

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.36622/VSTU.2022.30.4.001

УДК 338.1+338.24

ЦИФРОВАЯ ЦИРКУЛЯРНАЯ ЭКОНОМИКА: КОНЦЕПЦИЯ, МОДЕЛЬ, СТРАТЕГИИ, ФРЕЙМВОРК, ТЕХНОЛОГИИ

Е.В. Шкарупета

Воронежский государственный технический университет
Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России
Россия, 662972, Красноярский край, Железногорск, ул. Северная, 1

Е.А. Ильина

Воронежский государственный технический университет
Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Введение. В Российской Федерации национальная программа «Цифровая экономика» реализуется с 2017 года, а с 2022 года стартовал федеральный проект по переходу на экономику замкнутого цикла, циркулярную экономику. Таким образом, исследовательский интерес представляет ковариация цифрового и циркулярного развития, так называемая цифровая циркулярная экономика. В статье предпринята попытка концептуально оформить цифровую циркулярную экономику.

Данные и методы. Методология исследования сформирована на основе методов научного познания анализа и синтеза путем объединения фактов, извлеченных из научных трудов с помощью соответствующих приемов, методе кластеризации, наукометрическом инструментарии исследовательской аналитики. Основным методом написания работы выступает систематический обзор литературы на основе стандартизированного восьмиступенчатого руководства по самостоятельному систематическому обзору литературы и управления исследовательскими данными в соответствии с принципами FAIR (находимостью, доступностью, взаимодействием и повторным использованием).

Полученные результаты. В статье предложено авторское видение цифровой циркулярной экономики; доказана гипотеза о наличии зависимости между цифровизацией и циркулярностью на основе математической модели, позволяющей оценить, способна ли цифровая трансформация создать циркулярную экономику, или же циркулярность способствует процессу цифровой трансформации. В качестве инструментария цифровой циркулярной экономики рассмотрены стратегии, бизнес-модели, фреймворки, технологии и архитектуры. Сделан вывод, что цифровая циркулярная экономика строится на комбинации интернета вещей, больших данных и машинного обучения, искусственного интеллекта и блокчейна, способствующей устойчивости и росту в соответствии с принципами циркулярности.

Заключение. Представленные разработки позволяют сформировать ряд рекомендаций по внедрению цифровой циркулярной экономики в условиях перехода к Индустрии 5.0 с целью создания производства с нулевыми выбросами и экономики замкнутого цикла.

Сведения об авторах:

Шкарупета Елена Витальевна (9056591561@mail.ru), д-р экон. наук, профессор кафедры цифровой и отраслевой экономики; старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-технического центра
Ильина Екатерина Алексеевна (Catrin.ilina@gmail.com), специалист отдела стратегического планирования и анализа управления стратегического развития

On authors:

Shkarupeta Elena V. (9056591561@mail.ru), Doctor of Economics, Professor of the Department of Digital and Industrial Economics; Senior Researcher of the Research Department of the Scientific and Technical Center
Ilyina Ekaterina A. (Catrin.ilina@gmail.com), Specialist of Strategic Planning and Analysis Department of Strategic Development Department

Ключевые слова: циркулярная цифровая экономика, экономика замкнутого цикла, круговая экономика, цикличная экономика, циклическая экономика, ReSOLVE

Для цитирования:

Шкарупета Е.В. Цифровая циркулярная экономика: концепция, модель, стратегии, фреймворк, технологии / Е.В. Шкарупета, Е.А. Ильина // Организатор производства. 2022. Т.30. № 4. С. 9-17. DOI: 10.36622/VSTU.2022.30.4.001

DIGITAL CIRCULAR ECONOMY: CONCEPT, MODEL, STRATEGIES, FRAMEWORK, TECHNOLOGIES

E.V. Shkarupeta

*Voronezh State Technical University
84 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006, Russia
Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia
1 Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russia*

I.A. Ilyina

*Voronezh State Technical University
84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006, Russia*

