

МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИННОВАЦИИ

УДК: 330.3, 332.1, 338.2, 338.4
JEL: L16, O14, O32, O33

**Технологии Индустрии 4.0 – фактор,
способствующий внедрению циркулярной экономики
для достижения устойчивого развития
(обзор зарубежной литературы)**

Б.А. Ерзнкян, д.э.н., профессор
<https://orcid.org/0000-0001-6065-9120>; SPIN-код (РИНЦ): 3602-8624
Scopus author ID: 57120114200
e-mail: yerz@cemi.rssi.ru, lvova1955@mail.ru

К.А. Фонтана, к.э.н.
<https://orcid.org/0000-0002-8789-8786>; SPIN-код (РИНЦ): 8727-2024
e-mail: fontana@mail.ru

Для цитирования

Ерзнкян Б.А., Фонтана К.А. Технологии Индустрии 4.0 – фактор, способствующий внедрению циркулярной экономики для достижения устойчивого развития (обзор зарубежной литературы) // Проблемы рыночной экономики. – 2022. – № 3. – С. 59-77.

DOI: <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-3-59-77>

Аннотация

Цель исследования заключается в рассмотрении особенностей Индустрии 4.0, порожденной современными интеллектуальными, информационными и цифровыми технологиями и обеспечивающей более высокий уровень эффективности производства. Однако влияние Индустрии 4.0, в т.ч. отдельных технологий, на отрасли циркулярной экономики и отдельные этапы жизненного цикла продукта еще недостаточно изучено. Исследование вносит свой вклад в расширение понимания данных процессов. **Предметом исследования** является циркулярная экономика (как одна из важнейших концепций, направленных на устойчивое развитие) и технологии Индустрии 4.0. **Целевые группы.** Директивные органы и заинтересованные стороны, ответственные за разработку и внедрение современных технологических решений, учитывающих социальную и экологическую составляющие устойчивого развития страны и регионов, в т.ч. в отраслевом разрезе. Данное исследование может найти отклик в научном сообществе. В качестве **методологического аппарата** использован метод анализа литературы по данному направлению, в частности, сравнительный анализ тематических исследований, практических наработок в изучаемой сфере. **Результаты.** Проведен анализ процессов, связанных с внедрением технологий Индустрии 4.0 на различных этапах жизненного цикла продуктов в отраслевом разрезе и их влияние на переход к экономике замкнутого цикла. Рассмотрено и подтверждено, что технологии Индустрии 4.0 оказывают широкий спектр влияния для улучшения циркуляции, что, в свою очередь, содействует достижению устойчивости путем реализации экономических, социальных и экологических выгод. Продемонстрированы различия в потенциальном воздействии технологий Индустрии 4.0 на этапы жизненного цикла продукта, в т.ч. в отраслевом разрезе. Показано, что понимание подобного влияния позволит использовать преимущества технологий Индустрии 4.0 для достижения устойчивости и будет способствовать стратегическому внедрению таких технологий в контексте перехода к экономике

замкнутого цикла. **Выводы.** Чтобы воспользоваться преимуществами, которые предоставляют технологии Индустрии 4.0 для достижения устойчивости посредством воздействия на процессы циркуляции, необходимо тщательно оценивать степень влияния технологий на различные этапы жизненного цикла продукта, в том числе с учетом его отраслевой принадлежности. **Рекомендовано.** Сделанные выводы свидетельствуют о необходимости продолжения исследований в данном направлении в свете появления новых технологий, порожаемых их непрерывным развитием и интеграцией.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла, четвертая промышленная революция, информационные и цифровые технологии, устойчивость, жизненный цикл продукта.

Industry 4.0 technologies – a factor contributing to the introduction of a circular economy to achieve sustainable development (review of foreign literature)

Bagrat H. Yerznkyan, Dr. of Sci (Econ.), Professor

<https://orcid.org/0000-0001-6065-9120>; SPIN-code (RSCI): 3602-8624

Scopus author ID: 57120114200

e-mail: yerz@cemi.rssi.ru, lvova1955@mail.ru

Karine A. Fontana, Cand. of Sci (Econ.)

<https://orcid.org/0000-0002-8789-8786>; SPIN-code (RSCI): 8727-2024

e-mail: fontana@mail.ru

For citation

Yerznkyan B.H., Fontana K.A. Industry 4.0 technologies – a factor contributing to the introduction of a circular economy to achieve sustainable development (review of foreign literature) // Market economy problems. – 2022. – No. 3. – Pp. 59-77 (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-3-59-77>

Abstract

The **purpose** of the study is to consider the features of Industry 4.0 generated by modern intellectual, information and digital technologies and providing a higher level of production. However, the impact of Industry 4.0, including individual technologies on the industries of the circular economy and individual stages of the product life cycle has not yet been sufficiently studied. The research contributes to the expansion of the understanding of these processes. **The subject of the study** is the circular economy (as one of the most important concepts aimed at sustainable development) and Industry 4.0 technologies. **Target groups.** Decision-making bodies and stakeholders responsible for the development and implementation of modern technological solutions that take into account the social and environmental components of sustainable development of the country and regions, including in the sectoral context. This research may find a response in the scientific community. As a **methodological tool**, the method of analyzing the literature in this area is used, in particular, a comparative analysis of case studies, practical developments in the field under study. **Results.** The analysis of the processes associated with the introduction of Industry 4.0 technologies at various stages of the life cycle of products in the industry context and their impact on the transition to the circular economy is carried out. It is considered and confirmed that Industry 4.0 technologies have a wide range of effects to improve circulation, which in turn contributes to achieving sustainability by realizing economic, social and environmental benefits. The differences

in the potential impact of Industry 4.0 technologies on the stages of the product life cycle, including in the industry context, are demonstrated. It is shown that understanding such an impact will allow using the advantages of Industry 4.0 technologies to achieve sustainability and will contribute to the strategic implementation of such technologies in the context of the transition to a circular economy. **Conclusions.** In order to take advantage of the benefits provided by Industry 4.0 technologies to achieve sustainability by influencing circulation processes, it is necessary to carefully assess the degree of technology impact on various stages of the product life cycle, including taking into account its industry affiliation. **Recommended.** The conclusions made indicate the need to continue research in this direction in the light of the emergence of new technologies generated by their continuous development and integration.

Keywords: *circular economy, fourth industrial revolution, information and digital technologies, sustainability, product life cycle.*

Введение

Четвертая промышленная революция, или, как ее называют, Индустрия 4.0 (I4.0), представляет собой современную производственную систему, основанную на информационных технологиях, цифровой трансформации и настроенную на достижение целей устойчивого развития (УР) в социальных, экономических и экологических измерениях, в том числе за счет эффективного и повторного использования (ПИ) ресурсов.

Понимание степени воздействия технологий I4.0 на УР, а также на продвижение экономики замкнутого цикла («циркулярной экономики») (ЦЭ)¹ будет способствовать стратегическому внедрению технологий I4.0 для достижения устойчивости, а прорывные технологии I4.0 могут помочь ученым и практикам преодолеть существующие технологические барьеры и достичь ЦЭ.

Несмотря на большое количество исследований, связанных с I4.0, все еще присутствует расплывчатость в терминологии, что связано, по-видимому с тем, что I4.0 представляет собой собирательный термин современных цифровых и информационных разработок. Другой причиной может быть политически (а не чисто научное) мотивированное происхождение самой концепции (см. далее).

Концепция устойчивости в контексте I4.0 бросает вызов традиционным подходам к решению проблем УР и предполагает переход от гомогенных систем «делать вещи лучше» («*doing things better*») к целостным системам «делать лучшие вещи» («*doing better things*») (McKibben, 2007). Например, по мнению М. Гейсдойрфера и соавторов (Geissdoerfer et al., 2017) достижение устойчивости возможно посредством реализации устойчивых бизнес-моделей² (УБМ) (*Sustainable Business Models*). По мнению Дж. Элкинтона (Elkington and Rowlands, 1999), устойчивость, базирующаяся на трех столпах – экономическом, социальном, экологическом, – достижима за счет реализации концепции тройного критерия³ (КТК) (*Triple Bottom Line*). Еще один подход для достижения УР в условиях нехватки ресурсов для всё большего количества продуктов – концепция ЦЭ, предоставляющая альтернативные способы достижения устойчивого роста и повышения эффективности использования ресурсов; ЦЭ заменяет подход «конца срока службы» принципами сокращения, переработки, восстановления и ПИ.

