

ИИ И ЦИРКУЛЯРНАЯ ЭКОНОМИКА: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ (ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ)

DOI: <https://doi.org/10.24891/sojkbm>

EDN: <https://elibrary.ru/sojkbm>

Ольга Сергеевна ТАРАСОВА

ответственный автор, кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой экологической безопасности и управления природопользованием, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ» (НГУЭУ),

Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: tosgeo@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4250-7259

SPIN: 4269-5824

Анна Александровна АЛЕТДИНОВА

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина),

Москва, Российская Федерация

e-mail: andreww@academ.org

ORCID: 0000-0002-9257-4735

SPIN: 4508-6876

История статьи:

Рег. № 708/2025

Получена 31.10.2025

Одобрена 10.11.2025

Доступна онлайн

30.03.2026

Специальность: 5.2.3

УДК 332.1:332.055

JEL: O44, Q55

Ключевые слова:

циркулярная экономика, региональная устойчивость, промышленный симбиоз, искусственный интеллект, цифровая трансформация, вторичные ресурсы

Аннотация

Предмет. Зарубежный опыт технологических, организационных и социальных аспектов использования искусственного интеллекта при переходе на модели циркулярной экономики в контексте региональной устойчивости.

Цели. Выявить возможности использования искусственного интеллекта для поддержки перехода регионов к циркулярной экономике и предложить модель интеграции искусственного интеллекта.

Методология. В процессе исследования использовались методы теоретического анализа зарубежных научных источников, системный и структурный анализ региональных экономических систем и факторов их устойчивости, сравнительный анализ практик внедрения искусственного интеллекта в регионах.

Результаты. Определены аспекты перехода регионов к циклической экономике и организационные механизмы использования искусственного интеллекта. Выявлены технологические возможности искусственного интеллекта. Исследованы барьеры внедрения искусственного интеллекта в циркулярные экономические модели.

Выводы. Сделан вывод о перспективности внедрения принципов циркулярной экономики с использованием инструментов искусственного интеллекта. Результаты исследования могут быть использованы органами региональной власти, бизнесом и научным сообществом для повышения экологической, социальной и экономической устойчивости на региональном уровне.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2025

Для цитирования: Тарасова О.С., Алетдинова А.А. ИИ и циркулярная экономика: новые возможности для региональной устойчивости (зарубежный опыт) // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2026. – № 3. – С. 95 – 128. DOI: 10.24891/sojkbm EDN: SOJKBM

Современные региональные экономические системы испытывают возрастающее давление экологических ресурсных и социальных вызовов. Линейная хозяйственная модель, построенная по принципу «взять – произвести – потребить (использовать) – выбросить», является одной из причин неэффективного использования ресурсов, роста отходов производства и потребления, усиления негативного воздействия на окружающую среду. Поддержание устойчивости региональных экономических систем может быть обеспечено переходом на другую модель хозяйствования – циркулярную экономику.

Модель циркулярной экономики предлагает новый взгляд на использование ресурсов и отходов и рассматривается как одна из стратегических альтернатив линейной экономики, обеспечивающих замедление потребления первичных природных ресурсов, вовлечение отходов в качестве вторичных материальных ресурсов в повторный оборот и формирование промышленных симбиозов.

Переход на модели циркулярной экономики рассматривается как основное условие повышения эффективности использования природных ресурсов, минимизации отходов и обеспечения долгосрочной устойчивости территориального развития.

Особая роль в этом процессе отводится цифровым технологиям, в частности искусственному интеллекту (ИИ), обладающему уникальным потенциалом в области обработки больших массивов данных, предиктивном моделировании материальных и энергетических потоков, управлении сложными системами и создании цифровых двойников предприятий и территорий.

Эти возможности позволяют существенно ускорить трансформацию региональных экономик, а ИИ способен выступать драйвером интеграции технологических, организационных и социальных решений, необходимых для внедрения и реализации принципов циркулярной экономики.

Предметом настоящего исследования являются технологические, организационные и социальные аспекты применения ИИ при переходе регионов на модели экономики замкнутого цикла в контексте повышения их устойчивости.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью поиска системных механизмов интеграции ИИ в региональные экономические процессы, что позволит выработать новые подходы к управлению ресурсами, повысить эффективность территориального развития и обеспечить достижение целей экономической устойчивости.

Цель работы заключается в исследовании возможностей использования ИИ для поддержки перехода к экономике замкнутого цикла и разработке концептуальной модели, отражающей интеграцию технологических, организационных и социальных аспектов потенциала ИИ в целях повышения региональной устойчивости.