Introduction. *In the Russian Federation, the national program "Digital Economy" has been implemented since 2017, and since 2022 a federal project on the transition to a closed-loop economy, the circular economy, has been launched. Thus, of research interest is the covariation of digital and circular development, the so-called digital circular economy. This article attempts to conceptualize the digital circular economy.*

Data and methods. *The methodology of the study is formed on the basis of methods of scientific knowledge analysis and synthesis by combining facts extracted from scientific papers using appropriate techniques, the method of clustering, scientometric tools of research analytics. The basic method of the work is a systematic literature review on the basis of the standardized eight-step guidelines for self-systematic review of the literature and research data management in accordance with the principles of FAIR (findability, accessibility, interaction and reuse).*

Results. *The paper proposes the author's vision of the digital circular economy; it proves the hypothesis of the relationship between digitalization and circularity, based on a mathematical model that allows us to assess whether digital transformation can create a circular economy, or whether circularity contributes to the process of digital transformation. Strategies, business models, frameworks, technologies and architectures are considered as tools of digital circular economy. It is concluded that the digital circular economy is built on a combination of the Internet of Things, big data and machine learning, artificial intelligence and blockchain, contributing to sustainability and growth in accordance with the principles of circularity.*

Conclusion. *The presented developments allow to form a number of recommendations for the implementation of digital circular economy in the transition to Industry 5.0 in order to create a zero-emissions production and closed-loop economy.*

Keywords: *circular digital economy, circular economy, circular economy, cyclical economy, cyclical economy, ReSOLVE*

For citation:

Shkarupeta E.V. Digital circular economy: concept, model, strategies, framework, technologies / E.V. Shkarupeta, E.A. Ilyina // Production Organizer. 2022. Vol. 30. No. 4. Pp. 9-17. DOI: 10.36622/VSTU.2022.30.4.001

Введение

Результаты анализа баз данных научных публикаций позволяют выделить три top-bottom тенденции в исследованиях на 2022-2023 годы:

– первое мейнстрим направление связано с Индустрией 4.0 – эволюционным проявлением четвертой промышленной революции на основе процессов цифровизации, цифровой трансформации, цифрового развития всех отраслей экономики, повышения цифровой зрелости, цифровой готовности [1, 2]. Цифровизация на основе передовых промышленных технологий (сквозных, в том числе и цифровых – искусственного интеллекта (AI), машинного обучения (ML), Интернета вещей (IoT), блокчейна и др.) позволяеткратно сократить транзакционные издержки, влечет на собой значительное приращение производительности и эффективности экономических процессов;

– вторая тенденция связана с основным вниманием к проблеме ценности, продолжительности, благополучия и качества человеческой жизни на основе человекоцентризма и жизнецентризма;

– третья тенденция включает вопросы борьбы с изменениями климата, устойчивого развития на основе перехода от линейной к циркулярной экономике, ESG-развитие [3], расширение четверной инновационной спирали до пятерной путем включения проекции окружающей среды – все то, что позволит сократить планетарную нагрузку в антропоцене.

Конвергенция первого и второго направления рождает Индустрию 5.0 [4, 5] – как более ценностную, чем Индустрия 4.0, концепцию, ориентированную на человека, а не на простое увеличение производительности и эффективности процессов.

На стыке первого и третьего направления возникает цифровая циркулярная экономика. И цифровая, и циркулярная экономика позволяют повысить

устойчивость системы. Кризис, вызванный пандемией COVID-19, показал, что бионические экономические и промышленные системы, характеризующиеся высокой цифровой зрелостью и активно внедряющие цифровые решения, проявили более высокий уровень устойчивости к изменениям внешней среды. Цифровые технологии Индустрий 4.0 и 5.0 могут и должны стать проводником в стратегическом дрейфе на пути от линейной к циркулярной экономике замкнутого цикла, эффективно устраняя, восстанавливая и перерабатывая отходы.

Цель настоящего исследования – сделать концепцию цифровой циркулярной экономики более осязаемой.

Литературный обзор

По состоянию на конец ноября 2022 года поиск в базе Scopus позволил выявить всего 15 публикаций с ключевыми словами «цифровая циркулярная экономика»: 1 – в 2019 году, 1 – в 2020 году, 6 – в 2021 году и 6 – в 2022 году.

