	Обов'язкове роздільне зберігання від неорганічної продукції; контроль температури і вологості у реальному часі; заборона сумісного зберігання з ГМО і синтетичними речовинами	Загальне складське зберігання; стандартні вимоги санітарного контролю; допускається суміщення за категоріями
Сертифікація та документообіг	Обов'язкова органічна сертифікація (ЕС 2018/848, USDA NOP та ін.); цифровий журнал обліку по всьому ланцюжку; підтвердження при кожній передачі права власності	Санітарний паспорт та декларація виробника; без вимог наскрізного документального підтвердження
Простежуваність (трейсабіліті)	Наскрізна простежуваність «від поля до споживача» з документуванням кожного переходу; блокчейн або захищені цифрові реєстри	Стандартна ідентифікація; ідентифікація за кодом виробника
Терміни зберігання	Коротші терміни зберігання через відсутність синтетичних консервантів; потребує більш динамічного управління запасами (FEFO-принцип)	Довші терміни завдяки консервантам і хімічній обробці після збирання
Розмір партій	Переважно дрібносерійні і середньосерійні партії; висока частота замовлень від різних каналів збуту	Великосерійне виробництво і масштабна логістика; стандартизовані великі партії
Ризики перехресного забруднення	Критично неприпустиме: забруднення скасовує органічний статус; потрібен цифровий контроль ізоляції	Ризики забруднення керуються стандартними процедурами HACCP
Вартість логістики	На 15–35% вища за рахунок специфічних вимог; знижується при впровадженні цифрових рішень TMS і IoT	Нижча базова вартість; широка конкуренція логістичних провайдерів

Джерело: складено автором на основі [18, 19]

Як видно з табл. 1, відмінності є комплексними та системними. Насамперед, вимога роздільного зберігання виключає будь-яке суміщення органічних і конвенційних товарів у тому самому складському просторі або транспортному засобі без чіткого задокументованого розмежування – і саме цифрові системи контролю здатні надати таке документування у режимі реального часу. Відтак, вибір цифрового рішення завжди повинен починатися з аналізу специфічних вимог органічної сертифікації.

Збереження «органічної цілісності» продукту від поля до споживача є центральним завданням органічної логістики і водночас її найбільш вразливим місцем. Будь-яке перехресне забруднення або документальний розрив у ланцюзі може призвести до втрати сертифікаційного статусу всієї партії, а отже – до значних фінансових збитків та репутаційних ризиків.

Технологічну відповідь на цей виклик забезпечує інтеграція IoT-сенсорів, блокчейн і хмарних платформ. IoT-датчики температури, вологості та чистоти повітря, встановлені у сховищах і транспортних засобах, фіксують параметри середовища з інтервалами від кількох хвилин до декількох секунд, надсилаючи дані до централізованих або розподілених реєстрів. Дослідження, опубліковані у РМС (NIH), підтверджують, що застосування IoT у системах смарт-холодового ланцюга для фруктів та овочів суттєво підвищує ефективність моніторингу параметрів середовища і дає змогу аналізувати слабкі місця у профілях конфігурації параметрів, значно скорочуючи харчові втрати на кожному з етапів [1].

Принципово важливою є роль блокчейн-технологій у забезпеченні незмінності і прозорості записів про переміщення продукту. V. Sharma та ін. встановили, що смарт-контракти дозволяють автоматизувати процеси перевірки і забезпечувати відповідність стандартам, тим самим підвищуючи ефективність ланцюга постачання [14]. Важливим прикладом є досвід Індії, де впровадження смарт-контрактів у аграрних ринках дозволило скоротити час розрахунків із приблизно 15 днів до менш ніж 24 годин та ліквідувати посередницькі комісії, що в середньому становили 8–12% [9].