Достижению цели будет способствовать решение следующих задач.

1. Выявить ключевые экологические, экономические, социальные, институциональные и технологические предпосылки перехода регионов к циркулярной экономике.
2. Проанализировать современные подходы к переходу на модели циркулярной экономики в условиях цифровизации.
3. Определить технологические, организационные и социальные возможности применения ИИ для реализации принципов циркулярной экономики.

4. Сформулировать практические рекомендации для органов власти, бизнеса и научного сообщества по внедрению ИИ в процессы циркулярной трансформации регионов.

Методологической основой исследования являются концепции устойчивого развития, циркулярной экономики и цифровой трансформации региональных экономических систем. В работе применяется междисциплинарный подход, интегрирующий положения экономической теории, экологического менеджмента и информационных технологий.

Для достижения целей исследования использовался системный подход при рассмотрении региональной экономической системы как сложного социо-эколого-экономического объекта, включающего взаимосвязанные и взаимозависимые подсистемы. Сравнительный анализ применялся для сопоставления международного опыта применения ИИ в проектах циркулярной экономики.

Контент-анализ и библиометрический анализ научных публикаций позволили определить ведущие исследовательские направления и тренды в области ИИ и экономики замкнутого цикла.

Основная цель экономического роста – прирост капитала от жизненного цикла продукта, начиная с добычи первичных ресурсов, производства товаров, их потребления и заканчивая утилизацией, полагает M.S. Andersen [1].

Традиционная линейная модель экономического развития, основанная на принципах «взять – произвести – использовать – выбросить», в современных условиях демонстрирует свою несостоятельность. Ее основные недостатки проявляются в нерациональном использовании первичных природных ресурсов, лавинообразном нарастании количества отходов производства и потребления, увеличении экологического ущерба и высокой зависимости регионов от внешних поставок сырья и энергии [2].

В условиях индустриализации и увеличения объемов потребления линейная экономика обеспечивала краткосрочный рост, однако в настоящее время она становится источником системных экологических, социальных и экономических рисков.

Именно поэтому возникает объективная необходимость перехода региональных экономических систем к моделям циркулярной экономики, а сам переход определяется совокупностью взаимосвязанных факторов экономического, экологического, социального, институционального и технологического характера [3, 4].

Каждая группа предпосылок формирует собственный набор стимулов и ограничений, которые в комплексе обуславливают необходимость отказа от линейной экономики и поиска новых инструментов поддержания региональной устойчивости.

Экономические предпосылки проявляются в необходимости повышения эффективности использования ресурсов и энергопотребления, снижения издержек, связанных с негативным воздействием на окружающую среду и необходимостью возмещения экологического ущерба [5].

Увеличение цен на сырье и энергоносители стимулирует предприятия к поиску альтернативных энергетических источников и направлений вторичного использования материалов. Одновременно формируются новые рыночные ниши, связанные с «зелеными» технологиями, переработкой отходов, сервисными бизнес-моделями («продукт как услуга»), открывающие новые возможности для инвестиций [6].

Важным фактором влияния выступает и расширение механизмов финансирования в рамках ESG-стратегий и «зеленых» облигаций, усиливающих экономическую мотивацию регионов и компаний к внедрению принципов циркулярной экономики.

Экологические предпосылки связаны с нарастающим антропогенным давлением на природную среду. Рост объемов отходов и ограниченность возможностей их утилизации в рамках отсутствия первичной сортировки и традиционных полигонных систем приводят к деградации земель, загрязнению почвенно-водных экосистем и атмосферного воздуха [7].

Одновременно с этим отдельные регионы сталкиваются с истощением природно-ресурсного потенциала, что особенно критично для территорий с развитым промышленным производством.

Влияние климатических изменений, проявляющееся в учащении экстремальных и опасных погодных явлений и увеличении рисков для производственной и социальной инфраструктуры, усиливает актуальность поиска устойчивых моделей развития.

В основе социальных предпосылок лежат повышение уровня экологической осведомленности населения и формирование культуры ответственного потребления, особенно среди молодежи. Спрос общества на экологическую безопасность, вовлеченность граждан в раздельный сбор и переработку отходов, а также распространение практик повторного использования и совместного пользования, создают базу для широкого общественного принятия циркулярных моделей [8, 9].

Дополнительным стимулом служит потенциал создания новых рабочих мест в сфере экотехнологий, переработки отходов, зеленого предпринимательства и цифровых сервисов, способствующих повышению уровня социальной устойчивости регионов и снижению рисков ухудшения качества жизни [9].