Лидером по количеству публикаций, связанных с цифровой циркулярной экономикой, является греческий ученый К. Вулгаридис. В 2022 году К. Вулгаридис и его коллеги из Греции и Великобритании [6] провели систематический обзор и тщательный анализ IoT, цифровой циркулярной экономики и их совместных отношений, изучая бизнес-модели, архитектуры, приложения и их соответствующие особенности. В другом своем исследовании 2022 года К. Вулгаридис с коллегами [7] собрали и рассмотрели последние тенденции в исследованиях и применении моделей Индустрии 5.0 и цифровой циркулярной экономики, изучив их устойчивые характеристики, требования, приложения и архитектуры.

Китайско-малазийская группа ученых под руководством Ч. Дж. Чеа [8] обобщили и оценили процессы и технологии Индустрии 4.0, ориентированные на циркулярную экономику. Ими были определены

инновационные компоненты Индустрии 4.0 для машин и процессов, связанных с утилизацией отходов, которые ориентированы на циркулярную экономику, с краткой оценкой важнейших из них. Цель их работы – создать комплексную сквозную интеграцию, направленную на оптимизацию каждого процесса в цепочке управления твердыми отходами.

Н.М. Кумар и Ш. С. Чопра [9], ученые из Гон Конга, исследовали роль технологии блокчейн смарт-контрактов в преодолении пяти проблем циркулярная экономики (технологических, финансовых, инфраструктурных, институциональных и социальных) и представили разработку архитектуры блокчейн циркулярной экономики, что положило начало исследованиям и разработкам для блокчейнфикации циркулярной экономики.

Норвежский ученый Ф. Х. Хюинь [10] исследовал создание моделей циркулярного бизнеса в индустрии моды на основе цифровых инноваций и представил три архетипа цифровых моделей циркулярного бизнеса: модель цепочки поставок на основе блокчейна, модель на основе услуг и модель, ориентированная на спрос.

К. Элсворт-Кребс с группой ученых из Великобритании [11] провели исследование, в котором предположили, что цифровые паспорта и обязательная отчетность могут стать способом аудита и стимулирования повторного использования упаковки, позволяя правительствам сосредоточиться на профилактике и рассматривать упаковку как актив, а не как неизбежное превращение в

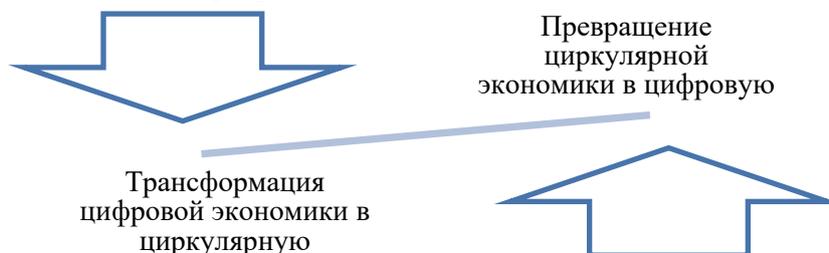
отходы после короткого цикла одноразового использования. Таким образом, с точки зрения данных ученых, цифровые технологии могут быть полезны для поддержки отслеживания многоразовой упаковки в больших масштабах.

Э. Кристофферсен с коллегами из Норвегии и Германии в 2021 году [12] исследовали не просто технические аспекты, а организационных ресурсы и возможности, необходимые для успешного использования цифровых технологий в целях циркулярной экономики.

Зеленый IoT (G-IoT) и периферийный AI (Edge-AI) как ключевые технологические помощники для устойчивого цифрового перехода к умной циркулярной экономике в условиях Индустрии 5.0 стали объектами исследований П. Фрага-Ламас, С.И. Лопеса и Т.М. Фернандесу-Карамешу [13] в 2021 году. Данными учеными показано, что IoT имеет значительный углеродный след из-за использования дефицитного сырья и потребления энергии в процессах производства, эксплуатации и утилизации, а Edge-AI навязывает потребление дополнительной энергии. Решать данную проблему авторы предлагают путем проектирования и разработки систем Edge-AI G-IoT.