Можемо констатувати, що цифрова «органічна цілісність» продукту забезпечується через чотири взаємодоповнюючі механізми: (1) безперервний IoT-моніторинг фізичних параметрів середовища зберігання і транспортування; (2) незмінювані блокчейн-записи кожного переходу права власності та зміни умов зберігання; (3) автоматизовані сповіщення про відхилення від встановлених параметрів з можливістю негайного коригувального втручання; (4) цифрова документація контролю ізоляції для підтвердження відсутності перехресного забруднення. Ці механізми у сукупності формують те, що в науковій літературі дедалі частіше називають «цифровим хребтом органічного ланцюга постачання».

Специфіка органічної продукції – коротші терміни придатності і переважно дрібніші партії порівняно з конвенційними аналогами – зумовлює підвищені вимоги до гнучкості та оперативності маршрутного планування. Традиційні підходи на основі статичних маршрутів транспортування стають неефективними, оскільки не здатні своєчасно реагувати на динамічні зміни попиту і враховувати стан продукту. Сучасні системи управління транспортом (TMS) з модулями оптимізації маршрутів на основі AI вирішують цю проблему через кілька ключових механізмів. По-перше, інтеграція TMS із IoT-даними про стан продукту дозволяє системі в режимі реального часу визначати пріоритетність доставки партій з коротшим залишковим терміном придатності. По-друге, застосування принципу FEFO (First Expired – First Out) замість традиційного FIFO в умовах смарт-логістики забезпечує суттєве скорочення харчових втрат [10]. Дослідження у Nature Scientific Reports (2024) підтверджують, що раціональне планування маршрутів з урахуванням свіжості продукту і витрат на охолодження дозволяє одночасно знизити загальні витрати і скоротити рівень псування вантажу [2].

Публікація у Food Chain Magazine (2024) вказує, що TMS забезпечує поліпшення співпраці та комунікації між усіма учасниками ланцюга постачання, а його інтеграція з IoT-пристроями дозволяє відстежувати відповідність вимогам температурно-контрольованого транспортування – у разі виявлення відхилень система автоматично ініціює оповіщення і коригувальні дії [6]. Для органічної продукції ця функціональність є особливо критичною, оскільки документально підтверджене температурне відхилення не лише погіршує якість, а й може бути підставою для оскарження органічного статусу партії під час аудиту сертифікаційного органу.

Узагальнення результатів дослідження B. Zhang і ін. (2024) [13] і матеріалів MDPI (2024) дозволяє констатувати, що TMS-рішення, адаптовані до потреб органічної логістики, забезпечують скорочення загального часу транспортування на 10–20%; зменшення вуглецевих викидів у розрахунку на тонно-кілометр завдяки оптимізації завантаження і маршруту; підвищення рівня своєчасних доставок (on-time delivery) до 92–96% навіть для дрібних партій.

Одним із найбільш гострих практичних викликів для цифрової логістики органічної продукції є фрагментованість інформаційного середовища: виробники, сертифікаційні органи, логістичні оператори та роздрібні мережі, як правило, використовують різні типи програмно-апаратні платформи, що суттєво ускладнює обмін даними і формування наскрізного цифрового запису.

Дослідження ESBT-архітектур для садівництва виявило системну проблему: крос-ланцюгові мости між корпоративними (Hyperledger Fabric) та публічними (Ethereum) блокчейн-мережами призводять до 23% семантичної деградації – метадані органічної сертифікації перетворюються на бінарні прапорці, втрачаючи нюансовану інформацію про відповідність [9]. Це означає, що технічна сумісність у базовому значенні слова ще не гарантує збереження повноти і точності сертифікаційних даних при перетині меж між різними цифровими екосистемами.

