

Інтеграція цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками в системі сталого розвитку підприємств

Предметом дослідження є система взаємозв'язків між цифровими технологіями моніторингу, механізмами превентивного управління екологічними ризиками та стратегічними параметрами сталого розвитку підприємств у контексті сучасної екологічно орієнтованої трансформації економічних систем. У межах роботи предмет дослідження розглядається як інтегрована сукупність організаційно–економічних, техніко–технологічних, інформаційно–аналітичних та управлінських характеристик, що визначають здатність підприємств своєчасно ідентифікувати, прогнозувати, контролювати та мінімізувати екологічні ризики на основі використання сучасних цифрових інструментів. Особлива увага приділяється системним механізмам трансформації цифрового моніторингу в інструмент стратегічного превентивного управління, а також специфіці інтеграції цифрових екологічних рішень у загальну систему сталого розвитку підприємств з урахуванням вимог екологічної безпеки, ESG–принципів, ресурсної ефективності та довгострокової конкурентоспроможності. Предмет дослідження охоплює не лише окремі технологічні рішення чи управлінські процедури, а їх комплексну взаємодію, що формує результируючий ефект екологічної стійкості підприємства. Такий підхід дозволяє розглядати цифрові технології екологічного моніторингу не як допоміжний інструмент контролю, а як стратегічний елемент системи сталого розвитку, здатний забезпечувати довгострокову стабільність, адаптивність та екологічну безпеку підприємств.

Метою статті є обґрунтування системно–аналітичного підходу до дослідження інтеграції цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками у систему сталого розвитку підприємств, а також виявлення ключових закономірностей формування екологічної стійкості на основі цифрової трансформації. Досягнення поставленої мети передбачає узагальнення теоретичних підходів до трактування екологічних ризиків, цифрового моніторингу та сталого розвитку, визначення структурних компонентів їх взаємодії, а також ідентифікацію механізмів, які забезпечують ефективну інтеграцію цифрових екологічних технологій у корпоративну систему управління.

Методологія проведення роботи. Методологічною основою дослідження є системно–аналітичний підхід, який дозволяє розглядати цифрові технології моніторингу, екологічні ризики та систему сталого розвитку як взаємопов'язані елементи єдиної соціально–економічної та екологічної системи підприємства. У роботі використано поєднання загальнонаукових і спеціальних методів дослідження. Зокрема, методи аналізу та синтезу застосовано для структуризації складових цифрового екологічного моніторингу та превентивного управління ризиками. Індуктивний і дедуктивний методи дали змогу узагальнити науково–теоретичні положення та сформувати логічно узгоджену модель інтеграції цифрових технологій у систему сталого розвитку підприємств.

Метод порівняльного аналізу використано для дослідження сучасних цифрових екологічних інструментів, їх функціональних можливостей та ефективності у різних виробничих і управлінських умовах. Елементи структурно–функціонального підходу дозволили визначити функціональні ролі окремих цифрових технологій у забезпеченні екологічної стійкості, мінімізації ризиків та підвищенні ефективності управлінських рішень. Логіко–абстрактні методи застосовано для формування концептуальних положень дослідження та узагальнення результатів. Така методологічна композиція забезпечує високий рівень наукової обґрунтованості отриманих результатів та їх практичну релевантність у сфері стратегічного управління сталим розвитком підприємств.

Результати роботи встановили, що цифрові технології моніторингу виступають ключовим елементом сучасної системи превентивного управління екологічними ризиками, забезпечуючи своєчасну ідентифікацію загроз, оперативний контроль екологічних параметрів, прогнозування ризиків та формування ефективних управлінських рішень. Виявлено, що інтеграція цифрових екологічних рішень суттєво підвищує рівень екологічної безпеки підприємств, знижує ймовірність виникнення критичних екологічних ситуацій, сприяє оптимізації ресурсного використання та забезпечує під–

вищення стратегічної стійкості підприємства. Обґрунтовано, що найбільш результативними є інтегровані моделі, які поєднують IoT–моніторинг, Big Data–аналітику, GIS–системи, автоматизовані системи екологічного контролю та цифровий екологічний контролінг.

Отримані результати дозволили сформуванню узагальненої аналітичної моделі інтеграції цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками у систему сталого розвитку підприємств, яка враховує організаційно–економічні, екологічні, технологічні та стратегічні аспекти функціонування сучасного підприємства.

Висновки. Проведене системно–аналітичне дослідження підтверджує, що цифрові технології моніторингу екологічних ризиків виступають не лише технічним інструментом контролю, а стратегічним механізмом забезпечення сталого розвитку підприємств. Встановлено, що ефективність цифрової екологічної трансформації залежить від ступеня інтегрованості цифрових технологій у загальну систему корпоративного управління, адаптивності організаційної структури та рівня стратегічної орієнтації підприємства на принципи екологічної безпеки та сталого розвитку. Узагальнено, що системна інтеграція цифрових технологій моніторингу, прогнозування та превентивного управління екологічними ризиками дозволяє підприємствам не лише мінімізувати екологічні загрози, але й формувати довгострокові конкурентні переваги, інвестиційну привабливість та стратегічну стійкість.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання для розроблення адаптивних цифрово–екологічних стратегій, орієнтованих на підвищення екологічної безпеки, ресурсної ефективності, економічної результативності та довгострокового сталого розвитку підприємств.

Ключові слова: цифрові технології, екологічний моніторинг, превентивне управління, екологічні ризики, сталий розвиток підприємств, ESG, цифрова трансформація, екологічна безпека, Big Data, IoT.

DMYTRO NIKOLAYKO

Integration of digital monitoring technologies and preventive management of environmental risks in the system of sustainable development of enterprises

The subject of the research is the system of interrelations between digital monitoring technologies, mechanisms of preventive environmental risk management, and strategic parameters of sustainable enterprise development within the context of the modern environmentally oriented transformation of economic systems. Within the framework of this study, the subject is considered as an integrated set of organizational–economic, technical–technological, informational–analytical, and managerial characteristics that determine the ability of enterprises to timely identify, forecast, control, and minimize environmental risks through the use of modern digital tools. Special attention is paid to the systemic mechanisms of transforming digital monitoring into an instrument of strategic preventive management, as well as to the specifics of integrating digital environmental solutions into the overall system of sustainable enterprise development, taking into account environmental safety requirements, ESG principles, resource efficiency, and long–term competitiveness. The subject of the research covers not only individual technological solutions or management procedures, but also their comprehensive interaction, which forms the resulting effect of enterprise environmental sustainability. Such an approach makes it possible to consider digital environmental monitoring technologies not merely as an auxiliary control instrument, but as a strategic element of the sustainable development system capable of ensuring long–term stability, adaptability, and environmental safety of enterprises.