Результаты

В общем виде концепция цифровой циркулярной экономики включает в себя два конвергентных процесса: превращение циркулярной экономики в цифровую, а цифровой экономики – в циркулярную (рис. 1).



Источник: разработано авторами

Рис. 1. Концептуальные области цифровой циркулярной экономики

Source: developed by the authors

Figure 1. Conceptual areas of the digital circular economy

Другими словами, цифровая циркулярная экономика – это циркулярная экономика с использованием цифровых технологий. Цифровые технологии обеспечивают основу для развития циркулярных бизнес-моделей. Если мы хотим укрепить и расширить масштабы циркулярной экономики, необходимо и дальше интегрировать цифровые технологии, такие как IoT, большие данные (ML) и AI в существующие подходы циркулярного бизнеса. В более общем плане цифровая трансформация открывает перед промышленностью возможности для построения конкурентоспособных и инновационных бизнес-моделей, основанных на принципах циркулярной экономики [14].

Для изучения того, позволяет ли цифровая трансформация (DT) создать циркулярную экономику (CE), или же циркулярность способствует процессу цифровой трансформации, можно использовать следующую модель [15]:

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

где EG – экономический рост, измеряемый показателем ВВП на душу населения;

TS – доля торговли, процент от ВВП;

FDI – чистый приток прямых иностранных инвестиций, процент от ВВП;

EPI – индекс экологической эффективности, измеряемый по шкале от 0 до 100, где 0 – наихудшие показатели, 100 – наилучшие;

NR – природная рента как доля суммы ренты от угля, ренты от полезных ископаемых, ренты от природного газа и лесной ренты в ВВП (%);

DM – уровень демократизации, измеряемый соответствующим индексом;

i и t используются для обозначения экономической системы i и года t ;

φ_t и ω_i – фиксированные эффекты системы и года;

ε_{ijt} – член ошибки.

Апробация представленной модели была осуществлена в работе [15] по данным Евростата. При этом показатель циркулярности CE измерялся на основе шести различных индикаторов: объема муниципальных отходов, количества патентов на циркулярность, использования циркулярных материалов, уровня переработки отходов, уровня переработки биоотходов и уровня переработки электронных отходов. Для оценки показателя цифровой трансформации DT использовались шесть индикаторов электронной коммерции и электронного бизнеса: онлайн-продажи, продажи электронной коммерции, продажи электронной коммерции в Интернете, оборот электронной коммерции, использование системы управления взаимоотношениями с клиентами и использование облачных технологий. В результате эмпирические расчеты показали, что начальное развитие цифровизации может позволить экономическим системам перейти к циркулярной экономике. Однако чрезмерное развитие цифровизации препятствует этому процессу. Учеными была обнаружена нелинейная зависимость между цифровизацией и циркулярностью, показывающая, что цифровизация может положительно повлиять на уровень циркулярности после достижения определенного уровня [15].

В качестве инструментария цифровой циркулярной экономики выступают интеграционные и конвергентные стратегии, бизнес-модели (фреймворки), технологии, архитектурные приложения.

Стратегии цифровой циркулярной экономики реализуются через разработанную в работе [16] матричную модель, включающую четыре сценария внедрения цифровых технологий в

циркулярную экономику и применению этих технологий для снижения выбросов:

- 1) постепенная цифровизация бизнеса и постепенное достижение нулевого уровня;
- 2) радикальная цифровизация бизнеса, но инкрементные чистые нулевые выгоды;
- 3) постепенная цифровизация бизнеса, но радикальный нулевой выигрыш;
- 4) радикальная цифровизация бизнеса и радикальный чистый нулевой выигрыш.