¹ О связи УР и ЦЭ см.: Ерзкян, Б.А. и Фонтана, К.А. (2021), «Циркулярная экономика и устойчивое развитие городов», *Региональные проблемы преобразования экономики*, № 7 (129), с. 7-22, DOI: 10.26726/1812-7096-2021-7-7-22.

² Устойчивая бизнес-модель – модель, которая учитывает интересы всех заинтересованных сторон; создает ценность для всех участников, не истощая ресурсы, которые помогают ее создавать; является прозрачной по своей структуре (Hendricks, D. «How to Create a Sustainable Business Model», available at: <https://www.business.com/articles/how-to-create-a-sustainable-business-model/> (Accessed 01.07.2022)).

³ В концепцию тройного критерия заложен принцип триединства: равный учет экономической, социальной и экологической составляющих целей развития современной цивилизации; удовлетворение потребностей в ресурсах нынешнего и будущих поколений без ущерба для окружающей среды.

Если рассматривать циркуляцию в контексте I4.0, то технологии играют ключевую роль в успехе ЦЭ и УР благодаря усовершенствованиям в интеллектуальном управлении данными, обмену информацией в режиме реального времени, прозрачности спроса и наличия запасов на всех уровнях по всей цепочке поставок, позволяя отслеживать потоки продуктов, что способствует более эффективному управлению на разных этапах жизненного цикла продукта (Bag et al., 2021) и приводит к снижению воздействия на окружающую среду и социальную сферу. По мнению специалистов, технологии I4.0 могут быть использованы для стимулирования перехода к ЦЭ, «облегчая реализацию стратегий окончания срока службы и закрытия цикла» (Bressanelli et al., 2018).

Тем не менее взаимодействие технологий I4.0 и УР все еще недостаточно ясны и изучены. То же самое относится и к ЦЭ. Кроме того, опубликованные исследования зачастую имеют узкий фокус. В итоге отсутствие единой позиции в отношении того, как технологии I4.0 влияют на цикличность, отражается на практической стороне – внедрение ЦЭ на практике зачастую не связано с внедрением технологий I4.0 (Rosa et al., 2020). Согласно опросу, проведенному Gartner⁴, 70% респондентов планируют инвестировать в ЦЭ, но только 12% из них связывают свои циркулярные стратегии с внедрением технологий I4.0, что можно объяснить, в т.ч. отсутствием исследований и соответствующих рекомендаций относительно влияния технологий I4.0 в отношении процессов циркуляции, максимизации производительности для конкретной циркулярной стратегии.

Настоящее исследование привносит свой вклад в область изучения процессов на стыке устойчивого развития (в частности, циркулярной экономики) и технологий I4.0.

1. Основные понятия

1.1. Устойчивое развитие

Успешная экономическая модель развития должна удовлетворять потребности общества, которому она служит, и при этом ответственно управлять природными экосистемами, от которых зависит. Это вопрос достижения гармоничного баланса между человеком и природой.

Сегодня человечество продолжает использовать все большее количество природных ресурсов, объем выбросов парниковых газов и отходов продолжает увеличиваться (на 1% богатейшего населения мира приходится больше выбросов, чем на 50% самых бедных). Ежегодно мировая экономика «переваривает» до 100 млрд. тонн ресурсов, что позволяет поддерживать сложившийся образ жизни населения планеты. При этом только 8,6% использованных ресурсов проходят этапы циркуляции и вновь возвращаются в экономику (Emissions Gap Report, 2019).

Растущий интерес к вопросам устойчивости, к тому, как построить справедливую и экологически ответственную экономику, сделал концепцию УР движущей, идеальной целью во многих международных и национальных программах, стратегиях компаний, научных исследованиях. Устойчивость помогает создать условия для решения многих проблем 21 века: «концепция устойчивого развития подразумевает не абсолютные пределы, а ограничения, налагаемые нынешним состоянием технологий и социальной организацией на экологические ресурсы и способностью биосферы поглощать последствия человеческой деятельности» (Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, 1987). В Докладе Брундтланд (также известном как «*Наше общее будущее*») УР определяется как «развитие, отвечающее потребностям настоящего времени, без причинения ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» (Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, 1987) (философия межпоколений).

Еще одной актуальной интерпретацией УР является связь с концепцией тройного критерия, которая базируется на трех столпах: *экономическая устойчивость* (направлена на обеспечение прибыли); *социальная устойчивость* (способствует сохранению и развитию человеческого и общественного капитала); *экологическая устойчивость* (относится к потреблению тех ресурсов, которые могут быть воспроизведены из живых и неживых существ).

⁴ Gartner Research, (2019), “Employ Digital Technology to Enable a Circular Economy”, available at: <https://www.gartner.com/en/documents/3978595> (Accessed 21.07.2022).

Другой связанной концепцией, как средства продвижения устойчивости, является ЦЭ, которая приобрела широкую известность и может соперничать с самой идеей УР. С позиции УР концепция ЦЭ направлена на общий системный сдвиг в сторону более ответственного и эффективного способа управления природными и технологическими ресурсами. Авторы также связывают понимание устойчивости с достижением Целей ООН в области УР (ЦУР).

С учетом представленного выше понимания УР можно утверждать, что процесс УР требует системных изменений, внедрения инноваций в производственные процессы (в т.ч. технологий I4.0), пересмотра сложившихся устоев, привычек в области потребления и отношения к экологическим вопросам. В исследовании упор делается на циркулярный аспект мышления, который поддерживает УР.

1.2. Циркулярная экономика

В последние годы ЦЭ стала одним из наиболее широко обсуждаемых и исследуемых подходов к реализации УР. Дж. Кирххерр и соавторы (Kirchherr et al., 2017) утверждают, что ЦЭ стремится «достичь устойчивого развития»; Б. Корона и соавторы (Corona et al., 2019) воспринимают ЦЭ «как устойчивую экономическую систему»; Б. Суарес-Эйроа и соавторы (Suárez-Eiroa et al., 2019) рассматривают ЦЭ в качестве новой концепции «устойчивой циркулярной экономики». В 2020 г. Европейская Комиссия опубликовала новый План действий по развитию экономики замкнутого цикла, который был принят в рамках Европейского инвестиционного плана «Зеленая сделка» (называемый также «Инвестиционным планом устойчивой Европы»). В Плане действий ставится цель «снизить углеродный след ЕС и добиться двукратного роста повторного использования ресурсов к 2030 г.», а также «принятие мер по введению экономики замкнутого цикла»⁵.

В Плане также подчеркивается важность инноваций и современных технологий для перехода от линейной модели экономики к циркулярной, пересмотра способа производства и потребления продуктов (Changing how We Produce and Consume: New Circular Economy Action Plan Shows the Way to a Climate Neutral, Competitive Economy of Empowered Consumers, 2020). ЦЭ – это смена парадигмы по отношению к тому, как используются природные ресурсы (подробнее о ЦЭ см.: Ерзкян и Фонтана, 2021). Идея циркуляции заимствована у природы, а процессы ЦЭ имитируют поведение природы, где не существует отходов, где каждый элемент является входом для другого процесса. Действительно, концепция ЦЭ предлагает регенеративную и восстанавливающую систему производства и потребления, замыкая входной и выходной циклы экономики, что может способствовать переходу к устойчивому будущему. Вместе с тем последствия подобного воздействия все еще обсуждаются.

В научной литературе описаны различные циркулярные подходы, основанные на так называемых R-стратегиях (см. например, Goyal et al., 2021; Haupt et al., 2016; Merli et al., 2018; Rosa et al., 2020). Изначально ЦЭ ассоциировалась с 3R-стратегией: сокращение, повторное использование, переработка. В настоящее время R-стратегии определяются в диапазоне до 10R, включая, в т.ч. ремонт, восстановление, перепрофилирование, совместное использование и пр. (Reike et al., 2018). Важно понимать, что ЦЭ представляет собой непрерывный процесс трансформации, т.е. речь идет о динамических системах.

Модель *DISRUPT* описывает подобный подход к пониманию ЦЭ (Haigh et al., 2021):

D. Design for the future («Дизайн для будущего»): системный подход к процессу проектирования продукта, учитывающий возможность длительного использования как самого продукта, так и материалов, из которых он состоит, в составе других продуктов в будущем.

