

УДК 338.1:330.342

DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.76-22>**Нагара М.Б.**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри міжнародного туризму і готельного бізнесу  
*Західноукраїнський національний університет*

**Nahara Maryna**

Candidate of Economic Sciences, Docent,  
Associate Professor at the Department of  
International Tourism and Hotel Business  
*West Ukrainian National University*

## СИНЕРГІЯ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ТА ЦИРКУЛЯРНОСТІ В СУЧАСНІЙ ЕКОНОМІЧНІЙ СИСТЕМІ: СТРАТЕГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ РЕАЛІЗАЦІЇ

## SYNERGY OF DIGITALIZATION AND CIRCULARITY IN THE MODERN ECONOMIC SYSTEM: STRATEGIC ASPECTS AND IMPLEMENTATION TOOLS

Дослідження висвітлює концептуальні та прикладні аспекти цифрової циркулярної економіки. Розглянуто еволюцію цієї концепції як окремого напрямку. Систематизовано підходи вітчизняних і закордонних науковців до визначення концепції "цифрова циркулярна економіка", її ключових положень та застосування на різних рівнях економічної системи. Запропоновано авторське трактування даного поняття. Виявлено, що ефективне впровадження принципів цифрової циркулярної економіки базується на синергії цифрових, економічних та еколого-соціальних факторів розвитку з урахуванням інтересів екосистем та суспільства в цілому. Розроблено синергетичну модель взаємодії процесів циркуляризації та цифрової економіки, яка демонструє комплексний вплив цих процесів на економічну систему. Здійснено систематизацію інструментарію цифрової трансформації в контексті реалізації принципів циркулярної економіки.

**Ключові слова:** цифрова циркулярна економіка, екосистема, трансформація, інтеграція, бізнес-модель, оптимізація.

The study covers both the conceptual and applied aspects of the digital circular economy. It examines the evolution of this concept as a distinct field. The study also systematizes the approaches of domestic and foreign scholars to defining the concept of the "digital circular economy", its key provisions, and its application at various levels of the economic system. The author's own interpretation of this concept is proposed. It has been found that the effective implementation of the principles of the digital circular economy is based on the synergy of digital, economic, environmental, and social development factors, taking into account the interests of ecosystems and society as a whole. It is substantiated that the structural components of the digital circular economy are interdependent and complementary, providing a holistic approach to the transformation of economic processes. Their integrated implementation helps achieve a balance between economic growth, efficient use of resources, and the reduction of anthropogenic pressure on ecosystems, which is a key goal of sustainable development in the digital age. It has been found that the digital circular economy relies on the latest information and communication technologies to optimize production, consumption, and recycling processes. This contributes to economic, social, and environmental sustainability while reducing negative environmental impacts. A synergistic model of interaction between circularization processes and the digital economy is developed, demonstrating the complex impact of these processes on the economic system. The tools for digital transformation in the context of implementing the principles of the circular economy are systematized. It has been established that digital transformation tools provide effective data collection, analysis, and exchange, optimize resource flows, increase supply chain transparency, and promote innovative business models. It is substantiated that the integration of digital solutions into circular business models creates a synergistic effect, increasing the efficiency of resource use and reducing the negative impact on the environment.

**Key words:** digital circular economy, ecosystem, transformation, integration, business model, optimization.

**Постановка проблеми.** Імплементція принципів циркулярної економіки в операційну діяльність суб'єктів господарювання набуває дедалі більшої актуальності та стає імперативом сучасного бізнес-середовища. Ця тенденція зумовлена комплексом факторів, серед яких варто виокремити: ескалацію глобальних екологічних викликів, підвищення рівня екологічної свідомості економічних суб'єктів та зростаючу прихильність до концепції сталого розвитку в світовому масштабі. Інтеграція циркулярних моделей у бізнес-процеси підприємств постає не лише як стратегічна ініціатива, але й як необхідна умова забезпечення довгострокової конкурентоспроможності в контексті зміни парадигми економічного розвитку. Крім того, прогрес у сфері цифрових технологій також сприяє інтенсифікації впровадження засад циркулярної економіки у різновекторні бізнес-процеси. Синергія цих двох тенденцій призводить до мінімізації негативного екологічного впливу, спричиненого прискореним розвитком промисловості та глобалізаційними трансформаціями.