Институциональные предпосылки обусловлены развитием государственной политики и системы регулирования в области экологической безопасности и обращения с отходами [10, 11]. Важнейшую роль играют национальные стратегии устойчивого развития, а также механизмы расширенной ответственности производителей (РОП), стимулирующие бизнес к внедрению циклических производственных процессов.

На региональном уровне значимым фактором выступает реализация программ по раздельному сбору отходов, развитию перерабатывающих мощностей и внедрению стандартов экологической отчетности. Дополнительное значение имеют международные обязательства, включая Цели в области устойчивого развития ООН¹ и Парижское соглашение², задающие вектор для формирования новых правил и практик.

Решающее значение в переходе имеют технологические предпосылки, связанные с ускоренным развитием цифровых и производственных инноваций [12–15]. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, больших данных, интернета вещей и цифровых двойников позволяет анализировать, оценивать и прогнозировать материальные и энергетические потоки, оптимизировать логистику, обеспечивать прозрачность цепочек поставок.

Одновременно с этим формируются новые технологические решения в области переработки вторичного использования ресурсов, включая химическую, биотехнологическую и термическую переработку.

Развитие эко-дизайна, разработка и использование «умных» материалов с высокой ремонтпригодностью и возможностью повторного использования обеспечивают переход к принципам минимизации отходов на этапе проектирования продукции.

Таким образом, предпосылки перехода к новой экономической модели хозяйствования в регионах формируются в условиях экологических ограничений, экономических стимулов,

¹ Цели в области устойчивого развития ООН.
URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>

² Парижское соглашение. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement>

социальных запросов, институциональной поддержки и развития технологических инноваций (табл. 1).

Их комплексное взаимодействие создает условия для формирования устойчивых региональных стратегий, в которых искусственный интеллект может играть определяющую роль как инструмент интеграции и оптимизации этих процессов.

Исследуя вопрос перехода региональных экономических систем к циркулярным моделям хозяйствования, необходимо определиться с понятийным аппаратом.

В научной литературе наиболее часто используется понятие «циркулярная экономика» или «циклическая экономика», также используется понятие «экономика замкнутого цикла». Авторы не выделяют существенной разницы между этими дефинициями. Для целей настоящей статьи будем использовать понятия «циркулярная экономика» и «экономика замкнутого цикла» как синонимы.

Одним из первых наиболее полных исследований содержания понятия «циркулярная экономика» является работа J. Kirchherr, D. Reike и M. Hekkert [16]. Авторы проанализировали 114 определений понятия «циклическая экономика» и сделали вывод о том, что в настоящее время нет единого унифицированного определения.

Каждый автор по-своему понимает содержание и структуру этого вида хозяйственной деятельности при наличии общего целеполагания – повышения эффективности использования природных ресурсов и снижения величины отходов производства и потребления.

Как отмечают авторы статьи, циклическая экономика чаще всего определяется как сочетание деятельности по сокращению, повторному использованию и переработке ресурсов. Однако главная цель циклической экономики – экономическое процветание при сохранении определенного качества окружающей среды.

По мнению авторов, наблюдающиеся существенные различия в подходах к определению понятия «циркулярная экономика» могут привести к краху этой концепции. Предотвратить разрушение подхода возможно усилив его методологическую проработку [17].

В своей работе 2023 г. J. Kirchherr с коллегами проанализировали уже 221 определение и снова подчеркнули, что для перехода на новую модель необходим фундаментальный методический и философский сдвиг, так как все еще остаются вопросы относительно совместимости экономического роста и устойчивого развития в понимании сохранения ресурсов для будущих поколений.

Отсутствие единого подхода к определению понятия отмечают и другие авторы, например, M. Agyemang, S. Kusi-Sarpong, S.A. Khan и др. [18], S.A. Neves, A.C. Marques [19].

Наиболее часто используемым определением экономики замкнутого цикла или циркулярной экономики является определение, данное Фондом E. MacArthur: «циркулярная экономика – это восстановительная промышленная система, в которой ресурсы никогда не становятся отходами и повторно используются. Природа этой системы является регенеративной»³.

Также существует понятие циркулярной экономики как регенеративной экономической системы, требующей смены парадигмы и замены концепции «конца жизни» сокращением, альтернативным использованием, переработкой и восстановлением материалов по всей цепочке поставок в целях содействия сохранению ценности и устойчивому развитию, улучшению качества окружающей среды, экономическому развитию и социальному равенству на благо ныне живущих и будущих поколений [17].