I. Incorporate digital technology («Внедрение цифровых технологий»): отслеживание, эффективное использование ресурсов и укрепление связей между участниками цепочки поставок с помощью цифровых технологий (в т.ч. технологий I4.0).

⁵ По материалам портала НИУ ВШЭ, «ЕС принял План действий по развитию экономики замкнутого цикла», доступно по адресу: <https://globalcentre.hse.ru/news/348807032.html?ysclid=18eiopgkwg923511756> (Дата обращения 21.09.2022).

S. Sustain & Preserve what's already there («Поддержание и сохранение того, что есть»): ремонт, восстановление, модернизация используемых продуктов и материалов, чтобы продлить их срок службы и/или дать им «вторую жизнь» (где это возможно).

R. Rethink the business model («Переосмысление бизнес-моделей»): создание большей ценности с помощью бизнес-моделей, основанных на взаимодействии между продуктами и услугами.

U. Use waste as a resource («Использование отходов в качестве ресурса»): рассмотрение отходов в качестве источника вторичных ресурсов.

P. Prioritise regenerative resources («Создание приоритетных регенеративных ресурсов»): обеспечение более широкого использования возобновляемых и многоразовых ресурсов.

T. Team Up to create joint value («Объединение для создания совместной ценности»): сотрудничество по всей цепочке поставок как внутри организаций, так и с внешними партнерами для создания совместной ценности.

Как видим, в структуре *DISRUPT* технологии являются одним из ключевых элементов, способствующих оптимизации использования ресурсов и укрепления связей и сотрудничества между участниками цепочки поставок при переходе к циркулярной модели экономики. Синергия между технологиями I4.0 и ЦЭ может привести к экономической, экологической и социальной устойчивости за счет защиты природных ресурсов, оптимизации процессов, повышения эффективности системы, сокращения отходов, предоставления новых рабочих мест.

Вместе с тем Де Соуза Джаббур и соавторы (de Sousa Jabbour et al., 2018a) подчеркивают, что неспособность получить доступ к современным технологиям, отсутствие технологического потенциала, знаний и специалистов соответствующего профиля являются сдерживающими факторами для реализации принципов ЦЭ на предприятиях.

2. Технологии Индустрии 4.0

Термин «Индустрия 4.0» был введен немецкими исследователями, чтобы помочь сформировать будущее немецкой экономики. Согласно Кагерманн и соавторам (Kagermann et al., 2011), I4.0 использует фундаментальные инновационные технологии для объединения/взаимодействия людей, машин и других ресурсов, а также продуктов и услуг в реальном мире. Вместе с тем концепция I4.0 изначально характеризовалась не только как технологическое развитие, но и имела политическую коннотацию для поддержания «позиции Германии как лидера в отрасли промышленного машиностроения» (Kagermann et al., 2013). Со временем данная концепция получила международное внимание, однако, сочетая в себе политические амбиции и технологические разработки, подвергается критике из-за отсутствия надлежащего определения. В таблице 1 представлена одна из наиболее часто встречающихся классификаций технологий, характеризующих I4.0.

Таблица 1 / Table 1

Перечень технологий Индустрии 4.0 / Industry 4.0 Technology List

Технологии		Определение
Радиочастотная идентификация (RFID)	<i>Radio Frequency Identification, RFID</i>	Относится к технологиям, которые используют беспроводную связь между объектом/меткой и опрашивающим устройством/считывателем для автоматического отслеживания и идентификации объектов.
Глобальная система позиционирования (GPS)	<i>Global Positioning System, GPS</i>	Относится к техническим средствам, которые благодаря группе спутников на орбите Земли передают точные сигналы, позволяя GPS-приемникам вычислять и отображать точную информацию о местоположении, скорости и времени для пользователя.
Мобильные технологии	<i>Mobile Technology</i>	Интеграция технологий беспроводной связи на основе беспроводных устройств.

Технологии		Определение
Датчики	<i>Sensors</i>	Относятся к устройствам, которые реагируют на физический стимул (например, тепло, свет, звук, давление, движение) и передают результирующий импульс для последующего измерения/управления.
Виртуальная и Дополненная реальность (ВДР)	<i>Virtual and Augmented reality</i>	Относится к типу интерактивной среды отображения, основанной на реальности, которая использует возможности компьютерного дисплея, звука и других эффектов для улучшения реального опыта. ВДР позволяет моделировать реальные ситуации для обучения работников, чтобы избегать опасных моментов, создавать расширенную версию реальности, в которой живые, прямые или косвенные виды реальных физических сред дополняются компьютерными наложенными изображениями.
Симуляция	<i>Simulation</i>	Относится к технологиям, которые используют компьютер для имитации реального процесса или системы.
Большие данные и аналитика (БДА)	<i>Big data and analytics</i>	Стратегии анализа больших объемов данных, которые применяются в ситуациях, когда традиционные методы анализа и обработки данных не могут раскрыть понимание и значение базовых данных. Так, сочетание использования IoT (интернет вещей) и Облака позволяет подключать различное оборудование, производственные системы / системы управления компаний и клиентов; через БДА собранные данные непрерывно обновляются и анализируются, а процессы принятия решений улучшаются, что помогает повысить гибкость производства, качество продукции, энергоэффективность.
Блокчейн	<i>Blockchain</i>	База данных, которая поддерживает распределенный, не поддающийся подделке, постоянно растущий список записей с использованием новой технологии шифрования, аутентификации и общесетевого механизма консенсуса. Таким образом, после добавления в блокчейн запись шифруется и не может быть изменена или удалена без ведома всех участников.
Облако	<i>Cloud</i>	Относится к любым ИТ-услугам, которые предоставляются поставщикам облачных вычислений.
Интернет вещей (IoT); Промышленный интернет вещей (IIoT)	<i>Internet of Things, IoT;</i> <i>Industrial Internet of Things, IIoT</i>	Относится к взаимодействию физических устройств и объектов, состояние которых может быть изменено через Интернет, с активным участием (или без) отдельных лиц. Технология IoT обеспечивает эффективное управление продуктами, особенно в отношении сбора, восстановления и переработки в конце срока службы; автоматически и удаленно отслеживает ресурсы и продукты по всей цепочке создания стоимости; подключенные устройства могут генерировать данные и информацию, которые позволяют повысить эффективность использования. Что касается промышленного интернет вещей, то это различные наборы аппаратных средств, которые работают вместе через подключение к интернету вещей, чтобы помочь улучшить производственные и промышленные процессы.

Технологии		Определение
Искусственный интеллект (ИИ)	<i>Artificial intelligence</i>	Относится к области информатики, которая ориентирована на создание интеллектуальных машин, работающих и реагирующих подобно людям.
Аддитивное производство (АП)	<i>Additive manufacturing</i>	Относится к технологиям производства путем добавления материала, применяемого для производства новых, сложных и долговечных компонентов. С помощью данной технологии создаются трехмерные (3D) твердые объекты с использованием серии аддитивных/слоистых структур разработки.
Нанотехнология	<i>Nanotechnology</i>	Относится к типу технологий для управления отдельными атомами и молекулами при изготовлении макромасштабных продуктов.
Роботы (автономные), робототехника	<i>Robots (autonomous), Robotics</i>	Используются для воспроизведения человеческих действий на производстве. Поскольку производственные задачи становятся более индивидуализированными и гибкими, машины должны выполнять переменные задачи без перепрограммирования, поэтому роботы становятся все более автономными и могут взаимодействовать друг с другом.
Коботические системы	<i>Cobotic systems</i>	Робот, предназначенный для физического взаимодействия с людьми в общем рабочем пространстве.
Беспилотный летательный аппарат (дроны)	<i>Unmanned aerial vehicle (Drones)</i>	Летательный аппарат без пилота-человека на борту.
Кибербезопасность (КБ)	<i>Cybersecurity</i>	Относится к превентивным методам, используемым для защиты информации от кражи/атаки. В гиперсвязанной среде необходимо обеспечить безопасную и надежную связь между системами, гарантирующую защиту от возможной кражи, уничтожения информации, изменений в производственных процессах или полного отключения из-за кибератак.

Источники: / Sources: Bai, Ch., Dallasega, P., Orzes, G. and Sarkis, J. (2020), "Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective", *International Journal of Production Economics*, vol. 229, 107776, DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107776; Thames, L. and Schaefer, D. (2017), "Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges", *Cybersecurity for Industry 4.0*, vol. 4, pp. 1-33, DOI: 10.1007/978-3-319-50660-9_1.