Зважаючи на те, що цифрова циркулярна економіка спрямована на трансформацію бізнес-процесів з метою оптимізації використання ресурсів та мінімізації відходів через застосування інноваційних цифрових технологій у таких сферах, як повторне використання, модернізація, реконструкція та рециклінг, дослідження сутності та перспектив розвитку цієї концепції набуває особливої актуальності. Інтеграція цифрових інструментів у циркулярні моделі створює новий фреймворк економічної діяльності, який поєднує екологічну стійкість з технологічною ефективністю, що робить вивчення цієї теми надзвичайно важливим для сучасної економічної науки та практики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні засади цифрової циркулярної економіки як прогресивної парадигми трансформації соціально-економічних систем, що інтегрує принципи сталого розвитку з можливостями цифрових технологій, ґрунтовно висвітлено в наукових доробках широкого кола дослідників. Зокрема, К. Вулгарідіс проаналізував специфіку інтеграції технологій Інтернету речей (IoT) у парадигму цифрової циркулярної економіки [9]. Питання розвитку цифрового потенціалу як внутрішнього ресурсу циркулярної економіки розглядається у працях Н.М. Кумар, Чопра та К. Елсворт-Кребс [6]. Ключові фактори цифрової трансформації в інтелектуальну циркулярну економіку стали об'єктом досліджень П. Фрага-Ламас, С. І. Лопес та Т. М. Фернандес-Карамеш [3]. Проте, незважаючи на вагомий внесок вищезгаданих науковців, окремі аспекти цифрової циркулярної економіки залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема, подальшого вивчення потребує модель взаємодії процесів циркуляризації та цифрової трансформації економіки.

**Формулювання цілей статті.** З огляду на зазначене, метою статті є дослідження теоретичних і прикладних аспектів цифрової циркулярної економіки. Для досягнення мети вирішено такі завдання: ідентифіковано категоріальний зміст цифрової циркулярної економіки; запропоновано синергетичну модель цифрової циркулярної економіки; обґрунтовано інструменти цифровізації циркулярної економіки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналіз репозиторіїв наукових праць дає змогу стверджувати

про наявність трьох провідних трендів у дослідженнях на період 2022–2023 років. Перший напрям досліджень пов'язаний з концепцією Індустрії 4.0 – прогресивним втіленням четвертої промислової революції. Вона базується на процесах цифровізації, цифрової трансформації та цифрового розвитку всіх секторів економіки. Цифровізація, що ґрунтується на передових промислових технологіях (зокрема, цифрових, таких як штучний інтелект (ШІ), машинне навчання (МН), Інтернет речей (IoT), блокчейн), уможливило суттєве скорочення транзакційних витрат та зумовлює значне зростання продуктивності й ефективності економічних процесів.

Другий визначальний тренд фокусується на дослідженні аксіологічних аспектів людського буття, зокрема цінності, тривалості, благополуччя та якості життя, спираючись на принципи антропоцентризму.

Третій напрям досліджень охоплює проблематику протидії кліматичним змінам та забезпечення сталого розвитку через трансформацію лінійної економічної моделі у циркулярну. Цей напрям також включає вивчення ESG-розвитку та еволюцію концепції четвертої інноваційної спіралі до п'ятірної шляхом інтеграції екологічного виміру. Сукупність цих аспектів спрямована на зниження антропогенного навантаження на планету.

Синергія першого та другого напрямів досліджень породжує концепцію Індустрії 5.0, яка, на відміну від Індустрії 4.0, зосереджується не лише на підвищенні продуктивності та ефективності процесів, а й на людиноцентричному підході, що надає їй більшої аксіологічної значущості. На перетині першого та третього напрямів формується парадигма цифрової циркулярної економіки. Обидві моделі - цифрова та циркулярна економіки - сприяють посиленню резильєнтності економічної системи. Таким чином, технологічні інновації Індустрії 4.0 та 5.0 мають потенціал стати стимуляторами стратегічної трансформації від лінійної економічної моделі до циркулярної економіки замкнутого циклу, сприяючи ефективній елімінації, регенерації та рециклінгу відходів.