³ MacArthur E. Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, vol. 2, iss. 1, pp. 23–44. URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-3-accelerating-the-scale-up-across-global>

M. Geissdoerfer с коллегами считают, что циркулярная экономика – это рекуперативный процесс, который сокращает потери ресурсов, утечки энергии и выбросы посредством циклического использования ресурсов, замедления и сужения энергетических циклов за счет создания долговечных продуктов, качественного сервисного обслуживания, повторного использования, переработки и повторного производства [20].

K.O. Zacho, M.A. Mosgaard и H. Riisgaard говорят о том, что циркулярная экономика увеличивает жизненный цикл продуктов, компонентов и материалов за счет внедрения практики повторного использования, ремонта и переработки [21].

P. Morsetto определяет циклическую экономику как экономическую модель, направленную на эффективное использование ресурсов посредством минимизации отходов, долгосрочного сохранения ценности, сокращение потребления первичных ресурсов и замкнутых циклов производства продуктов, их компонентов и материалов при поддержании качества среды и достижении социально-экономических выгод [22].

Обобщая эти точки зрения, определим, что циркулярная экономика – это модель регионального развития, основанная на принципах эффективного использования и регенерации природных ресурсов, использующая замкнутые циклы обращения материалов и энергии на основе интеграции технологических инноваций.

Такая модель предполагает сохранение и продление жизненного цикла продукции и материалов посредством повторного использования, проектирования с учетом ремонтпригодности, переработки, а также создания промышленных симбиозов на микро-, мезо- и макроуровнях.

Важно отметить, что внедрение моделей циркулярной экономики должно быть направлено не только на использование технологических инициатив, но и на обеспечение социального равенства и стабильности при сохранении качественной природной среды.

В отличие от линейной экономики, такой подход ориентирован на разрыв зависимости экономического роста от потребления невозобновляемых ресурсов, минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и достижение комплексной региональной устойчивости, включающей экологические, экономические и социальные эффекты.

Стоит отметить, что принципы циклической экономики применялись в экономических целях на протяжении последних двухсот лет и реализовывались через промышленные симбиозы, в которых побочные продукты одной отрасли служили ресурсами для другой [23]. Отчасти аналогичный подход использовался и в концепции территориальных производственных комплексов.

В научной литературе концепции циркулярной экономики обычно группируются в подходы R-strategies (Reduce, Reuse, Recycle), базовый подход 3R в дальнейшем был расширен до 4R, 6R и даже 10R.

К базовым концепциям относятся:

- Reduce (сокращение) – снижение уровня использования первичных ресурсов и сокращение объемов отходов;
- Reuse (повторное использование) – вторичное применение продукта или его компонентов без значительной переработки;
- Recycle (переработка) – превращение отходов в новые материалы или ресурсы.

Расширенные концепции включают:

- Refuse (отказ) – отказ от использования определенных материалов или продуктов, особенно одноразовых и трудноперерабатываемых;

- Repair (ремонт) – продление срока службы продукции путем ее восстановления;
- Refurbish (обновление) – восстановление продукции до современного уровня функциональности;
- Remanufacture (ремануфактура) – полное восстановление использованных изделий до состояния «как новые»;
- Rethink (переосмысление) – разработка новых моделей потребления и бизнеса (например, сервисные модели «продукт как услуга»);
- Recover (восстановление энергии) – использование энергетической ценности отходов, которые невозможно переработать иным способом [24].

Ядром циркулярной экономики в современных исследованиях являются 3R (Reduce, Reuse, Recycle), а расширение подходов до 6R–10R углубляют и детализируют модель.

Реализация многообразных концепций циркулярной экономики как новой парадигмы хозяйствования требует комплексных междисциплинарных решений, охватывающих управление потоками материалов, оптимизацию логистики, организацию промышленных симбиозов и формирование новых моделей потреблений.

Успешная реализация этих задач невозможна без использования современных цифровых технологий. Среди них – искусственный интеллект (ИИ), который рассматривается многими исследователями как ведущий драйвер перехода к циркулярной модели [25–27].

Его потенциал обусловлен способностью анализировать сложные системы, выявлять скрытые закономерности в потоках ресурсов и отходов, предлагать оптимальные решения и обеспечивать интеллектуальную поддержку управленческих решений на различных уровнях [28].

Между тем изучение вопросов использования ИИ в развитии устойчивых моделей хозяйственной деятельности находится на стадии методологического становления ввиду фрагментарных исследований и отсутствия унифицированного подхода при широком многообразии подходов и методологий в научной среде [29, 30].