В целом разработка и внедрение технологий I4.0 направлены на достижение определенных операционных и стратегических преимуществ, таких как эффективность использования ресурсов, энергоэффективность, возобновляемость источников энергии, обеспечение устойчивых цепочек поставок, конкурентоспособность, осведомленность, переход к «умным городам» и «умным фабрикам», повышение производительности труда, снижение нагрузки на работников.

3. Технологии Индустрии 4.0. и устойчивое развитие

I4.0 влияет как на экономические процессы, так и социальные, и экологические, направленные на достижение устойчивости. Так, с экономической точки зрения, технологии I4.0 могут быть интегрированы в производственно-сбытовые цепочки за счет сбора/обработки/обмена данными в режиме реального времени. Подобные технологии могут облегчить процесс отслеживания (в т.ч. перемещения) продуктов на разных стадиях жизненного цикла. С экологической точки зрения технологии I4.0 могут помочь снижению потребления природных ресурсов и энергии, сокращению отходов и выбросов CO₂ (например, за счет внедрения в производственные процессы и в цепочки поставок процедуры БДА) (Shrouf

et al., 2014). Что касается социальной устойчивости, то интеллектуальные и автономные производственные системы, оснащенные технологиями I4.0, могут поддерживать безопасность условий труда, беря на себя не только монотонные задачи, но и работу в опасных условиях.

Технологии I4.0 способствуют достижению 17 ЦУР ООН. В таблице 2 приведены взаимосвязи между ЦУР и технологиями I4.0.

Таблица 2 / Table 2

**Цели Устойчивого развития ООН и технологии Индустрии 4.0 /
UN Sustainable Development Goals and Industry 4.0 technologies**

ЦУР ООН*	Связь с технологиями I4.0
1. «Ликвидация нищеты»	Технологии I4.0 могут обеспечить доступ к информации, образованию, здравоохранению и более широким экономическим возможностям.
2. «Ликвидация голода»	Технологии I4.0 могут способствовать устойчивости агропромышленного комплекса и, как следствие, помочь решить вопросы обеспечения продовольствием.
3. «Хорошее здоровье и благополучие»	Технологии I4.0 способствуют цифровизации здравоохранения, оказанию современных медицинских услуг; пропагандируют (обеспечивают) проведение профилактических мероприятий.
4. «Качественное образование»	Технологии I4.0 помогут обеспечить доступное высококачественное образование.
5. «Гендерное равенство»	Технологии I4.0 позволяют обеспечить равные возможности на каждом уровне как для мужчин, так и для женщин.
6. «Чистая вода и санитария»	Технологии I4.0 облегчают проведение мониторинга водных ресурсов в режиме реального времени; способствуют принятию эффективных управленческих решений с учетом неопределенности и рисков водной сферы; могут обеспечить доступное обучение гигиеническим практикам.
7. «Недорогостоящая и чистая энергия»	Технологии I4.0 способствуют устойчивой энергоэффективности, повышению качества и экономии затрат для пользователей.
8. «Достойная работа и экономический рост»	Технологии I4.0 оказывают прямое и косвенное экономическое воздействие, не нанося вреда окружающей среде; могут способствовать созданию новых рабочих мест.
9. «Индустриализация, инновации и инфраструктура»	Технологии I4.0 содействуют внедрению инновационных технологий, развитию устойчивых отраслей, увеличению инвестиций в научные исследования, модернизацию инфраструктуры.
10. «Уменьшение неравенства»	Технологии I4.0 способствуют решению проблем «цифрового разрыва» среди населения/регионов, что в конечном итоге приводит к сокращению неравенства между людьми и регионами.
11. «Устойчивые города и населенные пункты»	Технологии I4.0 могут помочь построить современные, устойчивые, умные города, содействовать обеспечению общественного порядка, безопасности и охране зеленых и культурно-исторических объектов.
12. «Ответственное потребление и производство»	Технологии I4.0 могут использоваться для повышения эффективности производственных процессов в различных отраслях; способствовать прозрачности в цепочках поставок и улучшению процессов потребления.
13. «Борьба с изменением климата»	Технологии I4.0 способствуют сокращению углеродного следа, улучшению состояния водных ресурсов, повышению качества почвенного покрова, сохранению биоразнообразия.

ЦУР ООН*	Связь с технологиями I4.0
14. «Сохранение морских экосистем»	Технологии I4.0 помогают эффективному и бережливому использованию ресурсов мирового океана.
15. «Сохранение экосистем суши»	Технологии I4.0 способствуют эффективному и рациональному управлению биоразнообразием и зелеными массивами.
16. «Мир, правосудие и эффективные институты»	Технологии I4.0 содействуют развитию открытого общества, прозрачности и доступности системы правосудия, защите прав человека, эффективности работы институтов.
17. «Партнерство в интересах устойчивого развития»	Технологии I4.0 могут помочь сотрудничать с широким кругом заинтересованных сторон в целях продвижения устойчивого развития.

* Источник: / Source: Цели в области устойчивого развития / Sustainable Development Goals, доступно по адресу: / available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>.

Исследования взаимодействия между технологиями I4.0 и устойчивостью в основном сосредоточены на конкретных промышленных проблемах или частных случаях. Те исследователи, которые изучают подобное взаимодействие на макроуровне, отмечают, что технологии I4.0 оказывают различное влияние на устойчивость с учетом отраслевого контекста (Bai et al., 2020): в автомобильной промышленности нанотехнологии, внося вклад в разработку легких пластмасс, способствуют сокращению использования пластмасс на нефтяной основе, что в итоге связано с экономической и экологической устойчивостью; в электронной промышленности мобильные технологии, внося вклад в процесс отслеживаемости (редких) минералов, применяемых в отрасли, способствуют сокращению использования первичных ресурсов за счет их повторного употребления после разборки электронного оборудования по окончании срока его эксплуатации / морального устаревания; совмещение IoT с такими технологиями, как GPS, датчики почвы и БДА, может способствовать интеграции информации и результатов аналитики с данными и подходами в агрономии для принятия научно обоснованных решений в области сельского хозяйства, в частности, в оптимизации циклов полива и использования водных ресурсов, внесения удобрений, сбора урожая и пр.

Вместе с тем проведение исследований о влиянии технологий I4.0 на УР затруднено тем, что эти технологии являются относительно новыми, все еще существует недостаток знаний о их воздействии (вкладе) на процессы, в т.ч. с учетом временного интервала; производительность технологий I4.0 связана с высокой неопределенностью, поскольку они в большинстве случаев применяются в разных контекстах без учета взаимного влияния между собой; сегодня технологии I4.0 в основном интегрируются с традиционными производственными системами (основанными на линейной бизнес-модели), поэтому вопросы совместимости с инновационными производственными системами (в т.ч. «Бизнес-моделями циркулярной экономики» (БМЦЭ) (Circular Economy Business Models), «Системами обслуживания продуктов» (СОП) (Product Service-Systems), «Моделями оплаты за пользование» (Pay-Per-Use Models)) предстоит еще изучать.

Кроме того, следует учитывать, что технологии I4.0 могут создавать определенные риски. Например, они могут стать триггером сокращения занятости, «усложнения» данных, усилить проблему информационной безопасности, способствовать увеличению электронных отходов, потребления энергии и пр. (Ерзнкян и Фонтана, 2022). Однако большинство специалистов сходятся во мнении, что положительный потенциал внедрения технологий I4.0 превышает возможные угрозы, которые необходимо учитывать и предотвращать.

4. Технологии Индустрии 4.0 и циркулярная экономика

ЦЭ набирает популярность в исследованиях по УР на фоне все более широкого внедрения технологий I4.0. В первую очередь в подобных работах акцент делается на рассмотрении и продвижении преимуществ, связанных с ЦЭ, за счет внедрения технологий I4.0.

Авторы также обращают внимание на бизнес-модели на основе ЦЭ (БМЦЭ)⁶ как наиболее конкурентоспособном операционном инструменте для достижения УР (Nascimento et al., 2019). Так, внедрение технологий I4.0 при реализации БМЦЭ способствует повышению эффективности использования ресурсов путем продления срока службы продуктов/деталей, тем самым реализуя экологические, социальные и экономические выгоды; предлагает новые способы, с помощью которых продукты, услуги и связанные с ними экосистемы могут быть изменены для достижения цикличности (Miaoudakis et al., 2020).