Відповіддю на цю проблему слугують відкриті стандарти обміну даними (наприклад, GS1 EPCIS для трасування подій у ланцюзі постачання), API-інтеграція між системами через уніфіковані формати, а також консорціумні блокчейн-мережі, де всі учасники ланцюга погоджують єдині правила управління реєстром. ЄС планомірно рухається у напрямку нормативного закріплення вимог до інтероперабельності: Organic Farming Information System (OFIS) поступово розширює функціональність взаємодії з TRACES – єдиною платформою відстеження тваринницьких, рослинних та інших вантажів. Водночас Регламент ЄС щодо Digital Product Passport передбачає до 2027 року блокчейн-верифіковані дані про увесь життєвий цикл для аграрного імпорту [9], що стане потужним регуляторним стимулом для уніфікації систем обміну даними.

Важливим організаційним механізмом подолання фрагментованості є формування консорціумних блокчейн-мереж, до яких долучаються виробники, переробники, логістичні компанії та регулятори з метою створення спільних систем управління реєстром. Такий підхід вже апробується у рамках пілотних ініціатив у Дубаї та низці країн ЄС, де агробізнес використовує блокчейн для мінімізації логістичних неефективностей і хибних маркувань при одночасному моніторингу продуктів, що швидко псуються, в режимі реального часу [15].

Питання економічної ефективності цифрових інвестицій у логістику є ключовим для прийняття управлінських рішень органічними господарствами. Слід розрізняти два взаємопов'язані аспекти: вплив цифрових рішень на операційні витрати (скорочення втрат, зменшення простоїв, оптимізація маршрутів) та витрати на саме впровадження цих рішень.

З точки зору операційних ефектів, дані є переконливими. Дослідження, проведені у рамках систематичного огляду сталості холодового ланцюга (B. Zhang та J. Mohammad, 2024), свідчать, що реальний моніторинг на основі IoT і RFID в поєднанні з алгоритмами оптимізації маршрутів дозволяє скоротити відходи, зменшити час транспортування та знизити витрати [18]. Прогнози щодо масштабів скорочення харчових втрат при впровадженні передових блокчейн-рішень є значними: за даними галузевих звітів, блокчейн-верифіковані системи відкликання продуктів здатні зменшити кількість знищеної через небезпеку харчової продукції на 80% [16; 17]. Споживачі, зі свого боку, готові платити від 23 до 41% надбавки за продукти з блокчейн-підтвердженим походженням [9], що дозволяє частково або повністю компенсувати витрати на цифровізацію через цінову премію.

Разом із тим, висока початкова вартість впровадження залишається реальним бар'єром: первісні інвестиції в апаратне і програмне забезпечення, навчання персоналу та інтеграцію з партнерськими системами можуть суттєво навантажувати бюджет невеликих господарств. Дослідження Frontiers щодо впливу цифрової трансформації на ефективність ланцюга постачання аграрних підприємств фіксує характерний «U-подібний» ефект: на початкових етапах цифрова трансформація може мати нейтральний або навіть негативний вплив на операційну ефективність через дезорганізацію і навчальну криву, однак у міру набуття досвіду і зрілості цифрових застосувань ефект стає позитивним і наростаючим. Тому стратегія поетапного впровадження є оптимальною: починати слід із рішень, що забезпечують швидкі виграші – хмарний облік партій, мобільне маркування, базова температурна сигналізація, – і лише потім переходити до повноцінних TMS і блокчейн-платформ [3; 15].

Питання масштабованості та економічної доцільності цифрових рішень для малих і середніх органічних господарств (МСГ) є принципово важливим з огляду на структуру органічного сектора: абсолютну більшість органічних виробників у Європі та Україні становлять саме дрібні та середні суб'єкти.

Системний огляд цифрової трансформації аграрних підприємств констатує, що малі і середні підприємства в агропродовольчому секторі мають обмежений фінансовий потенціал і слабкий управлінський досвід, а цифрова інфраструктура в сільськогосподарських регіонах залишається нерозвиненою, що разом із низькою цифровою грамотністю та схильністю до уникання ризиків перетворює початковий етап цифровізації на складний і витратний процес [17]. Проект ЄС Farmtopia, що реалізується у 15 європейських країнах, демонструє, що залучення самих фермерів і постачальників цифрових послуг до процесу розроблення і впровадження рішень дозволяє суттєво знизити витрати для обох сторін і зробити цифрові агросервіси доступними і стійкими для дрібних господарств [4].