Фреймворком цифровой циркулярной экономики может стать модель ReSOLVE, впервые предложенная в 2015 году Фондом Эллен Макартур (Ellen MacArthur Foundation, EMF) совместно с Sun и McKinsey [17]. В основу данного фреймворка положена ресурсная революция С. Хека и др. [18]. Бизнес-модель ReSOLVE

определяет шесть различных путей достижения циркулярности:

- 1) **Re** (regenerate) – регенерация;
- 2) **S** (share) – совместное использование;
- 3) **O** (optimize) – оптимизация;
- 4) **L** (loop) – петля;
- 5) **V** (virtualize) – виртуализация;
- 6) **E** (exchange) – обмен

В целом, существующие исследования в области цифровой циркулярной экономики фокусируются на вопросах применений цифровых технологий AI, IoT, ML и блокчейнфикации как инструментов достижения производства с нулевыми выбросами в рамках экономики замкнутого цикла. Технологии цифровой циркулярной экономики представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Технологический инструментарий цифровой циркулярной экономики

Цифровая технология	Примеры использования в циркулярных стратегиях и бизнес-моделях
IoT	Используется для отслеживания данных о жизненном цикле продукции для улучшения ее обслуживания; повышения эффективности переработки с использованием дополнительных данных; решения вопросов управления энергопотреблением и практики устойчивого производства компании; мониторинга состояния продукции; мониторинга состояния автопарка и продукции; сбора данных о фазах использования для информирования о проектировании продукции; сбора данных о жизненном цикле для утилизации на основе данных и принятия решений по реверсивной логистике
ML	Управление «зеленой» цепочкой поставок и оценка воздействия на окружающую среду; профилактическое и предиктивное техническое обслуживание для продления срока службы продукции; повышение энергоэффективности оборудования; анализ поведения потребителей; повышение качества данных и завершение оценки неустойчивости данных; управление запасами, оптимизация перевозок, анализ спроса; управление энергией и операциями, сбор данных о социальной устойчивости, обнаружение знаний в базах данных для повышения эффективности процессов проектирования, производства и обслуживания
AI	Используется для помощи производителям в выборе наилучшего возможного устойчивого поставщика и повышения устойчивости производителя; для оценки воздействия на окружающую среду; установления отслеживаемости в течение жизненного цикла продукта; прогнозирования энергетического и экологического воздействия
Блокчейн	Используется для проверки честных методов работы в производстве; прозрачного учета происхождения/истории продукта; торговли выбросами углерода на основе смарт-контрактов; отслеживания материалов; новых бизнес-моделей

Источник: составлено по материалам [19]

Source: compiled from [19]

Представленные технологии цифровой циркулярной экономики могут интегрироваться в различные архитектуры. Так, Дамиану А., Ангелопулос К. М. и Катос В. [20] предлагают круговую архитектурную модель, объединяющую технологии блокчейн и IoT, поддерживаемую механизмами граничных вычислений. Инфраструктура содержит узлы IoT, установленные в цифровой циркулярной среде, поддерживаемые приложениями блокчейн, которые проверяют сбор, хранение и обмен данными в форме транзакций. Коммуникационные протоколы, используемые в данной архитектуре, – LoRaWAN и SigFox [6].

Заключение

Таким образом, цифровая циркулярная экономика строится на цифровых технологиях (IoT, ML и AI, блокчейне, а также больших данных) и, главным образом, их комбинации, способствующей устойчивости и росту в соответствии с принципами циркулярности. Однако, на взгляд авторов, данные процессы сопряжены с значительными вызовами –предстоящими расходами, связанными с надлежащей подготовкой систем и людей, потребностью в новых устройствах и периодом адаптации к новым циркулярным операциям.

Конвергенция двух концепций – цифровизации и циркулярности – в основном находятся в области применения Индустрии 4.0, при этом включение в процессы развития Индустрии 5.0 пока минимально.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-010-00942 А).

Библиографический список

1. Mahmudova G., Rakhmatullaeva D. Transformation and development of industry in the digital economy //European International Journal of

Multidisciplinary Research and Management Studies. – 2022. – Т. 2. – №. 09. – С. 22-28.