Технологии I4.0 могут выступать в качестве триггера для новых бизнес-моделей, продвигающих принципы циркулярности, в частности, речь идет о «Системах обслуживания продуктов» (*Product Service-Systems*) (СОП) – бизнес-модель, которая продвигает циркуляцию и фокусируется на стоимости, удобстве, окружающей среде и имеет возможность улучшить создание стоимости за счет улучшения циркулярности (Ranta et al., 2021). В такой модели вместо (в качестве) продукта предлагаются услуги («товар как услуга»), либо услуги предоставляются в дополнение к продукту (например, техническое обслуживание), что в итоге улучшает жизненный цикл продукта, способствует ПИ, переработке и восстановлению.

С. Макадо и соавторы (Machado et al., 2020) предположили, что бизнес-модели, в которых заложены принципы циркуляции, являются оптимизированными версиями КТК, которые могут быть использованы при разработке УБМ. В свою очередь, УБМ, интегрированные с технологиями I4.0, поддерживают эффективную, основанную на восстановлении инфраструктуру, что ведет к экономическим, социальным, экологическим выгодам и способствует долгосрочному УР.

Большинство специалистов считают, что технологии I4.0 играют важную роль в переходе к более замкнутой и менее линейной экономике. Так,

- В контексте управления цепочками поставок Н. Дэв и соавторы (Dev et al., 2020) указывают, что технологии I4.0 оказывают положительное влияние на такие устойчивые показатели, как сокращение затрат и отходов производственных компаний, способствуют повышению устойчивости обратных цепочек поставок⁷ и продвижению циркулярности.

- Е. Ченг и соавторы (Cheng et al., 2021) подчеркивают важности БДА в повышении производительности цепочек поставок; БДА оказывают существенное влияние на УЦЦП в агропромышленном секторе, которые являются одним из важнейших строительных блоков сельскохозяйственного производства для обеспечения устойчивого доступа к безопасным и высококачественным продуктам питания.

- По мнению К. Лин и соавторов (Lin et al., 2019) БДА способствуют лучшему пониманию характеристик продукта, что имеет решающее значение для его последующей эксплуатации; БДА могут помочь сократить образование отходов за счет увеличения масштабов переработки и ПИ при одновременном продлении срока службы компонентов продукта; большие данные поддерживают такие современные бизнес-модели, как «Продукт как Услуга» (*Product-as-a-Service*), которые, в свою очередь, могут стимулировать ЦЭ (так, звукозаписывающие компании могут предлагать пользователям онлайн-контент вместо записи на компакт-дисках, способствуя, помимо прочего, сокращению электронных отходов).

- По данным Э. Ингемарсдоттер и соавторов (Ingemarsdotter et al., 2019) IoT улучшает процесс отслеживания продуктов, способствует принятию обоснованных решений для продления сроков эксплуатации продуктов, в т.ч. за счет точности оценок оставшегося срока

⁶ Подробнее о БМЦЭ см.: Hina, M., Chauhan, C., Kraus, S., Kaur, P. and Dhir, A. (2022), “Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 333, 130049, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130049.

⁷ В литературе интеграция ЦЭ в управление цепочками поставок (УЦП) получила название «Управление Циркулярными Цепочками Поставок» (УЦЦП), в которой прямые и обратные цепочки поставок координируются, чтобы предотвратить дополнительный ввод ресурсов и утечку энергии наравне с обеспечением восстанавливающих потоков ресурсов между или внутри организаций, а также между различными цепочками поставок. ЦУЦП фактически предлагает новую перспективу развития «Устойчивой Цепочки Поставок» (УсЦП) через ЦЭ (см. например, de Angelis, R., Howard, M. and Miemczyk, J. (2018), “Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain”, *Production Planning and Control*, vol. 29 (6), pp. 425-437, DOI: 10.1080/09537287.2018.1449244).

службы используемых продуктов, качества мониторинга и грамотного технического обслуживания; IoT позволяет интегрировать «умные» объекты в бизнес-экосистему, что также способствует переходу к ЦЭ.

- По мнению М. Хорейши и А. Хаппонен (Ghoreishi and Harpponen, 2020) ИИ помогает в повышении производительности труда, в обнаружении недостатков и скрытых дефектов, в принятии управленческих решений за счет качественного анализа данных в режиме реального времени и в выявлении скрытых закономерностей; ИИ может использоваться при дифференциации отходов, что способствует расширению объемов переработки как одной из R-стратегий ЦЭ; использование алгоритмов ИИ между логистическими компаниями способствует оптимизации грузоперевозок и цепочек поставок, и, как следствие, подобная технология ценна для сокращения выбросов CO₂, предоставляя экономические и экологические выгоды (Tang and Liao, 2021).

- Облачные вычисления, используя программное обеспечение с открытым исходным кодом, позволяют минимизировать энергозатраты и затраты на охлаждение оборудования (Kekkonen, 2021) и, как следствие, способствуют энергоэффективности и экологической устойчивости, что является одной из R-стратегий ЦЭ.

- Радиочастотная идентификация (RFID) помогает отслеживать материальные потоки, чтобы обеспечить восстановление стоимости при реализации ЦЭ: сетевые RFID-системы позволяют подключать продукты с RFID-чипом к информационной сети, предоставляя информацию о жизненном цикле продукта всем сетевым партнерам (Jayaraman et al., 2008).

- Согласно Б. Эсмаилиану и соавторам (Esmaeilian et al., 2020) блокчейн облегчает разработку механизмов, стимулирующих (поощряющих) «зеленое» поведение потребителей и способствует циркуляции на уровне бытового потребления; блокчейн может упростить процесс принятия групповых решений при реализации принципов ЦЭ со стороны различных заинтересованных сторон и субъектов разного уровня (функции обмена данными с применением технологии блокчейн важны для цифровой идентификации данных); с использованием технологии блокчейн могут быть разработаны платформы для реализации R-стратегии ЦЭ «Совместное использование» (*Sharing Platforms*), в частности, компании могут сотрудничать и перераспределять избыточные ресурсы (Nandi et al., 2021); внедрение блокчейн может привести строительную отрасль к экономике замкнутого цикла за счет регенерирующей среды, оптимизации производительности систем, рециркуляции продуктов (Sadeghi et al., 2022).

- Промышленные роботы со встроенными датчиками могут использоваться для сортировки отходов, в т.ч. для выявления редких ресурсов в качестве ценного сырья для ПИ. Так, «*zenRobotics*», оснащенные ИИ, позволяют более гибко сортировать отходы с учетом изменения состава самих отходов, что предоставляет возможность для проведения более универсальной сортировки (Kekkonen, 2021).

- Специалисты утверждают, что современные сенсорные возможности играют существенную роль в расширении практик ЦЭ, в частности, интеллектуальные метки и штрих-коды помогают идентифицировать объекты, отслеживать жизненный цикл продукта (Gligoric et al., 2019) и пр.

Несмотря на, казалось бы, очевидное положительное влияние технологий I4.0 на процессы циркуляции, необходимы дополнительные исследования, в которых бы рассматривались вопросы влияния технологий I4.0 на различные этапы жизненного цикла продукта и услуг ЦЭ (от проектирования продукта до нового цикла его использования с учетом различных R-стратегий), а также исследования в отраслевом разрезе.

Так, А. де Соуза Джабур и соавторы (de Sousa Jabbour et al., 2018b) исследовали вклад технологий I4.0 для улучшения принятия решений в режиме реального времени для устойчивых систем обратной логистики⁸ в рамках реализации концепции ЦЭ. Использование технологий I4.0 в данном случае важно для сбора, обработки и транспортировки отходов для R-стратегии «восстановление».

⁸ См. подробнее: *Logistics System*, available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/logistics-system> (Accessed 18.08.2022).

Дж. Бай и соавторы (Bi et al., 2015) рассмотрели 6R-стратегий (восстановление, ремонт, переработка, сокращение, ПИ, ре-дизайн) в отношении промышленных роботов для достижения устойчивого производства на малых и средних предприятиях (с помощью данных стратегий авторы проиллюстрировали возможность адаптации роботов к новым задачам, увеличение коэффициента их использования при минимизации затрат на каждом этапе реализации R-стратегий).