Аналізуючи поріг економічної доцільності, можна виділити три визначальні умови. По-перше, обсяг виробництва і збуту: для дрібних органічних господарств доцільні базові цифрові рішення (мобільний облік, QR-трасування, хмарний документообіг), що мають позитивну окупність, як правило, протягом 1–2 сезонів. По-друге, асортимент: при диверсифікованому асортименті (10 і більше позицій) автоматизація обліку запасів і замовлень дає відчутний ефект вже при порівняно невеликих масштабах виробництва. По-третє, ринки збуту: вихід на міжнародні ринки або співпраця з великими роздрібними мережами де-факто зобов'язують господарство впроваджувати цифрову трасування, оскільки відповідні вимоги закладені в партнерські умови.

З урахуванням цих критеріїв у табл. 2 запропоновано п'ятирівневу модель оцінки зрілості цифрової логістики, диференційовану за типами господарств.

Таблиця 2. П'ятирівнева модель оцінки зрілості цифрової логістики органічних господарств

Рівень зрілості	Назва рівня	Характеристика господарства	Ключові цифрові інструменти	Очікуваний ефект
1	Початковий	Дрібне органічне господарство (<50 га); ручний документообіг; продаж переважно через ринки та CSA	QR-коди для маркування; мобільні додатки обліку партій; хмарні таблиці обліку запасів	Базова простежуваність; скорочення паперового документообігу на 40–60%
2	Базовий	Середнє господарство (50–300 га); часткова цифровізація; збут через регіональних дистриб'юторів	ERP-системи (1C:Агро, Trimble); IoT-датчики температури і вологості; базові TMS	Скорочення втрат продукції на 10–15%; зменшення часу обробки замовлень
3	Інтегрований	Велике господарство або кооператив (300–1000 га); інтеграція з сертифікаційними органами; мультиканальний збут	Повноцінні TMS з оптимізацією маршрутів; API-інтеграція з сертифікаторами; RFID-мітки; блокчейн-пілоти	Зниження логістичних витрат на 15–25%; прискорення сертифікаційних аудитів на 30–50%
4	Розширений	Агрохолдинг або кластер (>1000 га); системна цифровізація; міжнародний збут через e-commerce	Блокчейн-реєстри простежуваності; AI-прогнозування попиту та терміну придатності; цифровий двійник ланцюга поставок	Скорочення втрат до 80%; повна прозорість для споживача; відповідність EU Digital Product Passport (2027)
5	Трансформаційний	Інтегрований агро-екосистем-кластер; взаємодія з ринками, урядом, фінансовими структурами в єдиній екосистемі	Повна інтероперабельність платформ; смарт-контракти для автоматичного підтвердження сертифікатів; carbon credit tracking	Максимізація SDG-ефектів: зниження CO ₂ -відбитку, нульові харчові втрати у ланцюгу; преміум-позиціонування на ринку

Джерело: розроблено автором на основі [3-4; 9; 15; 18].

Модель відображає поступову траєкторію цифрової трансформації – від простих мобільних інструментів дрібного господарства (рівень 1) до повністю інтегрованих екосистемних платформ великих агрокластерів (рівень 5). Показово, що вже на рівні 2–3 господарство отримує відчутні операційні переваги: скорочення втрат продукції на 10–15%, прискорення документообігу з сертифікаційними органами та покращення умов переговорів із дистриб'юторами.