The purpose of the article is to substantiate a systemic–analytical approach to the study of integrating digital monitoring technologies and preventive environmental risk management into the sustainable development system of enterprises, as well as to identify the key patterns of environmental sustainability formation based on digital transformation. Achieving this goal involves generalizing theoretical approaches to the interpretation of environmental risks, digital monitoring, and sustainable development, determining the structural components of their interaction, and identifying the mechanisms that ensure the effective integration of digital environmental technologies into the corporate management system. Within the article, the goal is specified through the analysis

of systemic factors that facilitate or constrain the transformation of digital environmental solutions into preventive management mechanisms, as well as through the formation of generalized analytical conclusions suitable for practical application in the strategic management of enterprise sustainable development.

Methodology of the study. *The methodological basis of the research is a systemic–analytical approach, which makes it possible to consider digital monitoring technologies, environmental risks, and the sustainable development system as interrelated elements of a unified socio–economic and environmental enterprise system. The study employs a combination of general scientific and specialized research methods. In particular, methods of analysis and synthesis were used to structure the components of digital environmental monitoring and preventive risk management. Inductive and deductive methods made it possible to generalize scientific–theoretical provisions and to form a logically coherent model of integrating digital technologies into the sustainable development system of enterprises.*

The comparative analysis method was applied to study modern digital environmental tools, their functional capabilities, and effectiveness under various production and management conditions. Elements of the structural–functional approach made it possible to determine the functional roles of individual digital technologies in ensuring environmental sustainability, minimizing risks, and improving the effectiveness of management decisions. Logical–abstract methods were used to formulate conceptual provisions of the study and summarize the results. Such a methodological composition ensures a high level of scientific validity of the obtained results and their practical relevance in the field of strategic management of enterprise sustainable development.

The results of the study *established that digital monitoring technologies act as a key element of the modern system of preventive environmental risk management, ensuring timely identification of threats, operational control of environmental parameters, risk forecasting, and the formation of effective management decisions. It was found that the integration of digital environmental solutions significantly increases the level of environmental safety of enterprises, reduces the likelihood of critical environmental situations, contributes to resource optimization, and ensures an increase in the strategic sustainability of enterprises. It was substantiated that the most effective are integrated models combining IoT monitoring, Big Data analytics, GIS systems, automated environmental control systems, and digital environmental controlling.*

The obtained results made it possible to form a generalized analytical model of integrating digital monitoring technologies and preventive environmental risk management into the sustainable development system of enterprises, which takes into account organizational–economic, environmental, technological, and strategic aspects of the functioning of a modern enterprise.

Conclusions. *The conducted systemic–analytical study confirms that digital technologies for environmental risk monitoring function not only as technical control instruments, but also as strategic mechanisms for ensuring sustainable enterprise development. It was established that the effectiveness of digital environmental transformation depends on the degree of integration of digital technologies into the overall corporate management system, the adaptability of the organizational structure, and the level of strategic orientation of the enterprise toward the principles of environmental safety and sustainable development. It was generalized that the systemic integration of digital monitoring technologies, forecasting, and preventive environmental risk management enables enterprises not only to minimize environmental threats, but also to form long–term competitive advantages, investment attractiveness, and strategic sustainability.*

The practical significance of the results lies in the possibility of their application for developing adaptive digital–environmental strategies aimed at increasing environmental safety, resource efficiency, economic performance, and long–term sustainable development of enterprises.

Keywords: *digital technologies, environmental monitoring, preventive management, environmental risks, sustainable enterprise development, ESG, digital transformation, environmental safety, Big Data, IoT.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобальної екологічної трансформації, посилення кліматичних викликів, зростання техногенного навантаження та підвищення вимог до екологічної відповідальності бізнесу проблема забезпечення ефективного моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками набуває стратегічного значення для підприємств різних галузей. Посилення екологічних загроз, нестабільність природно–ресурсного середовища, жорсткіша регуляторна політика, впровадження ESG–принципів та необхідність переходу до моделей сталого розвитку обумовлюють потребу кардинального переосмислення традиційних підходів до системи екологічного управління. Водночас у практиці функціонування підприємств екологічний моніторинг часто розглядається фрагментарно — переважно як інструмент контролю окремих показників, без належної інтеграції в систему стратегічного управління екологічною безпекою та сталим розвитком.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах цифрової трансформації економіки, коли сучасні цифрові технології створюють принципово нові можливості для оперативного збору, аналізу, прогнозування та превентивного реагування на екологічні ризики. Використання IoT–сенсорів, Big Data–аналітики, GIS–систем, штучного інтелекту, автоматизованих платформ екологічного контролю та цифрового екологічного контролінгу дозволяє суттєво підвищити точність моніторингу, скоротити час реагування на загрози та забезпечити більш високий рівень стратегічної адаптивності підприємств. Проте в більшості випадків цифрові екологічні рішення впроваджуються локально, без системного включення в корпоративну модель управління, що значно обмежує їх ефективність.

Ігнорування комплексної інтеграції цифрових технологій у систему управління екологічними ризиками призводить до зростання екологічної вразливості підприємств, фінансових втрат, репутаційних ризиків та зниження довгострокової конкурентоспроможності. Як наслідок, виникає необхідність переходу від реактивних моделей екологічного контролю до системно інтегрованих цифрових механізмів превентивного управління, здатних забезпечувати стабільність, безпечність та стратегічну стійкість підприємств у межах концепції сталого розвитку.

Аналіз досліджень і публікацій проблеми.

Проблематика екологічних ризиків, екологічного моніторингу та сталого розвитку підприємств є предметом уваги численних наукових досліджень у межах екологічної економіки, стратегічного менеджменту, ризик–менеджменту та цифрової трансформації. У класичних працях екологічне управління переважно розглядається як система контролю за дотриманням нормативних вимог, мінімізацією негативного впливу на довкілля та забезпеченням ресурсної ефективності. При цьому цифрові технології здебільшого трактуються як допоміжний технічний інструментарій, що забезпечує інформаційну підтримку процесів моніторингу.