П. Роза и соавторы (Rosa et al., 2020) в своем исследовании рассмотрели влияние БДА, АП, КС (Киберфизические Системы *Cyberphysical Systems*) на расширение практик ЦЭ через 6R-стратегий. В частности, авторы исследовали такие области применения данных технологий как «ПИ 4.0», «рециркуляция 4.0», «восстановление 4.0», а также УЦП и управление жизненным циклом.

Ласкурайн-Итирбе и соавторы (Laskurain-Iturbe et al., 2021) провели количественное исследование с использованием качественных методов в отношении влияния каждой из 8 технологий I4.0 (АП, БДА, IoT, ВДР, ИИ, КБ, ИЗ (Искусственное зрение *Artificial Vision*), Роботы) на каждую из 5R-стратегий (Повторное использование (ПИ); Снижение потребления вводимых ресурсов (СПВР); Сокращение отходов и выбросов (СОВ); Восстановление; Рециркуляция) в рамках реализации концепции ЦЭ. Результаты исследования показали положительное воздействие рассматриваемых технологий на ЦЭ, но степень влияния конкретных технологий на каждую из R-стратегий оказалась различна. Так, практически все технологии оказывают положительное влияние на СПВР, при этом ИИ, БДА и IoT оказывают наибольшее влияние на данную R-стратегию (что подтверждает выводы (Rejeski et al., 2018)); на R-стратегию СОВ положительное влияние оказывают также все рассмотренные технологии, при этом наибольшее влияние имеет ИИ, а БДА, IoT, ИЗ, Роботы – среднее (что согласуется с выводами (Waibel et al., 2017)); на R-стратегию ПИ сильное влияние оказывают БДА и ИИ (что подтверждает выводы (Bloomfield and Borstock, 2018)) и низкое влияние IoT; на R-стратегию «восстановление» наибольшее влияние оказывает ИИ (согласуется с результатами (Lahroug and Brissaud, 2018) и низкое – IoT, КБ; на R-стратегию «рециркуляция» ИИ также оказывает высокое влияние, а БДА и КБ – низкое положительное влияние (согласуется с выводами (Pavlo et al., 2018)), ВДР – не оказывает никакого положительного влияния.

Обобщая результаты опубликованных исследований в данном направлении, можно сделать вывод, что технологии I4.0 оказывают большее влияние на СПВР и СОВ, чем на ПИ, «рециркуляцию» и «восстановление». Вместе с тем именно последние необходимы для усиления замкнутости цикла (Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution, 2019).

Другим направлением исследований является анализ взаимосвязи технологий I4.0 и ЦЭ в отраслевом разрезе. Согласно опубликованным в открытом доступе исследованиям, в ряде секторов экономики внедрение технологий I4.0 на фоне перехода к ЦЭ оказывается особенно успешным. Поэтому эти сектора находятся в центре линейно-циркулярных трансформационных исследований. Приведем примеры.

Создание цифровых платформ для совместного использования продукции АПК в рамках цепочки поставок продовольствия содействует развитию отрасли, ориентированной на ЦЭ, а также устойчивости агропромышленного сектора. Инструменты принятия решений, использующие алгоритмы БДА, могут быть использованы для построения системы анализа путей УР в сельском хозяйстве, взаимодействия между возобновляемыми ресурсами и сельскохозяйственным производством (Zhenjian et al., 2021), а также способствовать сокращению углеродного следа сельского хозяйства (Kokkinos et al., 2020).

Технологии I4.0 могут улучшить сортировку и переработку в секторе моды и дизайна, создавая прозрачность, прослеживаемость и автоматизацию (Sandvik and Stubbs, 2019). Современные технологии I4.0 и БМЦЭ в данных сферах (которые ориентированы на потребительский спрос) имеют важное значение для перехода индустрии моды и дизайна к ЦЭ⁹.

⁹ См. также об опыте итальянских компаний в данной сфере: available at: <https://www.symbola.net/fondazione/> (Accessed 12.07.2022).

Использование технологий I4.0 (в частности, ИЗ, ИИ, АП, БДА, датчики, мобильные технологии, симуляция) в здравоохранении (например, приложения обратной связи «врач-пациент»), при производстве медицинского оборудования и в фармацевтике, а также при утилизации медицинских отходов стимулирует внедрение принципов ЦЭ в данных секторах (Chauhan et al., 2021).

Технологии I4.0 (в частности, БДА) способствуют снижению затрат в автомобильной промышленности (подробнее см.: Ge and Jackson, 2014).

Другим примером успешной интеграции технологий I4.0 и циркулярности является переход к «умным» и циркулярным городам (Ерзнкян и Фонтана, 2022). Например, построение и развитие архитектуры городской среды с использованием IoT позволяет снизить требования к ресурсам и повышает общую производительность городов; новые городские объекты могут быть спроектированы и реализованы с помощью IoT, БДА, приложений на основе ИИ для управления процессами эффективного использования ресурсов, сокращения объемов отходов, переработки и ПИ, внедрения моделей СОП и совместного пользования (так, цифровые платформы связывают социальные субъекты в городской среде, что способствует, в т.ч. обмену информацией для совместного пользования продуктами, предоставлению «услуги как продукт»).

Рост городов сопровождается потреблением все большего количества ресурсов и производства все большего объема отходов (что не может не сказываться на экологии городов и качестве жизни), вместе с тем интеллектуальные ресурсы городов являются пулом активов городов, которые могут способствовать расширению использования ресурсов посредством краудсорсинга, принятию решений в режиме реального времени, инклюзивности горожан к обсуждению городских проблем, изменению их потребительского поведения для успешного внедрения ЦЭ.

«Умные» здания и «умное» ЖКХ также представляют собой актив циркулярности и устойчивости. Интеллектуальные компоненты технологий I4.0 во время строительства и эксплуатации городских зданий и городской инфраструктуры могут использоваться для облегчения необходимых потоков данных на всех этапах жизненного цикла «умных» зданий/коммуникаций, потребления водных и энергетических ресурсов. Внедрение «паспортов» строительных материалов может способствовать расширению практик ПИ стройматериалов при сносе или реконструкции городских объектов. Так, А. Шмелева и С. Безделов (Schmeleva and Bezdelov, 2020) отмечают, что двумя ключевыми подходами к ЦЭ в сфере городского жилья являются: строительство «умных» домов и использование технологий «умного» сноса. В результате внедрения технологий I4.0 и ЦЭ эффективность эксплуатации городских зданий и качество оказания коммунальных услуг повышается, рабочие процессы оптимизируются, риски снижаются.

В целом можно констатировать, что академические исследования по данной тематике продолжают набирать все большую популярность. Что касается практической реализации (внедрения) технологий I4.0 в рамках перехода от линейной модели экономики к циркулярной, то только 18% компаний учитывают их влияние на трансформацию производства с точки зрения достижения циркулярности и УР (Kamble et al., 2018). Данное положение можно объяснить, в том числе отсутствием данных об использованном продукте (такие данные могут быть полезны для понимания параметров, связанных с внедрением R-стратегий и выявления оптимальных вариантов для процесса «окончания срока службы» (*End-of-Life*)¹⁰ для конкретных компонентов продукта), а также отсутствием достоверных оценок эффективности внедрения тех или иных технологий I4.0 для усиления R-стратегий и целесообразности самой R-стратегии для достижения УР на предприятиях/отраслях.

Экосистемное сотрудничество внутри компаний и отраслей, а также между отраслями может восполнить эти пробелы: данные о продукте и его компонентах передаются

¹⁰ См. подробнее, например, Francesco Marica (2020), “Le fasi del ciclo di vita di un prodotto: cosa significa BOL – MOL – EOL”, available at: <https://www.sfridoo.com/2020/01/10/rifiuti/le-fasi-della-vita-di-un-prodotto-cosa-significa-bol-mol-eol/> (Accessed 12.07.2022).

заинтересованным сторонам, соединяя их через информационно-цифровые платформы, что делает процессы реализации R-стратегий более эффективными и способствует УР.

5. Выводы

21-й век характеризуется ускорением технологического развития и экономического роста, которые все еще сопровождаются увеличением потребления ресурсов, образованием все большего количества отходов и выбросов. По этим причинам цели УР остаются особенно актуальными, а их достижение зависит, в т.ч. от возможностей, которые предоставляют ЦЭ и внедрение технологий I4.0.