Научное приращение знаний в данной работе направлено на продолжение исследований в сфере использования потенциала ИИ для перехода на новые модели устойчивого хозяйствования.

Современные подходы к устойчивому развитию в основном базируются на триаде «экономика – общество – экология», где устойчивость понимается как баланс трех компонент, обеспечивающих долгосрочную сбалансированность развития. Однако для региональных экономических систем этого недостаточно, так как они функционируют в условиях высокой динамики, неопределенности и многослойных связей между внутренними и внешними факторами.

В этом контексте устойчивость должна трактоваться не только как реализация принципов концепции устойчивого развития, но и как системное свойство региональной экономической системы, определяющее ее способность сохранять целостность, адаптивность и воспроизводство природно-ресурсного и социального потенциала при разнообразном воздействии внешних факторов.

Рассмотрение устойчивости в системном контексте позволяет перейти от статистического понимания баланса между экономическим ростом, качеством окружающей среды и социальной справедливостью к динамическому анализу механизмов адаптации и трансформации регионов. В этой логике циркулярная экономика выступает как инструмент, создающий новые механизмы ресурсосбережения и повторного использования материалов, сни-

жение нагрузки на экосистемы и вовлечение населения в процессы экологически ответственного потребления.

Поэтому использование потенциала ИИ при переходе к циркулярным моделям хозяйствования на региональном уровне должно происходить по трем измерениям:

- технологическое измерение должно быть направлено на разработку и внедрение инновационных подходов к оптимизации использования ресурсов, создание цифровых двойников, интеллектуальную переработку отходов и прогнозирование материальных потоков;
- организационное измерение включает организацию и поддержку развития промышленных симбиозов, использование цифровых платформ для обмена ресурсами и информацией о материальных потоках, оптимизацию региональных цепочек поставок;
- социальный вектор должен быть направлен на формирование новых профессий и компетенций, вовлечение населения в экологические инициативы, оценку социальных эффектов от внедрения экономики замкнутого цикла.

Эти три измерения использования ИИ позволяют объединить разрозненные направления развития циркулярной экономики в единую систему. Это дает возможность одновременно решать задачи обеспечения экономического роста, сохранения качества окружающей среды, рационального использования ресурсов, поддержания социальной справедливости и равенства возможностей.

Использование ИИ в сочетании с расширенными принципами циркулярной экономики формирует своего рода «каркас устойчивости», позволяющий региональным экономическим системам сохранять функциональную целостность и устойчивую траекторию развития при сохранении качества окружающей среды, эффективности использования ресурсов и поддержании социального баланса.

В отличие от традиционных моделей, основанных лишь на концепции устойчивого развития, данный подход генерирует устойчивость в качестве системного свойства, позволяющего региональной экономике адаптироваться и развиваться даже в условиях нарастающего числа экологических и социально-экономических проблем.

Формирование «каркаса устойчивости» региональных экономических систем с опорой на циркулярную экономику и искусственный интеллект задает рамочные основания для системного развития. Однако для практической реализации необходим анализ конкретных технологий ИИ, которые могут быть использованы в технологическом, организационном и социальном направлениях использования потенциала ИИ.

Одной из главных проблем современной линейной системы хозяйствования является проблема образования отходов производства и потребления. Растущий объем отходов требует инновационных и устойчивых решений [31–34]. Традиционные подходы к вопросам обращения с отходами, когда отходы собирались и вывозились на полигоны в неизменном виде, показали свою неэффективность.

Активное развитие и внедрение ИИ в нашу жизнь открыло совершенно новые перспективы и подходы к решению этой задачи. Технологии машинного обучения, нейронные сети и цифровые двойники, обеспечивающие интеллектуальную сортировку и переработку отходов, а также предиктивное моделирование потоков ресурсов позволяют эффективно снижать объемы отходов [32].

Анализ научных работ по вопросам внедрения технологий ИИ в сферу обращения с отходами в целом и возможности использования ИИ в экономике замкнутого цикла позволил выявить наиболее популярные направления использования цифровых технологий в этой сфере (табл. 2).

Таким образом, технологический потенциал ИИ должен быть ориентирован на автоматизацию процессов, их роботизацию и снижение объемов человеческого труда. Эти технологии увеличивают производительность труда, повышают точность классификации и сортировки отходов, снижают риски для состояния здоровья людей, работающих в сфере обращения с отходами.