Запропонована модель базується на синтезі кількох наукових підходів. Перший – соціотехнічний підхід (O. Strohм & E. Ulich, 1997), який розглядає цифрову зрілість як взаємодію трьох складових: технологій (hardware, software), людей (цифрова компетентність персоналу) та організаційного контексту (процеси, стратегія, культура). Другий підхід – ресурсно-орієнтований (J.B. Varney, 1991), що наголошує на важливості внутрішніх координаційних і мобілізаційних здатностей організації для успіху цифрової трансформації. Третій підхід – регуляторно-орієнтований, відповідно до якого рівень цифрової зрілості визначається також ступенем відповідності актуальним і очікуваним вимогам регуляторного середовища (EU Organic Regulation 2018/848, Digital Product Passport тощо).

Для практичного застосування моделі пропонується здійснювати оцінку за п'ятьма блоками показників: (1) цифрова інфраструктура (наявність IoT-пристроїв, підключення до Інтернету, хмарні ресурси); (2) управління даними

(структурованість, захист, резервування даних); (3) інтеграція з зовнішніми системами (API-з'єднання з сертифікаторами, дистриб'юторами, роздріб.); (4) автоматизація процесів (ступінь заміни ручних операцій цифровими); (5) стратегічне управління (наявність цифрової стратегії, відповідальних осіб, моніторингу результатів). Кожен блок оцінюється за шкалою від 1 до 5, а підсумковий індекс цифрової зрілості логістики (ЦЗЛ) обчислюється як середньозважена по блоках, де вагові коефіцієнти враховують специфіку типу господарства і ринку збуту.

Оцінка рівня зрілості цифрової логістики органічного господарства за п'ятьма блоками показників може бути представлена у вигляді зваженої суми або середньозваженого значення:

$$I_{CML} = \frac{\sum_{i=1}^5 (S_i \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^5 W_i} \quad (1)$$

де: I_{CML} – індекс цифрової зрілості логістики (підсумкове значення від 1 до 5);

i – номер блоку показників ($i=1,2,3,4,5$);

S_i – оцінка i -го блоку за шкалою від 1 до 5;

W_i – ваговий коефіцієнт i -го блоку, що враховує специфіку типу господарства та ринку збуту.

Блоки показників (S_i):

S_1 – цифрова інфраструктура

S_2 – управління даними

S_3 – інтеграція із зовнішніми системами

S_4 – автоматизація процесів

S_5 – стратегічне управління

Слід зазначити, що якщо вагові коефіцієнти нормалізовані так, що $\sum_{i=1}^5 W_i = 1$, формула спрощується до:

$$I_{CML} = \sum_{i=1}^5 (S_i \cdot W_i) \quad (2)$$

Отримане значення I_{CML} округлюється до найближчого цілого (або порівнюється з інтервалами) для визначення рівня зрілості від 1 (Початковий) до 5 (Трансформаційний).

Запровадження систематичної оцінки за такою методикою дозволить органічним господарствам різних типів визначати прогалини у цифровій готовності, пріоритизувати інвестиції і порівнювати власний стан із галузевими орієнтирами, що є необхідною умовою обґрунтованого стратегічного планування у сфері цифровізації логістики.

Цифровізація органічної логістики є не лише бізнес-рішенням, а й інструментом досягнення глобальних Цілей сталого розвитку (ЦСР) ООН. Насамперед йдеться про ЦСР 2 (Подолання голоду) і ЦСР 12 (Відповідальне споживання та виробництво), в рамках яких скорочення харчових втрат є пріоритетним завданням.

Розраховано, що майже третина всіх вироблених у світі продуктів харчування втрачається або стає відходами щорічно [15]. Значну частку цих втрат формують субоптимальні умови зберігання і транспортування – саме та сфера, де IoT-рішення мають найвищий потенціал впливу. Дослідження M. Vasileiou та ін. показують, що управління запасами на основі IoT і принципу FEFO дозволяє скоротити харчові втрати безпосередньо у ланцюгу постачання. Галузеві прогнози свідчать, що перехід до блокчейн-верифікованих відкликань і цифрового моніторингу здатен зменшити кількість продуктів, знищених через порушення безпечності, до 80% [15; 18].