Исследование влияния технологий I4.0 на УР через призму циркулярности привлекает все большее внимание со стороны ученых и практиков. Проведенное исследование позволяет констатировать, что научные круги сосредоточили свое внимание на исследовании вопросов влияния отдельных технологий I4.0 на ЦЭ, либо воздействия на отдельные этапы жизненного цикла продукта тех или иных технологий, либо рассматривают взаимосвязь отдельных отраслей и отдельных технологий. Что касается бизнеса, то он направлен в основном на изучение вопросов влияния подобных технологий на конкурентоспособность, не всегда принимается во внимание взаимосвязь технологий I4.0 и ЦЭ, даже в ситуациях, когда ставится цель перехода от линейной модели к циркулярной и достижение устойчивости. Вместе с тем технологии I4.0 и ЦЭ позволяют максимизировать эффективность использования ресурсов и продуктов, способствуют продлению их срока службы, создают ценность из отходов, обеспечивают энергоэффективность и пр., формируя таким образом условия для достижения целей УР.

Данное исследование находится на стыке двух тем: ЦЭ и технологии I4.0. Хотя использование подобных технологий растет во многих отраслях, и существует понимание, что технологии I4.0 оказывают влияние на достижение целей устойчивого развития (в т.ч. 17 ЦУР ООН) и на переход к циркулярным моделям экономики, их вклад в данные процессы все еще не является хорошо изученной областью.

На основе проведенного исследования можно сделать заключение, что технологии I4.0 в целом оказывают положительное влияние на ЦЭ. Вместе с тем влияние технологий I4.0 на циркулярность и устойчивость варьируется в зависимости от конкретной технологии, R-стратегии, отрасли. Исследование подобного влияния играет важную роль в понимании того, как разворачивается процесс принятия ЦЭ и целесообразности внедрения тех или иных технологий I4.0. Этот аспект необходимо учитывать при разработке стратегий перехода к ЦЭ (в т.ч. в различных отраслях) и внедрения R-стратегий. Кроме того, директивные органы и заинтересованные стороны должны принимать к сведению подобное влияние и поощрять политику, которая побуждает компании усиливать свои действия, направленные на использование технологий I4.0, и, таким образом, содействовать процессам перехода к экономике замкнутого цикла. Вместе с тем следует учитывать, что опыт одной отрасли в подобных вопросах нелегко перенести в другую из-за специфики самих отраслей.

Исследование имеет ограничения в отношении того, что не рассматривались препятствия для принятия практик ЦЭ и внедрения технологий I4.0 для достижения УР. В частности, речь идет о финансовых, институциональных, законодательных ограничениях; важности уровня профессиональных компетенций, в т.ч. в области цифровых навыков; недостаточности знаний касательно эффективности от инвестиций в ту или иную технологию, возможного взаимного (усиления) влияния технологий I4.0; неопределенности в отношении будущих выгод, получаемых от производства по сценарию замкнутого цикла и т.п.

Данное исследование вносит вклад в совокупность знаний для успешного внедрения ЦЭ путем надлежащего использования технологий I4.0 для достижения целей УР, устранения сбоев, которые могут препятствовать достижению поставленных целей. Исследователи и практики могут найти эту работу полезной для определения отправных точек для последующих исследований в данном направлении, задания приоритетов стратегических инициатив, достижения новых/улучшенных циркулярных стратегий.

Литература / References

1. Ерзнкян, Б.А. и Фонтана, К.А. (2021), “Циркулярная экономика в водной сфере: элементы, процессы, рекомендации”, *Экономический анализ: теория и практика*, т. 20, № 6, с. 990-1013, DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.20.6.990>. [Yerznkyan, B.H. and Fontana, K.A. (2021), “Circular Economy in the Water Sector: Elements, Processes, Recommendations”, *Economic Analysis: Theory and Practice*, vol. 20, no. 6, pp. 990-1013, DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.20.6.990>].
2. Ерзнкян, Б.А. и Фонтана, К.А. (2022), “Современная городская политика и перспективы реализации концепции «умного города»”, *Проблемы рыночной экономики*, № 1, с. 58-81, DOI: 10.33051/2500-2325-2022-1-58-81. [Yerznkyan, B.H. and Fontana, K.A. (2022), “Modern urban policy and prospects for the implementation of the concept of «smart city»”, *Market economy problems*, vol. 1, pp. 58-81, DOI: 10.33051/2500-2325-2022-1-58-81].
3. Bag, S., Gupta, S. and Kumar, S. (2021), “Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development”, *International Journal of Production Economics*, vol. 231, 107844, DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107844.
4. Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. and Sarkis, J. (2020), “Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective”, *International Journal of Production Economics*, vol. 229, 107776, DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107776.
5. Bi, Z.M., Liu, Y., Baumgartner, B., Culver, E., Sorokin, J., Peters, A., Cox, B., Hunnicutt, J., Yurek, J. and O'Shaughnessy, S. (2015), “Reusing industrial robots to achieve sustainability in small and medium-sized enterprises (SMEs)”, *Industrial Robot*, vol. 42, no. 3, pp. 264-273, DOI: 10.1108/IR-12-2014-0441.
6. Bloomfield, M. and Borstrock, S. (2018), “Modelix. The additively manufactured adaptable textile”, *Materials Today Communications*, vol. 16, pp. 212-216, DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.04.002.
7. Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M. and Saccani, N. (2018), “Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies”, *Sustainability*, vol. 10 (3), p. 639, DOI: 10.3390/su10030639.
8. “Changing how We Produce and Consume: New Circular Economy Action Plan Shows the Way to a Climate Neutral, Competitive Economy of Empowered Consumers”, Press Release (2020), *European Commission*, Brussels, available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_420 (Accessed 01.06.2022).
9. Chauhan, A., Jakhar, S. and Chauhan, C. (2021), “The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, 123854, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123854.
10. Cheng, T., Kamble, S., Belhadi, A., Ndubisi, N., Lai, Kee-hung and Kharat, M. (2021), “Linkages between big data analytics, circular economy, sustainable supply chain flexibility, and sustainable performance in manufacturing firms”, *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2021.1906971.
11. Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreón, J. and Worrell, E. (2019), “Towards sustainable development through the circular economy – A review and critical assessment on current circularity metrics”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 151, 104498, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104498.
12. de Sousa Jabbour, A., Jabbour, C., Filho, M. and Roubaud, D. (2018a), “Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations”, *Annals of Operations Research*, vol. 270, pp. 273-286, DOI: 10.1007/s10479-018-2772-8.
13. de Sousa Jabbour, A., Jabbour, C., Foropon, C. and Filho, M. (2018b), “When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors”, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 132, pp. 18-25, DOI: 10.1016/j.techfore.2018.01.017.
14. Dev, N., Shankar, R. and Qaiser, F. (2020), “Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 153, 104583, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104583.
15. Elkington, J. and Rowlands, I. (1999), “Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business”, *Alternatives Journal, Waterloo*, vol. 25 (4), pp. 42-43, available at: <https://www.proquest.com/openview/804cc9d98196ef6e26d88748e89f8db0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=35934> (Accessed 11.07.2022).