У сучасних наукових публікаціях простежується тенденція до розширення трактування цифрових екологічних технологій як стратегічного ресурсу забезпечення сталого розвитку підприємств. Дослідники акцентують увагу на високому потенціалі цифрових систем моніторингу для підвищення точності прогнозування екологічних ризиків, автоматизації контролю, формування адаптивних моделей управління та інтеграції екологічної безпеки у загальну корпоративну стратегію. Особлива увага приділяється використанню IoT, Big Data, GIS, цифрових платформ та ESG–рішень як інструментів сучасної екологічної модернізації підприємств.

Водночас більшість досліджень зосереджені або на технічних аспектах окремих цифрових інструментів, або на загальних питаннях сталого розвитку, що обмежує можливості формування комплексних моделей інтеграції цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками. Наявні публікації часто описують окремі практичні кейси чи функціональні рішення, не формуючи узагальненої системно–аналітичної моделі, яка б враховувала організаційно–економічні, стратегічні, екологічні та технологічні аспекти.

Таким чином, сучасний стан наукових досліджень свідчить про необхідність подальшого поглиблення теоретико–методологічних засад інтеграції цифрових технологій екологічного моніторингу в систему сталого розвитку підприємств. Особливо актуальним є формування комплексного підходу, який поєднує цифрову трансформацію, превентивне управління екологічними ризиками, стратегічне управління та принципи сталого розвитку в єдину ефективну систему корпоративного функціонування.

Виклад основного матеріалу: Формування сучасної системи сталого розвитку підприємств безпосередньо пов'язане з необхідністю глибокого теоретико-методологічного осмислення природи екологічних ризиків, їх місця у структурі корпоративного управління та ролі цифрових технологій у забезпеченні превентивного контролю. У межах сучасної екологічно орієнтованої трансформації економіки екологічні ризики перестають розглядатися виключно як зовнішні негативні фактори, а набувають статусу стратегічної категорії, що впливає на економічну стійкість, конкурентоспроможність, інвестиційну привабливість та довгострокову безпеку підприємства. Саме тому теоретичне обґрунтування механізмів інтеграції цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками стає фундаментом формування сучасної моделі сталого розвитку.

Екологічний ризик підприємства доцільно трактувати як ймовірність виникнення негативних екологічних подій або процесів, пов'язаних із виробничою, ресурсною, технологічною чи управлінською діяльністю, які можуть спричинити фінансові, соціальні, екологічні або репутаційні втрати. У межах сталого розвитку екологічний

ризик розглядається не лише як фактор загрози, але і як об'єкт стратегічного управління, що потребує постійного моніторингу, прогнозування та системної мінімізації [1].

Для сучасних підприємств ключовим стає перехід від реактивної моделі управління екологічними ризиками до превентивної, яка базується на ранньому виявленні потенційних загроз, використанні цифрових аналітичних платформ, автоматизованого моніторингу та інтегрованих систем екологічного контролю. Такий підхід дозволяє не лише знижувати екологічні збитки, але й формувати нові конкурентні переваги через підвищення стійкості підприємства.

Першочергово доцільно представити концептуальний рисунок 1, який демонструє структуру екологічних ризиків у системі сталого розвитку підприємства.

У межах теоретико-методологічного аналізу доцільно використовувати інтегральний показник рівня екологічного ризику підприємства:

$$W_{eco} = \sum_{i=1}^n (V_i \times J_i \times H_i), \quad (1)$$

де: W_{eco} – інтегральний рівень екологічного ризику, V_i – ймовірність виникнення окремого ризику, J_i – масштаб екологічних наслідків, H_i – рівень вразливості підприємства.

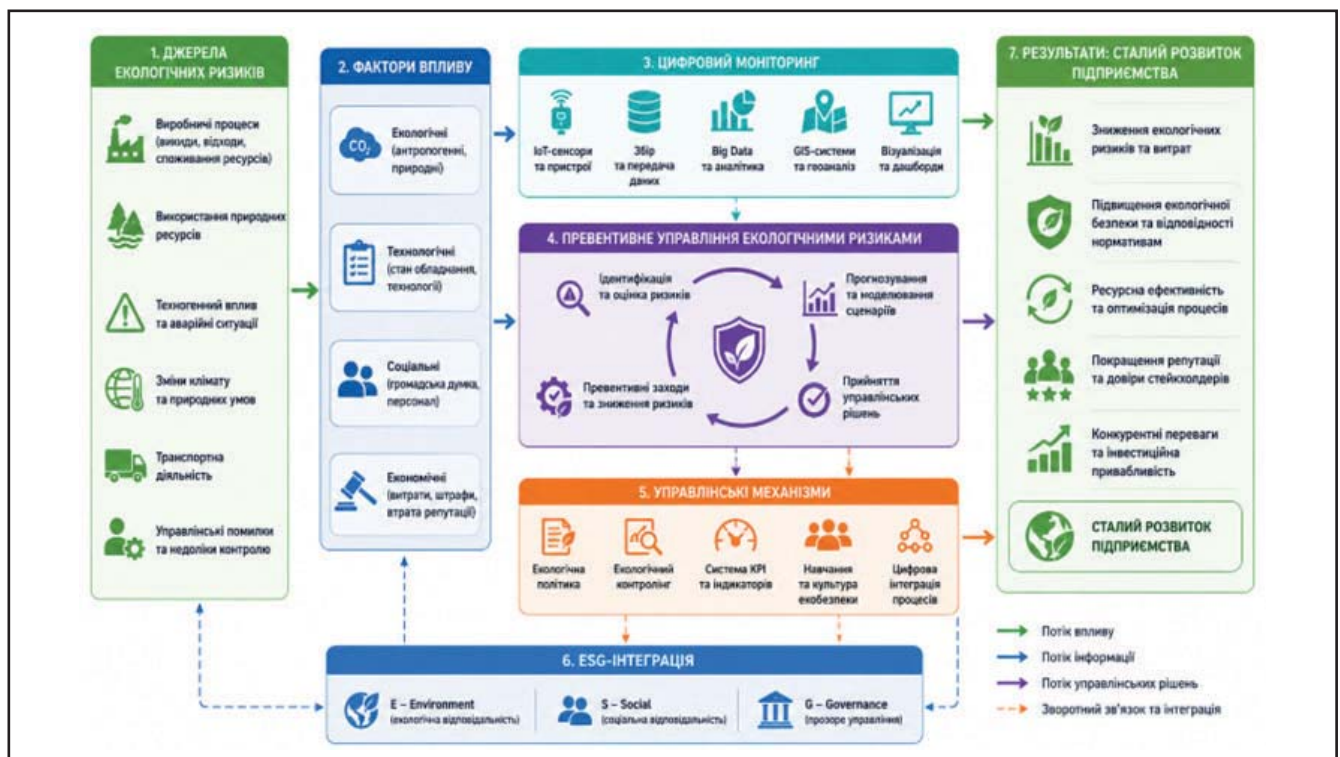


Рисунок 1. Концептуальна модель інтеграції цифрового моніторингу, превентивного управління екологічними ризиками та сталого розвитку підприємства

Джерело: розроблено автором на основі [1]

Дана модель дозволяє оцінювати комплексний вплив множини екологічних загроз на функціонування підприємства.