Организационные механизмы использования ИИ фокусируются на трансформации структур управления, интеграции предприятий и региональных систем в единую информационную сеть, в которой цифровые технологии выступают инструментами координации, мониторинга и оптимизации коллективных действий.

Если технологический вектор направлен на автоматизацию отдельных процессов, то организационный вектор подразумевает создание системных структур, таких как промышленные симбиозы, оптимизированные цепочки поставок и платформы для обмена данными. Эти системные процессы будут формировать условия для перехода регионов к моделям экономики замкнутого цикла и принятия управленческих решений на основе данных.

Переход к циркулярной модели хозяйствования требует координации действий большого числа участников – предприятий, органов власти, исследовательских организаций, гражданского общества, – интересы и ресурсы которых требуется объединить для достижения общих целей повышения эффективности использования ресурсов и минимизации образующихся отходов в процессах производства и потребления.

В таких условиях ИИ становится инструментом интеграции и координации организационных процессов, обеспечивая прозрачность потоков ресурсов и материалов, автоматизацию обмена информацией и повышение эффективности управленческих решений.

Можно выделить следующие направления использования организационного потенциала ИИ.

Создание и использование интеллектуальных платформ как экосистем циркулярного взаимодействия между заинтересованными участниками. Интеллектуальные цифровые платформы направлены на формирование и поддержание связей между участниками региональных экосистем циркулярной экономики на основе ИИ и позволяют:

- формировать динамические базы данных о потоках ресурсов и отходов между предприятиями;
- выявлять потенциальные точки формирования промышленного симбиоза, в котором побочные продукты (отходы) одного производства могут быть использованы как ресурсы на другом производстве;
- оптимизировать цепочки поставок ресурсов и материалов и оптимизировать маршруты обратной логистики;
- обеспечивать мониторинг эффективности циркулярных связей в режиме реального времени [35–38].

Создание промышленных симбиозов на основе интеллектуальных платформ предполагает формирование новой организационной структуры производственных процессов, в которой различные субъекты объединяют в потоки свои недоиспользованные ресурсы (отходы).

Вторичные материалы, энергетические ресурсы, услуги, инфраструктура и технологии переоцениваются и повторно используются для получения конкурентных преимуществ и снижения нагрузки на окружающую среду [39].

В настоящее время такие страны как Китай, Южная Корея и Япония разрабатывают и внедряют национальные программы по формированию промышленных симбиозов на принципах циклической экономики с использованием цифровых платформ [40–42].

На региональном уровне развиваются инициативы по преобразованию традиционных промышленных районов в эко-индустриальные парки: проект Bu-Product Synergy (BPS) в Альтамире (Мексика), промышленные парки в австралийских городах Куинана и Гладстон, промышленный парк Цинхайского соляного озера (Китай) [43–45].

Управление логистикой и жизненным циклом продукции. ИИ может быть использован для организационного управления потоками материалов и товаров на всех этапах жизненного цикла продукции. Алгоритмы оптимизации и машинного обучения позволяют прогнозировать возвратные потоки продукции, планировать переработку, ремануфактуру и распределение вторичных ресурсов [46, 47].

Применение ИИ в логистических процессах позволяет решать следующие задачи:

- планирование маршрутов обратной логистики;
- моделирование сценариев переработки и повторного использования ресурсов и материалов;
- адаптивное распределение ресурсов между предприятиями – участниками промышленного симбиоза;
- интеллектуальное управление запасами и потоками сырья.

Переход к организационной модели потоков ресурсов и материалов на принципах обратной логистики позволяет управлять цепочками создания и восстановления ценности, где каждый элемент системы становится частью единой интеллектуальной сети.

Информационная поддержка принятия управленческих решений и стратегического регионального планирования. В настоящее время ИИ активно внедряется в систему принятия решений на основе данных в сфере экологического и экономического регулирования [48, 49].

Модели принятия решений на основе ИИ могут оценивать эффективность региональных программ по обращению с отходами, прогнозировать влияние мер государственной политики на уровень ресурсопотребления, рассчитывать социальные и экологические эффекты управленческих решений.

Более того, ИИ может применяться для разработки сценариев устойчивого регионального развития, учитывающих необходимость сбалансированного решения экологических, социальных и экономических задач. Также эти задачи могут быть решены в рамках использования цифровых двойников регионов.

Цифровые двойники формируют информационную основу для принятия решений, мониторинга и интеграции участников экосистемы циркулярной технологии [50, 51]. Также они могут рассматриваться как элемент организационной архитектуры, обеспечивающий прозрачность и согласованность управленческих действий [52].