2. Бабкин А.В., Глухов В.В., Шкарупета Е.В. Методика оценки цифровой зрелости отраслевых промышленных экосистем // Организатор производства. 2022. Т. 30. № 3. С. 7-20.

3. Глухов В. В., Бабкин А. В., Шкарупета Е. В. Цифровое стратегирование промышленных систем на основе устойчивых экоинновационных и циркулярных бизнес-моделей в условиях перехода к Индустрии 5.0 //Экономика и управление. – 2022. – Т. 28. – №. 10. – С. 1006-1020.

4. Бабкин А. В., Шкарупета Е. В., Плотников В. А. Управление кросс-отраслевым потенциалом развития в условиях Индустрии 5.0: теория, инструментарий и практические приложения //Экономическое возрождение России. – 2022. – №. 2 (72). – С. 50-65.

5. Бабкин А. В. и др. ИНДУСТРИЯ 5.0: Нейро-цифровой инструментарий стратегического целеполагания и планирования //Технико-технологические проблемы сервиса. – 2022. – №. 3 (61). – С. 64-85.

6. Voulgaridis K. et al. IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges //Computer Networks. – 2022. – С. 109456. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109456>.

7. Voulgaridis K., Lagkas T., Sarigiannidis P. Towards Industry 5.0 and Digital Circular Economy: Current Research and Application Trends //2022 18th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). – IEEE, 2022. – С. 153-158. <https://doi.org/10.1109/DCOSS54816.2022.00037>.

8. Cheah C. G. et al. Innovation designs of industry 4.0 based solid waste management: Machinery and digital circular economy //Environmental Research. – 2022. – Т. 213. – С. 113619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619>.

9. Kumar N. M., Chopra S. S. Leveraging blockchain and smart contract technologies to overcome circular economy implementation challenges //Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 15. – С. 9492. <https://doi.org/10.3390/su14159492>.

10. Huynh P. H. Enabling circular business models in the fashion industry: The role of digital innovation //International Journal of Productivity

and Performance Management. – 2021. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0683>.

11. Ellsworth-Krebs K. et al. Circular economy infrastructure: Why we need track and trace for reusable packaging // Sustainable Production and Consumption. – 2022. – Т. 29. – С. 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.007>.

12. Kristoffersen E. et al. Towards a business analytics capability for the circular economy // Technological Forecasting and Social Change. – 2021. – Т. 171. – С. 120957. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120957>.

13. Fraga-Lamas P., Lopes S. I., Fernández-Caramés 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. – Т. 21. – №. 17. – С. 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>.

14. Digital circular economy as a cornerstone of a sustainable European industry transformation. White Paper – ECERA European Circular Economy Research Alliance – 20 October 2020.

15. Nham N. T. H. et al. Making the circular economy digital or the digital economy circular? Empirical evidence from the European region // Technology in Society. – 2022. – Т. 70. – С. 102023.

16. Okorie O. et al. Digital transformation and the circular economy: Creating a competitive

advantage from the transition towards Net Zero Manufacturing // Resources, Conservation and Recycling. – 2023. – Т. 189. – С. 106756.

17. MacArthur E., Zumwinkel K., Stuchtey M. R. Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe // Ellen MacArthur Foundation. – 2015. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>.

18. Heck S., Rogers M., Carroll P. Resource revolution: how to capture the biggest business opportunity in a century. – Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

19. Schögl J. P. et al. Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector // Sustainable Production and Consumption. – 2022.

20. Damianou A., Angelopoulos C. M., Katos V. An architecture for blockchain over edge-enabled IoT for smart circular cities // 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). – IEEE, 2019. – С. 465-472. <http://dx.doi.org/10.1109/DCOSS.2019.00092>

21. Voulgaridis K. et al. IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges // Computer Networks. – 2022. – С. 109456.

Поступила в редакцию – 13 октября 2022 г.

Принята в печать – 02 ноября 2022 г.

Bibliography

1. Mahmudova G., Rakhmatullaeva D. Transformation and development of industry in the digital economy // European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies. – 2022. – Т. 2. – №. 09. – С. 22-28.