Другим важливим підходом виступає оцінка рівня екологічної стійкості підприємства:

$$K_{eco} = \frac{(P+F+N)}{D}, \quad (2)$$

де: K_{eco} — рівень екологічної стійкості, P — ефективність моніторингу, F — рівень цифровізації, N — ефективність превентивного управління, D — сукупний екологічний ризик.

Ця формула демонструє, що підвищення цифрової інтеграції та превентивних механізмів прямо впливає на зростання екологічної стійкості підприємства.

Теоретично система сталого розвитку підприємства повинна поєднувати: економічну ефективність, екологічну безпеку, цифрову трансформацію, соціальну відповідальність та стратегічну адаптивність [2].

Саме інтеграція цифрових технологій у процеси екологічного управління дозволяє підприємствам: мінімізувати ризики, прогнозувати загрози, оптимізувати ресурси, підвищувати ESG-відповідність та формувати довгострокову стійкість.

Отже, теоретико-методологічні основи екологічних ризиків у системі сталого розвитку підприємств формують базис для побудови сучасної цифрово-екологічної моделі корпоративного управління. Системний підхід дозволяє розглядати екологічні ризики як стратегічний об'єкт управління, а цифрові технології моніторингу — як ключовий інструмент забезпечення превентивного контролю, екологічної безпеки та довгострокового сталого розвитку підприємства.

Сформовані теоретико-методологічні засади дозволяють перейти від концептуального осмислення екологічних ризиків до практичного аналізу інструментів їх цифрового контролю та управління. Саме технологічна реалізація цифрового моніторингу виступає прикладною основою впровадження превентивної екологічної стратегії підприємства в системі сталого розвитку.

Сучасний розвиток підприємств у межах концепції сталого розвитку безпосередньо залежить від здатності ефективно використовувати цифрові технології для системного моніторингу, аналізу та превентивного управління екологічними ризиками. Умови посилення екологічних загроз, ускладнення виробничих процесів, підвищен-

ня регуляторних вимог та глобальна цифровізація економіки зумовлюють необхідність переходу від традиційних екологічних систем контролю до комплексних цифрових платформ управління екологічною безпекою. Саме цифрові технології дозволяють підприємствам забезпечувати безперервний збір даних, автоматизований контроль, прогнозування ризиків та оперативне прийняття управлінських рішень [3].

Ключовими технологіями сучасного цифрового екологічного моніторингу виступають Internet of Things (IoT), Big Data-аналітика, GIS-системи, штучний інтелект, машинне навчання, хмарні платформи, автоматизовані системи екологічного контролю та цифровий екологічний контролінг. IoT-сенсори дозволяють у режимі реального часу відстежувати показники викидів, рівень забруднення, стан ресурсного використання, температурні зміни, техногенні ризики та виробничі параметри. Це створює основу для постійного оперативного моніторингу.

Big Data-аналітика забезпечує обробку великих масивів екологічної інформації, виявлення закономірностей, оцінку потенційних загроз та формування прогнозних моделей. Використання GIS-систем дозволяє просторово аналізувати екологічні ризики, будувати карти впливу та оптимізувати управлінські рішення з урахуванням географічних факторів.

Штучний інтелект та алгоритми машинного навчання значно підвищують точність прогнозування ризиків, дозволяють моделювати сценарії розвитку екологічних ситуацій та автоматизувати процес прийняття превентивних рішень.

Для сучасного підприємства інтеграція цифрових технологій формує нову модель: моніторинг, аналіз, прогнозування, превентивне реагування, стратегічне управління.

Для наочного представлення структури цифрових технологій доцільно спочатку побудувати рисунок 2.

У межах оцінки ефективності цифрового моніторингу доцільно використовувати інтегральний показник цифрової екологічної ефективності:

$$V_{digital} = \frac{(S+T+I)}{A}, \quad (3)$$

де: $V_{digital}$ — ефективність цифрової системи моніторингу, S — точність ідентифікації ризиків, T — аналітична ефективність, I — превентивна результативність, A — витрати на систему.