Що стосується ЦСР 13 (Клімат), оптимізація маршрутів із мінімізацією вуглецевих викидів є безпосереднім внеском цифрових TMS-систем: дослідження MDPI (2024) [7] демонструє, що серед чотирьох цільових функцій багаточислової оптимізації маршрутів холододового ланцюга мінімізація вуглецевих викидів є математично сумісною з мінімізацією загального часу і вартості транспортування, тобто одночасне досягнення обох цілей є технічно реалізованим.

Важливим виміром є ЦСР 17 (Партнерство заради сталого розвитку): консорціумні блокчейн-мережі, що об'єднують виробників, сертифікаторів, логістичних операторів і роздрібні мережі, формують нові моделі багатостороннього партнерства, засновані на спільних довірчих реєстрах і смарт-контрактах. Ці моделі, підтримані ринком блокчейн у сфері аграрних ланцюгів постачання, що, за прогнозами, зростатиме з темпом 36,0% CAGR у 2025–2035 роках [7], є і економічно, і соціально доцільними.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Проведене теоретично-аналітичне дослідження дає підстави для таких висновків. Так, «цифрова логістика органічної аграрної продукції» є самостійною науковою категорією, що не зводиться до зеленої логістики: її специфіка визначається комплексним поєднанням регуляторних вимог органічної сертифікації, принципу «органічної цілісності» та необхідності наскрізного цифрового документування на кожному переході права власності на продукт. Ключові відмінності органічної логістики від конвенційної – роздільне зберігання, строга простежуваність, коротші терміни придатності і менші партії – безпосередньо визначають вектор вибору цифрових рішень: IoT-моніторинг, блокчейн-реєстри і TMS-системи виступають не факультативними, а структурно необхідними елементами логістичної інфраструктури органічного господарства.

Найбільш гострою системною проблемою залишається інтероперабельність цифрових систем: семантична деградація даних при крос-ланцюговому обміні між різними блокчейн-мережами досягає 23%, що підірвало б цілісність сертифікаційних записів без спеціальних заходів стандартизації. Відповіддю на цей виклик є нормативне закріплення відкритих стандартів обміну даними (GS1 EPCIS), розвиток OFIS/TRACES-взаємодії в ЄС і запровадження вимог Digital Product Passport до 2027 року.

Цифровізація органічної логістики має вимірний внесок у досягнення ЦСР ООН: скорочення харчових втрат до 80% за рахунок блокчейн-верифікованих систем відкликання, зниження вуглецевих викидів у транспортуванні завдяки AI-оптимізації маршрутів, а також підтримка моделей багатостороннього партнерства у рамках консорціумних цифрових екосистем.

Узагальнюючи, цифрові технології є не просто інструментом операційної оптимізації, а стратегічним чинником конкурентоспроможності органічного аграрного сектора в умовах посиленого регуляторного тиску і зростаючих вимог споживачів до прозорості та підтвердженого походження продукту.

Перспективними напрямками подальших досліджень є: апробація запропонованої моделі оцінки цифрової зрілості на вибірці українських органічних господарств; аналіз бар'єрів і стимулів цифровізації з урахуванням особливостей аграрного регулювання в Україні; розробка методики розрахунку повної вартості цифровізації логістики із урахуванням екстерналій (скорочення харчових втрат, вуглецевий слід, соціальний ефект).