Организационные эффекты от использования ИИ. В совокупности внедрение технологий ИИ в организационный контур циркулярной экономики приводит к ряду позитивных эффектов:

- улучшению координации между предприятиями и институтами власти;
- развитию сетевых форм взаимодействия и промышленных симбиозов;
- повышению прозрачности управления ресурсами и ответственности участников;
- формированию и ускорению обратной связи между производителями, потребителями и переработчиками;
- укреплению институциональных основ региональной устойчивости.

Технологии ИИ и эффекты от их использования в организационных процессах и управлении представлены в *табл. 3*.

В этом ключе организационный вектор применения ИИ способствует формированию интеллектуальной архитектуры циркулярной экономики, в рамках которой управление потоками материалов, информации и знаниями становится неразрывным, адаптивным и направленным на достижение системной устойчивости региональных экономических систем.

Переход к экономике замкнутого цикла предполагает не только технологическую и организационную трансформацию, но и глубокие социальные изменения. Социальный вектор потенциала использования ИИ должен быть направлен на формирование новых моделей поведения, взаимодействия, потребления и занятости, необходимых для устойчивого развития региональных экономических систем в парадигме экономики замкнутого цикла.

В центре внимания должны находиться вопросы вовлечения населения, развития человеческого капитала, трансформации рынка труда и формирования устойчивой культуры потребления.

ИИ в настоящее время становится инструментом формирования новой модели общественного участия в функционировании региональных экономических систем, обеспечивающих взаимодействие общества, бизнеса и власти в процессе реализации принципов циркулярной экономики.

Цифровые платформы на основе ИИ позволяют собирать и анализировать данные о поведении и предпочтениях граждан, моделировать сценарии потребления и стимулировать вовлечение населения в процессы сортировки отходов и повторного использования ресурсов.

Так, интеллектуальные мобильные приложения и краудсорсинговые платформы помогают организовывать системы совместного использования товаров, переработки отходов и обратной логистики. ИИ также способствует формированию механизмов обратной связи с населением, что усиливает социальную ответственность и экологическую осведомленность [53, 54].

Переход на циркулярные экономические модели неизбежно будет сопровождаться появлением новых профессий и компетенций, связанных с цифровыми и экологическими технологиями: аналитиков данных в сфере циркулярной экономики, специалистов по цифровым двойникам, экодизайнеров, операторов интеллектуальных систем переработки отходов и т.п.

В этом аспекте ИИ играет ведущую роль в развитии системы образования и профессиональной переподготовки – от адаптивных платформ для онлайн-обучения до интеллектуальных систем прогнозирования спроса на трудовые ресурсы и профессии. Использование потенциала ИИ в образовании и формировании новых навыков поможет обеспечить гибкое развитие человеческого капитала и снизит социальные риски, связанные с технологической трансформацией.

Социальный вектор использования ИИ может способствовать укреплению социальной устойчивости региональных экономических систем. Использование ИИ в анализе социально-экономических данных дает возможность выявлять неравенства доступа к ресурсам, социальной инфраструктуре, моделировать последствия экологической и экономической политики для разных групп населения и разрабатывать инклюзивные меры поддержки.

Технологии ИИ могут применяться для оценки социальных эффектов внедрения циркулярной экономики: динамики уровня занятости, качества жизни, социальной вовлеченности и экологического поведения населения.

Основные направления использования технологий ИИ в социальной сфере представлены в *табл. 4*.

В совокупности использование ИИ в социальном контуре циркулярной экономики позволит:

- расширить возможности общественного участия в экологических инициативах;
- формировать культуру ответственного потребления и повышать уровень цифровой грамотности населения;
- создавать новые рабочие места и снижать уровень социальной напряженности через сглаживание уровня технологического неравенства;
- повышать социальную адаптивность и устойчивость регионов.

Однако внедрение ИИ в сферу перехода к новой модели хозяйствования сталкивается с рядом существенных препятствий [55]. На основании последних исследований можно выделить несколько групп барьеров (*табл. 5*).

Несмотря на высокий потенциал ИИ в ускорении перехода к циклической экономике, его практическое использование ограничивается рядом взаимосвязанных барьеров. Основные препятствия связаны с высокими инвестиционными издержками, дефицитом кадров с необходимыми компетенциями, регуляторной неопределенностью и социальным сопротивлением.

Эти факторы определяют сложность информационно-технологической среды экономики замкнутого цикла и предполагают принятие междисциплинарных комплексных решений. Преодоление этих барьеров возможно при условии согласованных действий государства, бизнеса, научного сообщества и гражданского общества, направленных на развитие цифровой инфраструктуры, создание образовательных программ, формирование доверия к ИИ.