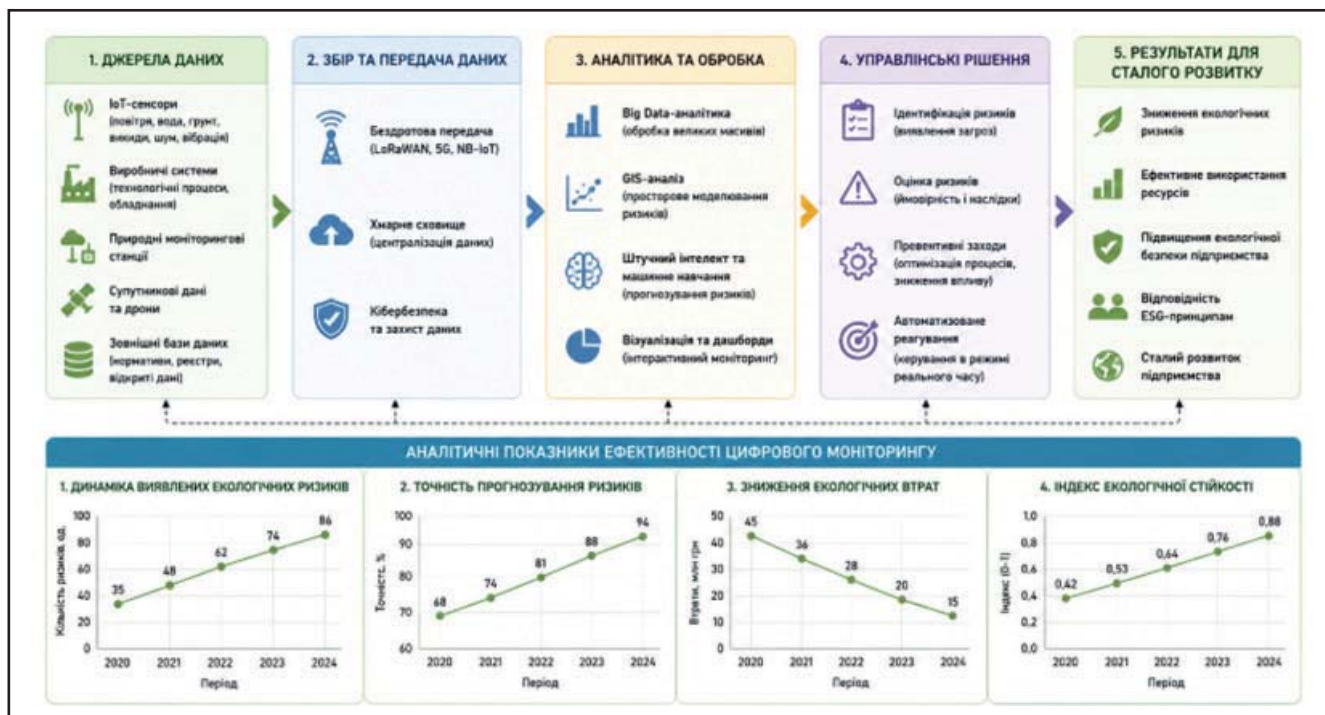


Рисунок 2. Аналітична модель сучасних цифрових технологій моніторингу екологічних ризиків підприємства в системі сталого розвитку

Джерело: розроблено автором на основі [3]

Ця формула дозволяє оцінити співвідношення між ефективністю цифрових рішень та ресурсами, необхідними для їх функціонування [4].

Другим важливим показником є рівень цифрового екологічного контролю:

$$V_{control} = \sum_{i=1}^n (G_i \times K_i), \quad (4)$$

де: $V_{control}$ – рівень цифрового контролю, G_i – технологічне охоплення окремої системи, K_i – коефіцієнт результативності.

Цей підхід дозволяє комплексно оцінювати рівень інтегрованості цифрових інструментів.

Для систематизації основних цифрових технологій доцільно побудувати таблицю 1.

Представлена таблиця демонструє, що сучасні цифрові технології охоплюють усі рівні екологічного управління – від збору даних до стратегічної інтеграції.

Отже, сучасні цифрові технології моніторингу екологічних ризиків формують основу нової моделі сталого розвитку підприємств, де цифровізація стає ключовим фактором екологічної безпеки, ресурсної ефективності та стратегічної конкурентоспроможності. Системне впровадження IoT, Big Data, GIS, AI та цифрового контролю забезпечує підприємствам можливість переходу до превентивного управління екологічними ризиками, підвищуючи їх стійкість, адаптивність та довгострокову ефективність.

Розгляд технологічного потенціалу цифрових систем екологічного моніторингу закономірно зумовлює необхідність дослідження механізмів їх практичної інтеграції в управлінську структуру підприємства. Саме організаційно-економічне забезпечення визначає, наскільки ефективно

Таблиця 1. Основні цифрові технології моніторингу екологічних ризиків підприємств

Цифрова технологія	Основне призначення	Екологічний ефект
IoT-сенсори	Безперервний збір екологічних даних	Оперативний контроль
Big Data-аналітика	Обробка великих масивів інформації	Прогнозування ризиків
GIS-системи	Просторовий аналіз ризиків	Гео екологічна оптимізація
AI / Machine Learning	Прогнозування сценаріїв	Превентивне реагування
Хмарні платформи	Централізоване управління	Інтеграція систем
Автоматизований контролінг	KPI та управлінський моніторинг	Підвищення стійкості
ESG-платформи	Стратегічний екологічний контроль	Репутаційне посилення

Джерело: розроблено автором на основі [4]

цифрові екологічні інструменти трансформуються з технологічного ресурсу у стратегічний фактор сталого розвитку.

Ефективність цифрової трансформації екологічного управління підприємств значною мірою визначається не лише рівнем технологічного розвитку, але й здатністю підприємства сформувати цілісні організаційно–економічні механізми інтеграції цифрових рішень у корпоративну систему управління. У межах сталого розвитку цифрові технології екологічного моніторингу повинні бути не ізольованими інструментами, а структурно вбудованими елементами стратегічного менеджменту, які забезпечують системну превенцію ризиків, оптимізацію витрат, екологічну безпеку та довгострокову стійкість підприємства. Саме тому організаційно–економічні механізми інтеграції виступають ключовою умовою результативного переходу до цифрово–екологічної моделі управління [11].

Організаційний аспект інтеграції передбачає перебудову управлінської структури підприємства з урахуванням цифрових екологічних функцій. Це включає формування спеціалізованих підрозділів цифрового екологічного контролінгу, інтеграцію екологічних KPI у стратегічне планування, впровадження цифрових панелей управління, створення механізмів внутрішньої координації між технічними, виробничими, фінансовими та екологічними службами. Така система забезпечує постійну взаємодію між інформаційними потоками та управлінськими рішеннями [5].

Економічний механізм інтеграції включає: інвестиції у цифрові технології, оцінку ефективності впровадження, оптимізацію витрат, екологічний контролінг, бюджетування цифрової модернізації, ESG–фінансування, систему екологічної рентабельності.

У сучасних умовах підприємства повинні оцінювати інтеграцію цифрових екологічних технологій не лише як витратний процес, а як інвестицію у стратегічну стійкість, яка забезпечує зниження потенційних екологічних збитків, підвищення репутації та конкурентоспроможності.

Для комплексної оцінки організаційно–економічної ефективності інтеграції цифрових технологій доцільно використовувати показник інтегрованої результативності:

$$S_{org-eco} = \frac{(E+J+A+D)}{L+B}, \quad (5)$$

де: $S_{org-eco}$ – інтегральна ефективність організаційно–економічної інтеграції, E – рівень цифровізації, J – якість моніторингу, A – економічний ефект, D – стратегічна стійкість, L – витрати на впровадження, B – залишкові ризики.

Ця модель дозволяє оцінювати співвідношення між результативністю інтеграції та ресурсними витратами [6].

Другим важливим інструментом виступає оцінка економічної доцільності цифрової екологічної модернізації:

$$H_{eco-digital} = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - F_i) \times L_i}{R_i}, \quad (6)$$

де: $H_{eco-digital}$ – коефіцієнт економічної доцільності цифровізації, C_i – очікувані вигоди, F_i – потенційні збитки без цифровізації, L_i – вагомість напряму, R_i – обсяг інвестицій.

Дана формула демонструє, що економічна ефективність цифрової інтеграції визначається не лише прибутковістю, а й масштабом уникнутих екологічних втрат.

Для візуального відображення структури інтеграції доцільно представити аналітичний рисунок.