У сфері досліджень цифрової циркулярної економіки за кількістю публікацій домінує грецький науковець К. Вулгарідіс, який у 2022 році разом із колегами з Греції та Великої Британії здійснив комплексний систематичний огляд та ґрунтовний аналіз взаємозв'язків між Інтернетом речей (IoT) та цифровою циркулярною економікою. Дослідження охоплювало вивчення бізнес-моделей, архітектур, практичних застосувань та їхніх специфічних характеристик у контексті кругової економіки

Міжнародний колектив дослідників з Китаю та Малайзії під керівництвом Ч. Дж. Ча [1] провів систематизацію та еволюцію процесів і технологій Індустрії 4.0, орієнтованих на принципи циркулярної економіки. Науковці ідентифікували інноваційні компоненти Індустрії 4.0 для обладнання та процесів, пов'язаних з утилізацією відходів у контексті циркулярної економіки, надавши стислу оцінку найбільш значущим з них. Основна мета дослідження полягала у розробці всеохоплюючої наскрізної інтеграції, спрямованої на оптимізацію кожного етапу в ланцюгу управління твердими відходами.

Науковці з Гонконгу, Н.М. Кумар та Ш.С. Чопра [6], обґрунтували потенціал технології блокчейн та

смарт-контрактів у подоланні п'ятьох ключових викликів циркулярної економіки: технологічних, фінансових, інфраструктурних, інституційних та соціальних. Результатом їхньої роботи стала розробка архітектури блокчейну для циркулярної економіки, що сформувало фундамент для подальших досліджень та інновацій у сфері інтеграції блокчейн-технологій у циркулярну економіку.

Норвезький дослідник Ф. Х. Хюїнь різновекторно проаналізував процес формування моделей циркулярного бізнесу в фешн-індустрії, які ґрунуються на цифрових інноваціях [4, с. 879]. У результаті свого дослідження він запропонував три архетипи цифрових моделей циркулярного бізнесу: блокчейн-орієнтовану модель ланцюга поставок, сервіс-орієнтовану модель та модель, що базується на попиті.

К. Еллсворт-Кребс у співпраці з колективом британських науковців сформулювали гіпотезу про потенціал цифрових паспортів та обов'язкової звітності як інструментів для аудиту та стимулювання повторного використання пакування [2, с. 253]. Дослідники припустили, що такий підхід може дати можливість урядовим структурам зосередитися на превентивних заходах та розглядати упаковку як цінний ресурс, а не як матеріал, який має бути утилізованим після короткотермінового одноразового використання. З позиції цих науковців, цифрові технології мають значний потенціал для забезпечення відстеження багаторазового пакування у промислових масштабах.

Міжнародна група дослідників під керівництвом Е. Крістоферсена, що включала науковців з Норвегії та Німеччини, здійснила у 2021 році комплексне дослідження, яке виходило за межі суто технічних аспектів цифровізації циркулярної економіки [5]. Фокус їхньої наукової розвідки був спрямований на аналіз організаційних ресурсів, необхідних для ефективної імплементації цифрових технологій у контексті реалізації принципів циркулярної економіки.

У 2021 році науковці П. Фрага-Ламас, С.І. Лопес та Т.М. Фернандес-Карамеш зосередили свої дослідницькі зусилля на вивченні ролі екологічно орієнтованого Інтернету речей (G-IoT) та периферійного штучного інтелекту (Edge-AI) як ключових технологічних факторів сталого цифрового переходу до інтелектуальної циркулярної економіки в парадигмі Індустрії 5.0 [3]. Дослідники емпірично продемонстрували, що технологія Інтернету речей (IoT) характеризується значним вуглецевим слідом, який зумовлений використанням дефіцитних сировинних ресурсів та високим рівнем енергоспоживання на всіх етапах життєвого циклу – від виробництва через експлуатацію до утилізації. Крім того, вони відзначили, що впровадження периферійного штучного інтелекту (Edge-AI) призводить до додаткового навантаження на енергетичні ресурси. Для вирішення цієї проблеми науковці запропонували інноваційний підхід, що полягає у проектуванні та розробці інтегрованих систем Edge-AI and G-IoT (периферійний штучний інтелект та екологічно орієнтований Інтернет речей).

Слід підкреслити, що фундаментальна структура концепції цифрової циркулярної економіки базується на двох взаємозалежних процесах трансформації: з одного боку, впровадження цифрових технологій у циркулярну економіку, а з іншого – інтеграція прин-

ципів циркулярності в цифрову економіку. Ця дуальна конвергенція створює інноваційну синергетичну модель, що поєднує ефективність замкнених циклів з потенціалом цифровізації (рис. 1).

Як видно з рис. 1, цифрова циркулярна економіка є синтезом принципів циркулярності та цифрових інновацій. Структурні компоненти цифрової циркулярної економіки є взаємозалежними та взаємодоповнюючими, що забезпечує цілісний підхід до трансформації економічних процесів. Їх комплексне впровадження дозволяє досягти балансу між економічним зростанням, ефективним використанням ресурсів та зниженням антропогенного тиску на екосистеми, що є ключовою метою сталого розвитку в епоху цифровізації.