Література

1. Bai L., Liu M., Sun Y. Overview of Food Preservation and Traceability Technology in the Smart Cold Chain System. *Foods*. 2023. vol. 12(15). p. 2881. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12152881>.
2. Chen H., Wang W., Jia L. et al. Research on time-varying path optimization for multi-vehicle type fresh food logistics distribution considering energy consumption. *Scientific Reports*. 2024. vol. 14. p. 27068. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78639-1>.
3. Ellahi R. M., Wood L. C., Bekhit A. E.-D. A. Blockchain-Based Frameworks for Food Traceability: A Systematic Review. *Foods*. 2023. vol. 12(16). p. 3026. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12163026>.
4. EU CAP Network. Farmtopia: Democratizing digital farming through smart solutions for small farms. 2024. URL: https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects/democratizing-digital-farming-through-smart-solutions-small-farms_en.
5. Ferrández-Pastor F. J., Mora-Pascual J., Díaz-Lajara D. Agricultural traceability model based on IoT and Blockchain: Application in industrial hemp production. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. vol. 29, 100381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100381>.
6. Food Chain Magazine. How transportation management systems improve supply chain efficiency. 2024. URL: <https://foodchainmagazine.com/news/how-transportation-management-systems-improve-supply-chain-efficiency/>.
7. Blockchain in Agriculture and Food Supply Chain Market. Future Market Insights. 2025. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/blockchain-in-agriculture-and-food-supply-chain-market>.
8. Hohagen S., Wilkens U. How to measure digital maturity in agriculture? Conceptual outline, instrument development and measurement results from German farms. *International Food and Agribusiness Management Review*. 2025. vol. 28(5). pp. 927–947. DOI: <https://doi.org/10.22434/ifamr.1027>.
9. Huang Y., Li X., Xu L., Ma Y. Digital traceability in horticulture: a systematic review of edge-cloud-blockchain-terminal (ECBT) integration with IoT and AI technologies. *Frontiers in Blockchain*. 2025. vol. 8. p. 1636627. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1636627>.
10. Jedermann R., Nicometo M., Uysal I., Lang W. Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2014. vol. 372(2017). p. 20130302. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0302>.
11. Junge A. L. Digital transformation technologies as an enabler for sustainable logistics and supply chain processes - an exploratory framework. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2019. vol. 16(3). pp. 462–472. DOI: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a9>.
12. Kunrath T. L., Dresch A., Veit D. R. Supply chain management and industry 4.0: a theoretical approach. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*. 2023. vol. 20(1). p. 1263–1263. DOI: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.1263.2023>.
13. Peng Y., Zhang Y., Yu D. Z., Luo Y. Multiobjective Route Optimization for Multimodal Cold Chain Networks Considering Carbon Emissions and Food Waste. *Mathematics*. 2024. vol. 12(22). p. 3559. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12223559>.
14. Sharma V., Palakshappa A., Naqvi S. A. Enhancing Traceability in Agricultural Supply Chain Using Blockchain Technology. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2024. vol. 16(3). pp. 11–21. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2024.03.02>.
15. Vasileiou M., Kyrgiakos L. S., Kleisiari C. et al. Digital Transformation of Food Supply Chain Management Using Blockchain: A Systematic Literature Review Towards Food Safety and Traceability. *Business & Information Systems Engineering*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-025-00948-0>.
16. Wang W., Li Z., Meng Q. Digital Transformation Drivers, Technologies, and Pathways in Agricultural Product Supply Chains: A Comprehensive Literature Review. *Applied Sciences*. 2025. vol. 15(19) : 10487. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151910487>.
17. Wong E. K. S., Ting H. Y., Atanda A. F. Enhancing Supply Chain Traceability through Blockchain and IoT Integration: A Comprehensive Review. *Green Intelligent Systems and Applications*. 2024. vol. 4(1). pp. 11–28.
18. Zhang B., Mohammad J. Sustainability of perishable food cold chain logistics: a systematic literature review. *Sage Open*. 2024. vol. 14(3). p. 21582440241280455.