Інтеграція цифрових технологій у систему превентивного управління екологічними ризиками є складним багаторівневим процесом, що вимагає одночасного поєднання технологічних, організаційних, фінансових та стратегічних рішень. Системний підхід дозволяє підприємствам не лише підвищити рівень екологічної безпеки, але й забезпечити економічну результативність, ресурсну ефективність, ESG–відповідність та довгострокову стійкість. Саме організаційно–економічні механізми виступають фундаментом ефективної цифрово–екологічної трансформації сучасних підприємств.

Після формування організаційно–економічної основи цифрової екологічної інтеграції виникає необхідність кількісного визначення її реальної результативності. Саме системна оцінка ефективності впроваджених цифрових механізмів дозволяє встановити їх стратегічну доцільність, рівень екологічного впливу та економічну виправданість у структурі сталого розвитку підприємства.

Оцінка ефективності цифрових систем моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками є одним із ключових етапів формування сучасної моделі сталого розвитку підприємств. Саме результативність цифрової екологічної трансформації визначає доцільність інвестицій у

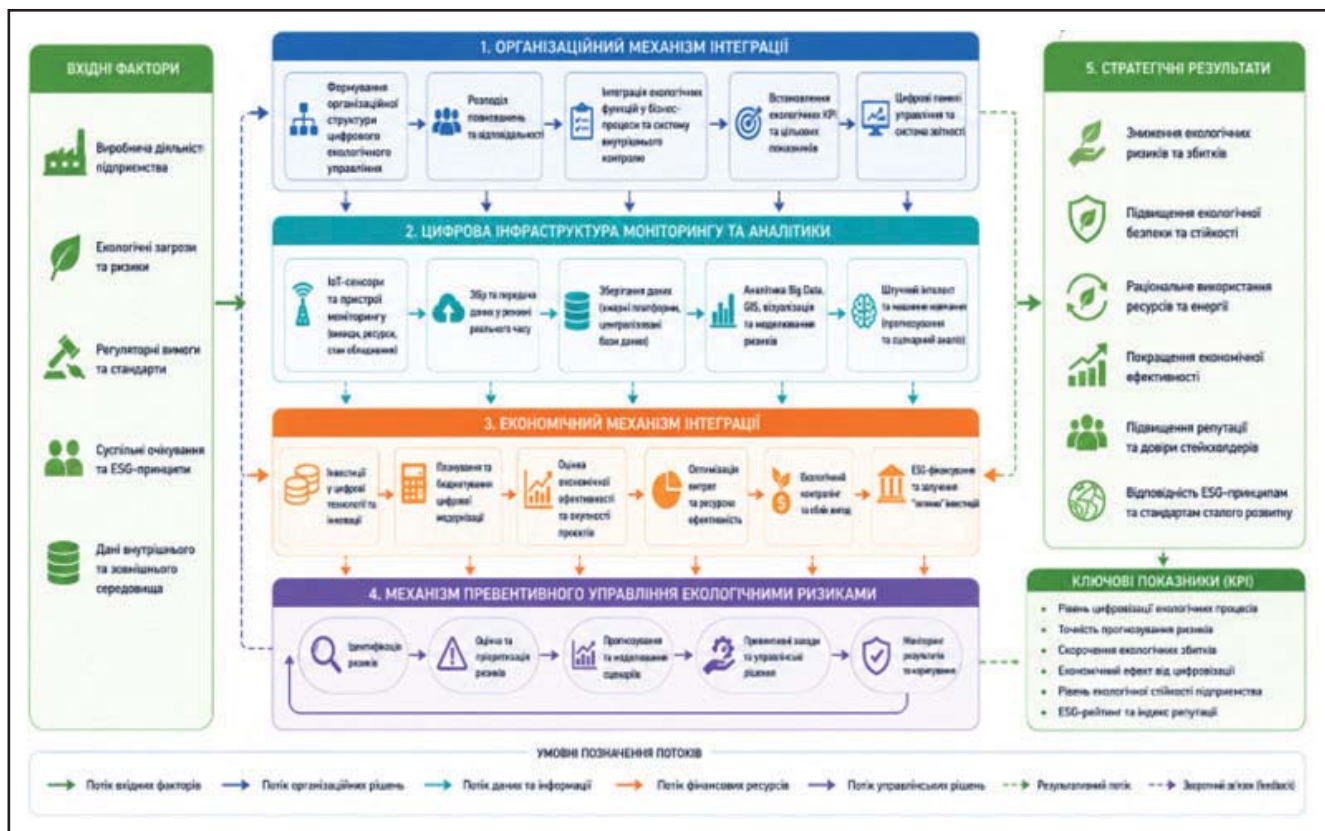


Рисунок 3. Структурно-аналітична модель організаційно-економічної інтеграції цифрових технологій у систему превентивного управління екологічними ризиками підприємства

Джерело: розроблено автором на основі [6]

цифрові технології, рівень їх впливу на екологічну безпеку, економічну стійкість, ресурсну ефективність та стратегічну конкурентоспроможність підприємства. Для сучасних підприємств важливо оцінювати цифрові екологічні системи не лише з технічної точки зору, а як комплексний управлінський механізм, здатний забезпечувати довгострокову стабільність та превентивний контроль ризиків [10].

Ефективність цифрових екологічних систем доцільно розглядати через багатокomпонентну модель, яка охоплює: точність моніторингу, швидкість реагування, рівень прогнозування, масштаб зниження ризиків, економічний ефект, ресурсну оптимізацію, ESG-відповідність та стратегічну стійкість [7].

Першим ключовим показником є інтегральна результативність цифрової системи моніторингу:

$$F_{sys} = \int_n^0 \frac{G+R+L+B}{C}, \quad (7)$$

де: F_{sys} — загальна ефективність цифрової системи, G — точність моніторингу, R — ефективність прогнозування, L — рівень зниження ризиків, B — стратегічна стійкість, C — загальні витрати.

Ця формула дозволяє комплексно оцінити, наскільки цифрова система забезпечує екологічну та економічну результативність.

Другим важливим показником виступає коефіцієнт превентивної екологічної ефективності:

$$P_{prevent} = \frac{D_{avoided}}{V_{digital} + N_{cost}}, \quad (8)$$

де: $P_{prevent}$ — коефіцієнт превентивної ефективності, $D_{avoided}$ — обсяг уникнутих екологічних збитків, $V_{digital}$ — інвестиції у цифровізацію, N_{cost} — операційні витрати.

Даний показник демонструє реальну економічну доцільність цифрової екологічної модернізації [8].