2. Babkin A.V., Gluhov V.V., SHkarupeta E.V. Metodika ocenki cifrovoj zrelosti otraslevykh promyshlennykh ekosistem // Organizator proizvodstva. 2022. Т. 30. № 3. С. 7-20.

3. Gluhov V. V., Babkin A. V., SHkarupeta E. V. Cifrovoe strategirovanie promyshlennykh sistem na osnove ustojchivykh ekoinnovacionnykh i cirkulyarnykh biznes-modelej v usloviyah perekhoda k Industrii 5.0 // Ekonomika i upravlenie. – 2022. – Т. 28. – №. 10. – С. 1006-1020.

4. Babkin A. V., SHkarupeta E. V., Plotnikov V. A. Upravlenie kross-otraslevym potencialom razvitiya v usloviyah Industrii 5.0: teoriya, instrumentarij i prakticheskie prilozheniya // Ekonomicheskoe vrozozhdenie Rossii. – 2022. – №. 2 (72). – С. 50-65.

5. Babkin A. V. i dr. INDUSTRIYA 5.0: Nejro-cifrovoj instrumentarij strategicheskogo celepologaniya i planirovaniya // Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa. – 2022. – №. 3 (61). – С. 64-85.

6. Voulgaridis K. et al. IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges // Computer Networks. – 2022. – С. 109456. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109456>.

7. Voulgaridis K., Lagkas T., Sarigiannidis P. Towards Industry 5.0 and Digital Circular Economy:

Current Research and Application Trends //2022 18th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). – IEEE, 2022. – S. 153-158. <https://doi.org/10.1109/DCOSS54816.2022.00037>.

8. Cheah C. G. et al. Innovation designs of industry 4.0 based solid waste management: Machinery and digital circular economy //Environmental Research. – 2022. – Т. 213. – S. 113619. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113619>.

9. Kumar N. M., Chopra S. S. Leveraging blockchain and smart contract technologies to overcome circular economy implementation challenges //Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 15. – S. 9492. <https://doi.org/10.3390/su14159492>.

10. Huynh P. H. Enabling circular business models in the fashion industry: The role of digital innovation //International Journal of Productivity and Performance Management. – 2021. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0683>.

11. Ellsworth-Krebs K. et al. Circular economy infrastructure: Why we need track and trace for reusable packaging //Sustainable Production and Consumption. – 2022. – Т. 29. – S. 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.007>.

12. Kristoffersen E. et al. Towards a business analytics capability for the circular economy //Technological Forecasting and Social Change. – 2021. – Т. 171. – S. 120957. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120957>.

13. Fraga-Lamas P., Lopes S. I., Fernández-Caramés 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. – Т. 21. – №. 17. – S. 5745. <https://doi.org/10.3390/s21175745>.

14. Digital circular economy as a cornerstone of a sustainable European industry transformation. White Paper – ECERA European Circular Economy Research Alliance – 20 October 2020.

15. Nham N. T. H. et al. Making the circular economy digital or the digital economy circular? Empirical evidence from the European region //Technology in Society. – 2022. – Т. 70. – S. 102023.

16. Okorie O. et al. Digital transformation and the circular economy: Creating a competitive advantage from the transition towards Net Zero Manufacturing //Resources, Conservation and Recycling. – 2023. – Т. 189. – S. 106756.

17. MacArthur E., Zumwinkel K., Stuchtey M. R. Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe //Ellen MacArthur Foundation. – 2015. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>.

18. Heck S., Rogers M., Carroll P. Resource revolution: how to capture the biggest business opportunity in a century. – Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

19. Schögl J. P. et al. Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector //Sustainable Production and Consumption. – 2022.

20. Damianou A., Angelopoulos C. M., Katos V. An architecture for blockchain over edge-enabled IoT for smart circular cities //2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). – IEEE, 2019. – S. 465-472. <http://dx.doi.org/10.1109/DCOSS.2019.00092>

21. Voulgaridis K. et al. IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges //Computer Networks. – 2022. – S. 109456.

Received – 13 October 2022

Accepted for publication – 02 November 2022