References

1. Bai, L., Liu, M., & Sun, Y. (2023). Overview of Food Preservation and Traceability Technology in the Smart Cold Chain System. *Foods*, vol. 12(15), p. 2881. <https://doi.org/10.3390/foods12152881>.
2. Chen, H., Wang, W., Jia, L., et al. (2024). Research on time-varying path optimization for multi-vehicle type fresh food logistics distribution considering energy consumption. *Scientific Reports*, vol. 14, p. 27068. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78639-1>.
3. Ellahi, R. M., Wood, L. C., & Bekhit, A. E.-D. A. (2023). Blockchain-Based Frameworks for Food Traceability: A Systematic Review. *Foods*, vol. 12(16), p. 3026. <https://doi.org/10.3390/foods12163026>.
4. EU CAP Network. (2024). *Farmtopia: Democratizing digital farming through smart solutions for small farms*. Available at: https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects/democratizing-digital-farming-through-smart-solutions-small-farms_en.
5. Ferrández-Pastor, F. J., Mora-Pascual, J., & Díaz-Lajara, D. (2022). Agricultural traceability model based on IoT and Blockchain: Application in industrial hemp production. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 29, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100381>.
6. Food Chain Magazine. (2024). *How transportation management systems improve supply chain efficiency*. Available at: <https://foodchainmagazine.com/news/how-transportation-management-systems-improve-supply-chain-efficiency/>.
7. Future Market Insights. (2025). *Blockchain in Agriculture and Food Supply Chain Market*. Available at: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/blockchain-in-agriculture-and-food-supply-chain-market>.
8. Hohagen, S., & Wilkens, U. (2025). How to measure digital maturity in agriculture? Conceptual outline, instrument development and measurement results from German farms. *International Food and Agribusiness Management Review*, vol. 28(5), pp. 927–947. <https://doi.org/10.22434/ifamr.1027>.
9. Huang, Y., Li, X., Xu, L., & Ma, Y. (2025). Digital traceability in horticulture: a systematic review of edge-cloud-blockchain-terminal (ECBT) integration with IoT and AI technologies. *Frontiers in Blockchain*, vol. 8, p. 1636627. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1636627>.
10. Jedermann, R., Nicometo, M., Uysal, I., & Lang, W. (2014). Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 372(2017), p. 20130302. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0302>.
11. Junge, A. L. (2019). Digital transformation technologies as an enabler for sustainable logistics and supply chain processes - an exploratory framework. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, vol. 16(3), pp. 462–472. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a9>.
12. Kunrath, T. L., Dresch, A., & Veit, D. R. (2023). Supply chain management and industry 4.0: a theoretical approach. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, vol. 20(1), p. 1263. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.1263.2023>.
13. Peng, Y., Zhang, Y., Yu, D. Z., & Luo, Y. (2024). Multiobjective Route Optimization for Multimodal Cold Chain Networks Considering Carbon Emissions and Food Waste. *Mathematics*, vol. 12(22), p. 3559. <https://doi.org/10.3390/math12223559>.
14. Sharma, V., Palakshappa, A., & Naqvi, S. A. (2024). Enhancing Traceability in Agricultural Supply Chain Using Blockchain Technology. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*, vol. 16(3), pp. 11–21. <https://doi.org/10.5815/ijieeb.2024.03.02>.
15. Vasileiou, M., Kyrgiakos, L. S., Kleisiari, C., et al. (2025). Digital Transformation of Food Supply Chain Management Using Blockchain: A Systematic Literature Review Towards Food Safety and Traceability. *Business & Information Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12599-025-00948-0>.
16. Wang, W., Li, Z., & Meng, Q. (2025). Digital Transformation Drivers, Technologies, and Pathways in Agricultural Product Supply Chains: A Comprehensive Literature Review. *Applied Sciences*, vol. 15(19), 10487. <https://doi.org/10.3390/app151910487>.
17. Wong, E. K. S., Ting, H. Y., & Atanda, A. F. (2024). Enhancing Supply Chain Traceability through Blockchain and IoT Integration: A Comprehensive Review. *Green Intelligent Systems and Applications*, vol. 4(1), pp. 11–28.
18. Zhang, B., & Mohammad, J. (2024). Sustainability of perishable food cold chain logistics: a systematic literature review. *SAGE Open*, vol. 14(3), p. 21582440241280455.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2025 р.