Для систематизації критеріїв оцінки доцільно представити таблицю 2.

Наведена таблиця демонструє, що оцінка ефективності цифрових систем повинна враховувати як екологічні, так і фінансово-стратегічні результати.

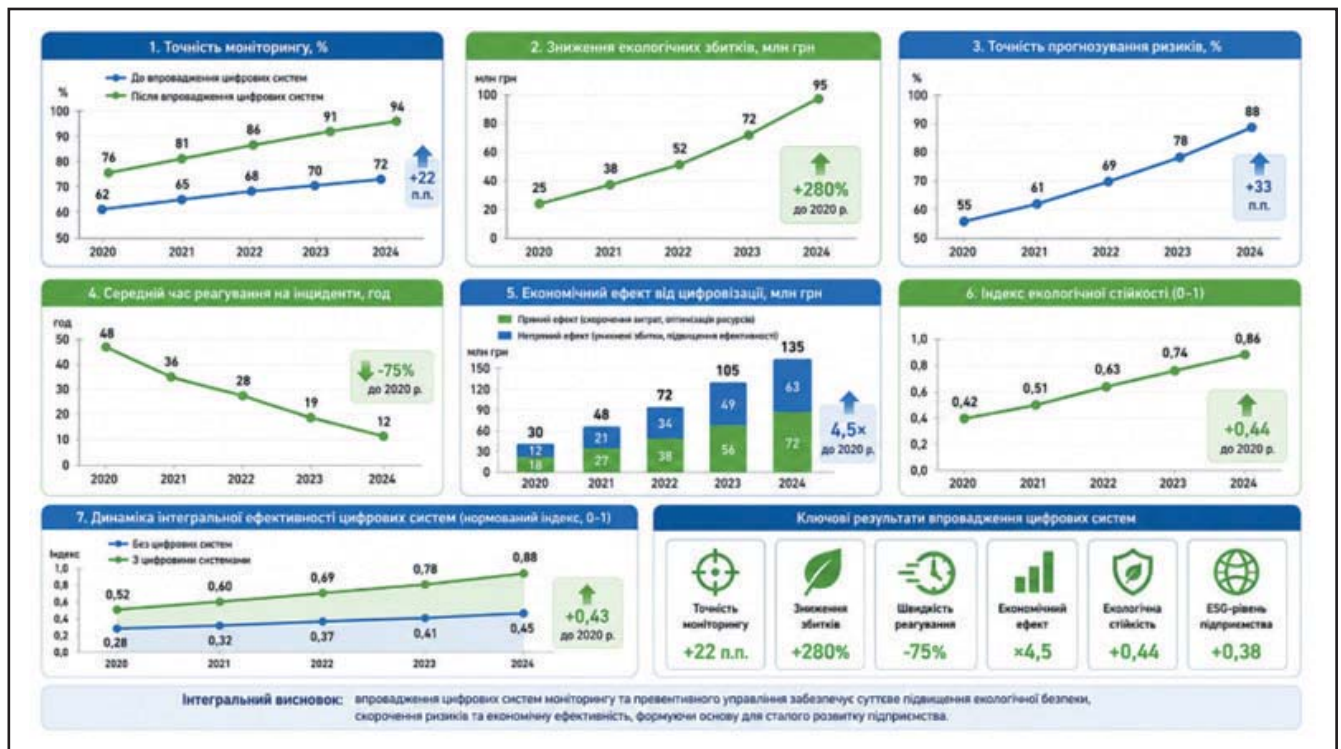
Для візуального аналізу доцільно побудувати аналітичний рисунок 4.

Аналітична модель повинна демонструвати, що найбільший ефект цифрових систем формується завдяки синергії між технологічною точністю,

Таблиця 2. Основні критерії оцінки ефективності цифрових систем моніторингу екологічних ризиків

Критерій	Характеристика	Стратегічний ефект
Точність моніторингу	Якість виявлення загроз	Зниження помилок
Швидкість реагування	Оперативність управління	Превенція ризиків
Прогнозна точність	Якість сценарного аналізу	Стратегічне планування
Зниження екологічних збитків	Уникнення втрат	Економічна ефективність
Оптимізація ресурсів	Раціональне використання ресурсів	Скорочення витрат
ESG-відповідність	Репутаційна ефективність	Інвестиційна привабливість
Стратегічна стійкість	Довгострокова адаптивність	Конкурентні переваги

Джерело: розроблено автором на основі [8]

**Рисунок 4. Комплексна аналітична оцінка ефективності цифрових систем моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками підприємства**

Джерело: розроблено автором на основі [8]

управлінською адаптивністю та економічною результативністю [9].

Отже, оцінка ефективності цифрових систем моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками повинна здійснюватися на основі комплексного системного підходу. Використання інтегральних моделей дозволяє підприємствам визначати не лише технічну результативність цифрових рішень, але й їх стратегічний внесок у формування сталого розвитку, екологічної безпеки, ресурсної ефективності та довгострокової конкурентоспроможності. Саме така модель забезпечує перехід підприємств до сучасної цифрово-екологічної системи управління нового покоління.

Висновок

Проведене дослідження підтверджує, що інтеграція цифрових технологій моніторингу та превентивного управління екологічними ризиками є ключовим напрямом трансформації системи сталого розвитку сучасних підприємств. У роботі обґрунтовано, що екологічні ризики набувають статусу стратегічного фактору, який визначає не лише рівень екологічної безпеки, але й економічну ефективність, інвестиційну привабливість та довгострокову конкурентоспроможність підприємства. Встановлено, що традиційні підходи до екологічного контролю, які базуються на реактивних механізмах, є недостатніми в умовах зростання складності виробничих процесів та динамічності зовнішнього середовища.

ІННОВАЦІЙНО–ІНВЕСТИЦІЙНА ПОЛІТИКА

У межах дослідження доведено, що цифрові технології, зокрема IoT, Big Data, GIS, штучний інтелект та автоматизовані системи контролю, забезпечують принципово новий рівень моніторингу екологічних ризиків, який характеризується безперервністю, точністю, оперативністю та можливістю прогнозування. Визначено, що найбільш ефективною є інтегрована модель, у якій цифровий моніторинг поєднується з організаційно–економічними механізмами управління, формуючи єдину систему превентивного реагування на екологічні загрози.