-
16. Esmacilian, B., Sarkis, J., Lewis, K. and Behdad, S. (2020), "Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 163, 105064, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105064.
 17. Ge, X. and Jackson, J. (2014), "The Big Data Application Strategy for Cost Reduction in Automotive Industry", *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, vol. 7 (2), pp. 588-598, DOI: 10.4271/2014-01-2410.
 18. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. and Hultink, E. (2017), "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?", *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757-768, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
 19. Ghoreishi, M. and Happonen, A. (2020), "New promises AI brings into circular economy accelerated product design: a review on supporting literature", *E3S Web of Conferences. Section Environmental Economy and Management*, vol. 158, 06002, DOI: 10.1051/e3sconf/202015806002.
 20. Gligoric, N., Krco, S., Hakola, L., Vehmas, K., De, S., Moessner, K., Jansson, K., Polenz, I. and Van Kranenburg, R. (2019), "SmartTags: IoT Product Passport for Circular Economy Based on Printed Sensors and Unique Item-Level Identifiers", *Sensors (Basel) Switzerland*, vol. 19 (3), 586, DOI: 10.3390/s19030586.
 21. Goyal, S., Chauhan, S. and Mishra, P. (2021), "Circular economy research: A bibliometric analysis (2000-2019) and future research insights", *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, 125011, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125011.
 22. Haigh, L., de Wit, M., von Daniels, C., Collorichio, A. and Hoogzaad, J. (2021), *The Circularity Gap Report 2021*, CIRCLE Economy, Amsterdam, p. 37, available at: <https://www.circular-economy.com/resources/circularity-gap-report-2021>. (Accessed 13.09.2022).
 23. Haupt, M., Vadenbo, C. and Hellweg, S. (2016), "Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight into the Swiss Waste Management System", *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21 (3), pp. 615-627, DOI: 10.1111/jiec.12506.
 24. Ingemarsdotter, E., Jamsin, E., Kortuem, G. and Balkenende, R. (2019), "Circular strategies enabled by the internet of things – A framework and analysis of current practice", *Sustainability, Switzerland*, vol. 11 (20), 5689, DOI: 10.3390/su11205689.
 25. Jayaraman, V., Ross, A. and Agarwal, A. (2008), "Role of information technology and collaboration in reverse logistics supply chains", *International Journal of Logistics*, vol. 11 (6), pp. 409-425, DOI: 10.1080/13675560701694499.
 26. Kagermann, H., Lukas, W. and Wahlster, W. (2011), "Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution", *VDI Nachrichten*, Nr. 13-2011, Seite 2, pp. 2-3, available at: https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf (Accessed 17.06.2022). [Kagermann, H., Lukas, W. and Wahlster, W. (2011), "Industry 4.0: With the Internet of Things on the Way to the 4th Industrial Revolution", *VDI Nachrichten*, Nr. 13-2011, Page 2, pp. 2-3, available at: https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf (Accessed 17.06.2022)]. (In german).
 27. Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0: Monographie*, Forschungsunion. Wirtschaft und Wissenschaft begleiten die Hightech-Strategie, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, available at: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/umsetzungsempfehlungen_industrie4_0.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Accessed 23.07.2022). [Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013), *Implementation recommendations for the future project Industry 4.0: Final report of the Working group Industry 4.0: Monograph*, Research Union. Business and science accompany the high-tech strategy, German Academy of Science and Engineering, available at: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/umsetzungsempfehlungen_industrie4_0.pdf?__blob=publicationFile&v=1]. (In german).
 28. Kamble, S., Gunasekaran, A. and Gawankar, S. (2018), "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives", *Process Safety and Environment Protection*, vol. 117, pp. 408-425, DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
 29. Kekkonen, A (2021), "Top IT trends for a circular economy", *Tondo*, available at: <https://www.tondo.tech/blog/2021/03/12/top-it-trends-for-a-circular-economy/> (Accessed 04.04.2022).
 30. Kirchherr, J., Reike, D. and Hekkert, M. (2017), "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127, pp. 221-232, DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
-

31. Kokkinos, K., Karayannis, V. and Moustakas, K. (2020), "Circular bio-economy via energy transition supported by Fuzzy Cognitive Map modeling towards sustainable low-carbon environment", *Science of The Total Environment*, vol. 721, 137754, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137754.
32. Lahrou, Y. and Brissaud, D. (2018), "A Technical Assessment of Product/Component Remanufacturability for Additive Remanufacturing", *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 142-147, DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.105.
33. Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landin, G., Landeta-Manzano, B. and Uriarte-Gallastegi, N. (2021), "Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy", *Journal of Cleaner Production*, vol. 321, 128944, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128944.
34. Lin, K.-P., Yu, C.-M. and Chen, K.-S. (2019), "Production data analysis system using novel process capability indices-based circular economy", *Industrial Management & Data Systems*, vol. 119, no. 8, pp.1655-1668, DOI: 10.1108/IMDS-03-2019-0166.
35. Machado, C., Winroth, M. and Ribeiro da Silva, E. (2020), "Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda", *International Journal of Production Research*, vol. 58 (5), pp. 1462-1484, DOI: 10.1080/00207543.2019.1652777.
36. Miaoudakis, A., Fysarakis, K., Petroulakis, N., Alexaki, S., Alexandirs, G., Ioannidis, S., Spanoudakis, G., Katos, V. and Verikoukis, C. (2020), "Pairing a Circular Economy and the 5G-Enabled Internet of Things: Creating a Class of? Looping Smart Assets?", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15 (3), pp. 20-31, DOI: 10.1109/MVT.2020.2991788.
37. McKibben, B. (2007), *Deep Economy: The Wealth of Communities and the Durable Future*, Henry Holt and Company, New York, 261 p., available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/4752/8e09a6afe6cb74ff855a00674048ce70f88c.pdf> (Accessed 27.07.2022).
38. Merli, R., Preziosi, M. and Acampora, A. (2018), "How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review", *Journal of Cleaner Production*, vol. 178, pp. 703-722, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.112.
39. Nandi, S., Sarkis, J., Hervani, A. and Helms, M. (2021), "Redesigning Supply Chains using Blockchain-Enabled Circular Economy and COVID-19 Experiences", *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 10-22, DOI: 10.1016/j.spc.2020.10.019.
40. Nascimento, D., Alencastro, V., Quelhas, O., Caiado, R., Garza-Reyes, J., Rocha-Lona, L. and Tortorella, G. (2019), "Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal", *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 30 (3), pp. 607-627, DOI: 10.1108/JMTM-03-2018-0071.
41. Pavlo, S., Fabio, C., Hakim, B. and Mauricio, C. (2018), "3D-Printing Based Distributed Plastic Recycling: A Conceptual Model for Closed-Loop Supply Chain Design", *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Proceedings, Germany, 17-20 June, DOI: 10.1109/ICE.2018.8436296.
42. Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Väisänen, J. (2021), "Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy – Multiple case study", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, 105155, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105155.
43. Reike, D., Vermeulen, W. and Witjes, S. (2018), "The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 246-264, DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.
44. Rejeski, D., Zhao, F. and Huang, Y. (2018), "Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 19, pp. 21-28, DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.019.
45. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* (1987), Brundtland Report, United Nations World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford.
46. Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D. and Terzi, S. (2020), "Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review", *International Journal of Production Research*, vol. 58 (6), pp. 1662-1687, DOI: 10.1080/00207543.2019.1680896.
47. Sadeghi, M., Mahmoudi, A., Deng, X. and Luo, X. (2022), "Prioritizing requirements for implementing blockchain technology in construction supply chain based on circular economy: Fuzzy Ordinal Priority Approach", *International Journal of Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1007/s13762-022-04298-2.

48. Sandvik, I. and Stubbs, W. (2019), "Circular fashion supply chain through textile-to-textile recycling", *Journal of Fashion Marketing and Management*, vol. 23 (3), pp. 366-381, DOI: 10.1108/JFMM-04-2018-0058.
49. Schmeleva, A. and Bezdelov, S. (2020), "Environmental Aspects of the Housing Renovation Program in Moscow Under Sharing and Circular Economy Conditions", *E3S Web of Conferences*, vol. 203, 05013, DOI: 10.1051/e3sconf/202020305013.
50. Shrouf, F., Ordieres, J. and Miragliotta, G. (2014), "Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm", *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 697-701, DOI: 10.1109/IEEM.2014.7058728.
51. Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G. and Soto-Oñate, D. (2019), "Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice", *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 952-961, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.271.
52. Tang, M. and Liao, H. (2021), "Multi-attribute large-scale group decision making with data mining and subgroup leaders: An application to the development of the circular economy", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 167, 120719, DOI: 10.1016/j.techfore.2021.120719.
53. *Emissions Gap Report 2019* (2019), UNEP, 108 p., available at: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019> (Accessed 18.03.2022).
54. Waibel, M., Steenkamp, L., Moloko, N. and Oosthuizen, G. (2017), "Investigating the effects of smart production systems on sustainability elements", *Procedia Manufacturing*, vol. 8, pp. 731-737, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.094.
55. *Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution. White Papers* (2019), World Economic Forum, 40 p., available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network.pdf (Accessed 29.03.2021).
56. Zhenjian, L., Jiahua, L. and Yunbao, X. (2021), "Research on the path of agriculture sustainable development based on the concept of circular economy and big data", *Acta Agriculture Scandinavica, Section B – Soil&Plant Science*, vol. 71 (9), pp. 1024-1035, DOI: 10.1080/09064710.2021.1929436.

Об авторах

Ерзнкян Баграт Айкович, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва.

Фонтана Каринэ Аркадьевна, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва.

About authors

Bagrat H. Yerznkyan, Doctor of Sci (Econ.), Professor, Principal Researcher, Head of Lab., Central Economics and Mathematics Institute of RAS, Moscow.

Karine A. Fontana, Candidate of Sci (Econ.), Senior Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of RAS, Moscow.