Узагальнення змісту наукових праць з питань циркулярної економіки, систематизація понятійного апарату цифровізації дали змогу запропонувати власне визначення комплексного поняття. На наш погляд, цифрова циркулярна економіка – це прогресивна економічна парадигма, що синтезує концепції замкнених ресурсних циклів з інноваційними цифровими рішеннями, створюючи інтелектуальну екосистему для ефективного управління матеріальними та енергетичними потоками. Ця система базується на використанні новітніх інформаційно-комунікаційних технологій для оптимізації процесів виробництва, споживання та утилізації, сприяючи досягненню економічної, соціальної та екологічної стійкості при одночасному зниженні негативного впливу на навколишнє середовище.

З метою стратегічного розвитку та масштабування циркулярної економіки критично важливою є інтеграція прогресивних цифрових рішень, зокрема Інтернету речей (IoT), технологій обробки великих даних (Big Data) з використанням машинного навчання (ML), а також систем штучного інтелекту (AI) у циркулярні бізнес-стратегії та операційні процеси.

Для дослідження взаємозв'язку між цифровою трансформацією (DT) та формуванням циркулярної економіки (CE), а також потенційного впливу циркулярності на процеси цифрової трансформації, можна застосувати економетричну модель, запропоновану Х. Нхамом. Ця модель представлена формулою [8]:

$$CE_{it} = \beta_0 + \beta_1 DT_{i,t} + \beta_2 EG_{i,t} + \beta_3 TS_{i,t} + \beta_4 FDI_{i,t} + \beta_5 FPI_{i,t} + \beta_6 NR_{i,t} + \beta_7 DM_{i,t} + \varphi_i + \omega_i + \varepsilon_{i,j,t} \quad (1)$$

де:

EG: економічне зростання, виражене показником ВВП на душу населення;

TS: частка торгівлі у відсотках від ВВП;

FDI: чистий приплив прямих іноземних інвестицій у відсотках від ВВП;

EPI: індекс екологічної ефективності за шкалою 0–100 (0 – найгірші, 100 – найкращі показники);

NR: природна рента як частка суми рент від вугілля, корисних копалин, природного газу та лісових ресурсів у ВВП (%);

DM: рівень демократизації, вимірний відповідним індексом.

Індекси  $i$  та  $t$  позначають економічну систему та рік відповідно.  $\varphi_i$  і  $\omega_i$  – це фіксовані ефекти системи та року, а  $\varepsilon_{ijt}$  – член помилки моделі.

Емпіричний аналіз, проведений групою вчених на чолі з Х. Нхамом, виявив комплексний характер взаємозв'язку між процесами цифровізації та форму-