Обґрунтовано, що ефективність цифрових екологічних систем визначається не лише технічними параметрами, але й рівнем їх інтеграції у корпоративну систему управління, наявністю адаптивної організаційної структури, економічною доцільністю інвестицій та відповідністю принципам сталого розвитку. Запропоновані аналітичні підходи та моделі дозволяють комплексно оцінювати рівень екологічної стійкості підприємства, ефективність цифрових рішень та їх вплив на зниження ризиків і оптимізацію ресурсного використання.

У результаті дослідження сформовано концептуальну модель інтеграції цифрових технологій у систему превентивного управління екологічними ризиками, яка враховує взаємозв'язок технологічних, організаційних, економічних та стратегічних компонентів. Доведено, що системне впровадження цифрових екологічних технологій забезпечує підвищення точності моніторингу, скорочення екологічних збитків, зростання ефективності управлінських рішень, а також формування стійких конкурентних переваг підприємства.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для розроблення цифрово–екологічних стратегій підприємств, орієнтованих на мінімізацію екологічних ризиків, підвищення ресурсної ефективності, забезпечення ESG–відповідності та досягнення довгострокового сталого розвитку. Узагальнено, що інтеграція цифрових технологій у систему екологічного управління виступає не лише інструментом підвищення екологічної безпеки, але й важливим фактором стратегічної модернізації підприємств у сучасних умовах розвитку економіки.

Список використаних джерел:

1. Wang S., Chen Y. Integrating Environmental Management into the Digital Economy for Sustainable En-

terprise Development. // Journal of Cleaner Production. – 2026. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479726000563>

2. Zhang Y. The Role of Digital Technologies in Advancing Sustainable Development and Environmental Governance. // Sustainability. – 2025. – Vol. 17(19). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/19/8666>

3. OECD. Digital Technologies and the Environment: OECD Digital Economy Outlook 2024. – Paris: OECD Publishing, 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.oecd.org/en/publications/2024/11/oecd-digital-economy-outlook-2024-volume-2_9b2801fc/full-report/digital-technologies-and-the-environment_c0701b0b.html

4. UNCTAD. Digitalization and Environmental Sustainability. // Digital Economy Report 2024. – Geneva: United Nations, 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://unctad.org/system/files/official-document/der2024_ch01_en.pdf

5. Sinitsin A. Digital Platforms for Monitoring and Managing Environmental Risks in Industrial Systems. // BIO Web of Conferences. – 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/59/bioconf_sdea2024_03005.pdf

6. Styrmer M., Nussbaumer J., Stцckli P. Security Implications of Digitalization and Sustainable Management of Environmental Data. – 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2107.01662>

7. Hba R., Bakkas A., El Manouar A. Eco–Strategy: A New Generation Managerial Model Based on Green IT and CSR. – 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1605.03107>

8. Hilty L.M., Aebischer B. ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. – Cham: Springer, 2015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-09228-7>

9. Cao F., Li X. Reducing Sustainable Supply Chain Risks: A Digital ESG–Based Framework. // Carbon Footprints. – 2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.oaepublish.com/articles/ces.2025.35>

10. Чуприна Ю. А. Система когнітивно–інтеграційного моделювання організації будівництва : монографія / Ю. А. Чуприна ; Київ. нац. ун–т буд–ва і архіт. – Київ : Сердюк В. Л., 2026. – 366 с. – Режим доступу: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/19275>.

11. Чуприна Ю. А. Концептуалізація мультипроектної діяльності в будівельному секторі / Ю. А. Чупри-

на, М. О. Ползіков, Р. О. Оксенчук, В. О. Алексеєнко // Формування ринкових відносин в Україні. – 2025. – № 9(292). – Режим доступу: <https://journal.dndiime.org.ua/index.php/journal/article/view/144/126>.

References:

1. Wang S., Chen Y. Integrating Environmental Management into the Digital Economy for Sustainable Enterprise Development. // Journal of Cleaner Production. – 2026. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479726000563>

2. Zhang Y. The Role of Digital Technologies in Advancing Sustainable Development and Environmental Governance. // Sustainability. – 2025. – Vol. 17(19). [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/19/8666>

3. OECD. Digital Technologies and the Environment: OECD Digital Economy Outlook 2024. – Paris: OECD Publishing, 2024. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: https://www.oecd.org/en/publications/2024/11/oecd-digital-economy-outlook-2024-volume-2_9b2801fc/full-report/digital-technologies-and-the-environment_c0701b0b.html

4. UNCTAD. Digitalization and Environmental Sustainability. // Digital Economy Report 2024. – Geneva: United Nations, 2024. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: https://unctad.org/system/files/official-document/der2024_ch01_en.pdf

5. Sinitsin A. Digital Platforms for Monitoring and Managing Environmental Risks in Industrial Systems. // BIO Web of Conferences. – 2024. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/59/bioconf_sdea2024_03005.pdf

6. Styrmer M., Nussbaumer J., Stцckli P. Security Implications of Digitalization and Sustainable Management of Environmental Data. – 2021. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://arxiv.org/abs/2107.01662>

7. Hba R., Bakkas A., El Manouar A. Eco-Strategy: A New Generation Managerial Model Based on Green

IT and CSR. – 2016. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://arxiv.org/abs/1605.03107>

8. Hilty L. M., Aebischer B. ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. – Cham: Springer, 2015. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-09228-7>

9. Cao F., Li X. Reducing Sustainable Supply Chain Risks: A Digital ESG-Based Framework. // Carbon Footprints. – 2025. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.oaepublish.com/articles/ces.2025.35>

10. Chupryna Yu. A. Systema kohnityvno-intehratsiynoho modelyuvannya orhanizatsiyi budivnytstva : monohrafiya / Yu. A. Chupryna ; Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhvit. – Kyiv : Serdyuk V. L., 2026. – 366 s. – Rezhym dostupu: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/19275>.

11. Chupryna Yu. A. Kontseptualizatsiya mul'typroyektynoi diyal'nosti v budivel'nomu sektori / Yu. A. Chupryna, M. O. Polzikov, R. O. Oksenchuk, V. O. Aleksyeyenko // Formuvannya rynkovykh vidnosyn v Ukrayini. – 2025. – № 9(292). – Rezhym dostupu: <https://journal.dndiime.org.ua/index.php/journal/article/view/144/126>.

Дані про автора

Ніколайко Дмитро Миколайович,

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID:<https://orcid.org/0009-0001-4118-442X>
e-mail: greenfuelua@gmail.com

Data about the author:

Dmytro Nikolayko,

Postgraduate Student of Kyiv National University of Construction and Architecture

e-mail: greenfuelua@gmail.com

Надходження статті до редакції 09.04.2026

Прийнято до друку 23.04.2026

Опубліковано 30.03.2026