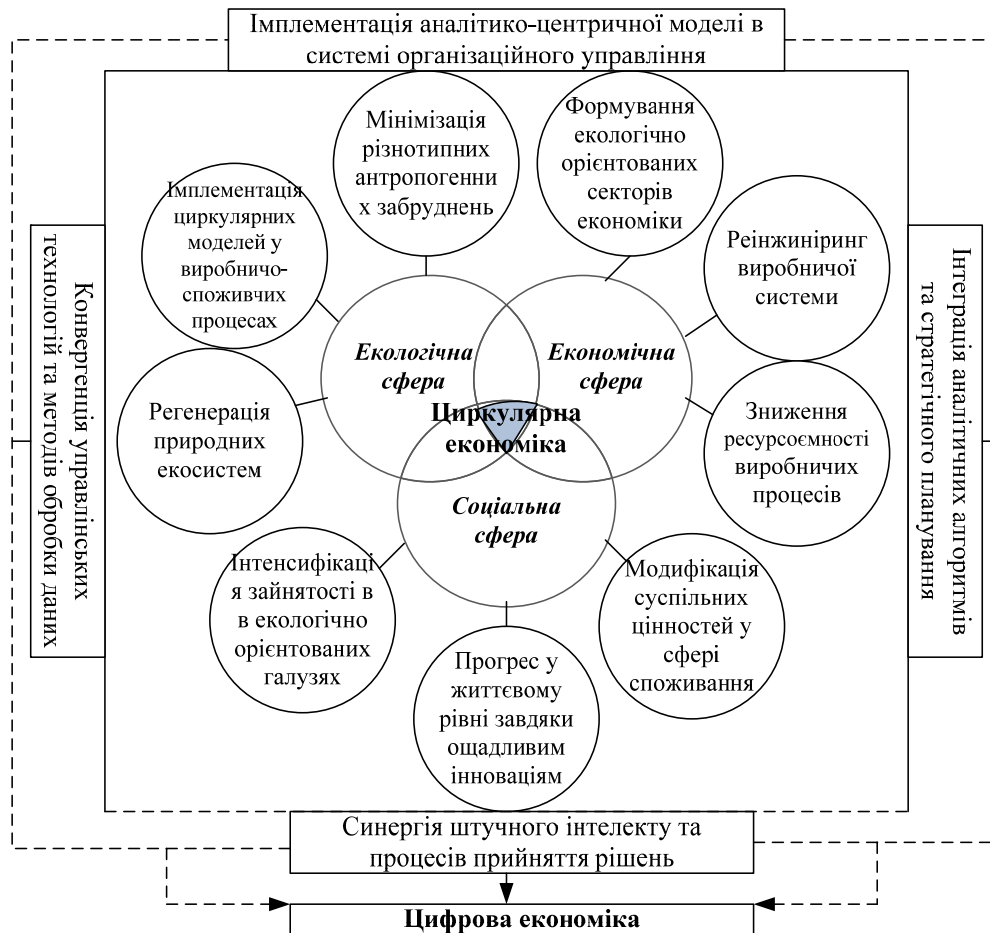


Рис. 1. Синергетична модель цифрової циркулярної економіки

Джерело: побудовано автором

ванням циркулярної економіки [8]. Результати дослідження продемонстрували, що цифрова трансформація сприяє переходу економічних систем до циркулярної моделі. Проте, парадоксальним чином, надмірна інтенсифікація цифровізації може створювати бар'єри для цього процесу. Найбільш значущим відкриттям стало виявлення нелінійної залежності між рівнем цифровізації та ступенем циркулярності економіки. Ця залежність характеризується наявністю певного рівня, після досягнення якого вплив цифровізації на циркулярність економіки стає позитивним. Така нелінійність вказує на необхідність збалансованого підходу до впровадження цифрових технологій для оптимізації їх впливу на розвиток циркулярної економіки.

Інструментарій цифрової циркулярної економіки складається з комплексу взаємопов'язаних елементів, які забезпечують її функціонування та розвиток. До ключових компонентів цього інструментарію належать:

- інтеграційні та конвергентні стратегії, що визначають напрямки синергії цифрових та циркулярних підходів;
- інноваційні бізнес-моделі та фреймворки, адаптовані до принципів циркулярності та цифровізації;
- передові технологічні рішення, що підтримують циркулярні процеси в цифровому середовищі;

– спеціалізовані архітектурні додатки, розроблені для оптимізації ресурсних потоків та інформаційного обміну в контексті цифрової циркулярної економіки.

Концептуальним фреймворком для структурування та аналізу процесів цифрової циркулярної економіки може бути модель ReSOLVE. Ця модель була вперше представлена у 2015 році як результат колаборації між Фондом Еллен Макартур (Ellen MacArthur Foundation, EMF), компанією Sun та консалтинговою фірмою McKinsey [7]. Бізнес-модель ReSOLVE пропонує комплексний підхід до впровадження принципів циркулярності в економічні системи, виділяючи шість ключових стратегічних напрямків:

1. Регенерація (Regenerate): відновлення та підтримка природних екосистем і ресурсів.
2. Спільне використання (Share): максимізація ефективності використання активів через їх спільне споживання.
3. Оптимізація (Optimize): підвищення продуктивності та ефективності продуктів і процесів.
4. Замкнений цикл (Loop): підтримка продуктів та матеріалів у замкнених виробничих циклах.
5. Віртуалізація (Virtualize): заміна фізичних продуктів і процесів цифровими аналогами.
6. Обмін (Exchange): впровадження нових технологій, матеріалів і процесів, які підтримують циркулярність.

Структурована модель ReSOLVE забезпечує систематичний підхід до трансформації лінійних економічних моделей у циркулярні, інтегруючи принципи сталого розвитку з інноваційними бізнес-стратегіями.

Наявна база емпіричних та теоретичних досліджень цифрової циркулярної економіки зосереджується на вивченні потенціалу передових цифрових технологій як ключових інструментів для реалізації концепції виробництва з нульовим рівнем викидів у контексті економіки замкнутого циклу. Особлива увага приділяється наступним технологічним напрямкам: штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT), машинне навчання (ML), блокчейн-технології, цифрові паспорти продуктів, системи інтерактивної візуалізації. Ці інноваційні інструменти розглядаються як чинники трансформації виробничих процесів та бізнес-моделей у напрямку підвищення ресурсоефективності та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Технологічні інструменти цифровізації циркулярної економіки представлено на рис. 2.

Отже, представлені інструменти цифрової трансформації відіграють ключову роль у розвитку та впровадженні принципів циркулярної економіки. Вони забезпечують ефективний збір, аналіз та обмін даними,

оптимізують ресурсні потоки, підвищують прозорість ланцюгів поставок та сприяють інноваційним бізнес-моделям. Інтеграція цих технологій дозволяє суб'єктам господарювання на мікро-, мезо та макrorівнях максимізувати цінність ресурсів, мінімізувати відходи та створювати замкнені цикли виробництва і споживання. Цифрова трансформація є активатором переходу до більш стійкої та ресурсоефективної екосистеми, відкриваючи нові можливості для інновацій, співпраці та сталого розвитку в рамках циркулярної економіки.

**Висновки.** У підсумку, проведені дослідження демонструє глибокий взаємозв'язок між процесами цифровізації та розвитком циркулярної економіки. Цифрові технології виступають потужним каталізатором трансформації лінійних економічних моделей у циркулярні, забезпечуючи інноваційні інструменти для оптимізації ресурсних потоків, мінімізації відходів та подовження життєвого циклу продуктів. Інтеграція цифрових рішень у циркулярні бізнес-моделі створює синергетичний ефект, що сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів та зниженню негативного впливу на довкілля. Цифрові платформи, технології великих даних та штучного інтелекту відкривають нові можливості для прогнозування попиту, оптимізації логістичних проце-



Рис. 2. Інструменти цифрової трансформації у циркулярній економіці

Джерело: побудовано автором

сів та впровадження інновацій, що є ключовими аспектами циркулярної економіки. Водночас, варто зазначити, що повна реалізація потенціалу цифровізації в контексті циркулярної економіки все ще стикається з викликами, пов'язаними з цифровим розривом, кібербезпекою та етичними аспектами використання даних. Ці питання потребують подальшого вивчення та вирішення. Загалом, симбіоз цифровізації та циркулярної економіки

створює міцне підґрунтя для сталого розвитку, відкриваючи шлях до більш ефективного, ресурсощадного та екологічно відповідального економічного зростання. Подальші дослідження в цій галузі мають зосередитися на розробці інтегрованих підходів до впровадження цифрових технологій у циркулярні бізнес-моделі та аналізі довгострокових соціально-економічних та екологічних наслідків цієї інтеграції.

#### Список використаних джерел:

1. Cheah C.G., Chia W.Y., Lai S.F. Innovation Designs of Industry 4.0 Based Solid Waste Management: Machinery and Digital Circular Economy. *Environmental Research*. 2022. № 213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619>
2. Ellsworth-Krebs K., Rampen C., Rogers E. Circular Economy Infrastructure: Why We Need Track and Trace for Reusable Packaging. *Sustainable Production and Consumption*. 2022. № 29(3). P. 249–258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.007>
3. Fraga-Lamas P., Lopes S.I., Fernandez-Carames T.M. Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*. 2021. Vol. 21. № 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21175745>
4. Huynh P.H. Enabling Circular Business Models in the Fashion Industry: The Role of Digital Innovation. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2021. Vol. 71(3). P. 870–895. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0683>
5. Kristoffersen E., Mikalef P., Blomsma F. Towards a Business Analytics Capability for the Circular Economy. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. № 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120957>
6. Kumar N.M., Chopra S.S. Leveraging Blockchain and Smart Contract Technologies to Overcome Circular Economy Implementation Challenges. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159492>
7. MacArthur E., Zumwinkel K., Stuchtey M.R. Growth Within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Ellen MacArthur Foundation. 2015. URL: <https://www.mckinsey.com/businessfunctions/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe> (дата звернення: 27.07 2024).
8. Nham N., Thi N. Making the Circular Economy Digital or the Digital Economy Circular? Empirical Evidence from the European Region. *Technology in Society*. 2022. № 70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102023>
9. Voulgaridis K., Lagkas T., Sarigiannidis P. Towards Industry 5.0 and Digital Circular Economy: Current Research and Application Trends. *18th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE. 2022. P. 153–158. DOI: <https://doi.org/10.1109/DCOSS54816.2022.00037>