Научная новизна данной работы заключается в более широком трактовании влияния циркулярной экономики на устойчивость региональных экономических систем, чем в рамках классической триады концепции устойчивого развития «экономика – общество – экология».

Устойчивость рассматривается как системное свойство региональной экономической системы, отражающее ее способность адаптироваться к внешним изменениям, воспроизводить собственные ресурсы и развиваться при сохранении экологического и социального равновесия.

Переход на модели циркулярной экономики при поддержке цифровых технологий формирует системные условия поддержания устойчивости региональных экономических систем. Интеграция технологического, организационного и социального потенциала использования ИИ обеспечивает формирование нового типа регионального управления, основанного на цифровой координации, оптимизации материальных и энергетических потоков, развитии промышленной кооперации и вовлечении общества в процессы устойчивого потребления.

Результаты исследования могут быть использованы:

- органами региональной власти при разработке стратегий цифровой и «зеленой» трансформации, программ устойчивого развития территорий и отраслей;
- промышленными предприятиями и бизнес-ассоциациями для создания цифровых платформ обмена ресурсами, оптимизации логистики и формирования промышленных симбиозов;

– образовательным и научным сообществом при подготовке специалистов в сфере ИИ, экологии и управления устойчивым развитием, а также при проведении прикладных исследований циркулярной экономики как новой модели хозяйствования.

Предложенный системный подход демонстрирует потенциал ИИ как инструмента формирования «каркаса устойчивости» региональных экономических систем, объединяющего технологические инновации, организационные механизмы и социальные инициативы в единую модель цифрового экологического развития, способную обеспечивать адаптивность и конкурентоспособность региона в долгосрочной перспективе.

Таблица 1

Предпосылки перехода регионов к циркулярной экономике

Table 1

Prerequisites for regions to transition to a circular economy

| Группа предпосылок | Содержание | Ключевые проявления |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Экологические | Ограниченность природных ресурсов, рост отходов, климатические изменения | Увеличение нагрузок на полигоны, загрязнение почв и вод, деградация экосистем, экстремальные климатические явления |
| Экономические | Необходимость повышения эффективности и снижения издержек | Рост цен на сырье и энергоносители, формирование «зеленых» рынков, новые бизнес-модели («продукт как услуга»), привлечение ESG-инвестиций |
| Социальные | Рост экологической культуры и общественного запроса на устойчивое развитие | Развитие практик ответственного потребления, вовлечение населения в проекты переработки, создание новых рабочих мест, социальная устойчивость |
| Институциональные | Государственная политика и международные обязательства | Национальные стратегии устойчивого развития, расширенная ответственность производителей (РОП), региональные программы, парижское соглашение, ЦУР ООН |
| Технологические | Развитие цифровых и производственных инноваций | ИИ, большие данные, IoT, цифровые двойники, новые методы переработки (химическая, биотехнологическая), эко-дизайн, «умные» материалы |

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Таблица 2

Технологические направления применения искусственного интеллекта в циркулярной экономике

Table 2

Technological directions for the application of artificial intelligence in the circular economy

| Технология | Что делает | Источник/пример |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Сверточные нейронные сети, (DCNN) автоматическая классификация и сортировка отходов | Позволяют автоматически распознавать изображения отходов (например, пластика, бумаги, стекла и т.п.), что позволяет автоматизировать и ускорять сортировку, сокращать количество оши- | М. Chhabra, В. Sharan, М. Elbarachi, J. Jose, А. Altikat, А. Gulbe, S. Altikat et al. |

| Технология | Что делает | Источник/пример |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| | бок в сортировке, минимизировать загрязнение смешанных потоков отходов, используются преимущественно для твердых бытовых отходов. Эффект от использования: ускорение сортировки, снижение количества ошибок, повышение качества вторсырья | |
| Глубокое обучение (Deep Learning) / Нейронные сети (ANN, SNN) | Модели глубокого обучения, используются для классификации электронных отходов, определения их составных компонентов, выделения опасных материалов; Нейронные сети Efficientnet, Mobilenet, SNN достигают 98% точности в распознавании и классификации электронных отходов | C.C. Ihueze, C.E. Okafor, O.E. Omeiza, G. Oise, S. Konyeha, S.K. Kumar et al. |
| Глубокое обучение с подкреплением (Deep Reinforcement Learning), автоматизация сортировки и автоматизированные системы | RL-алгоритмы (например, Deep Q-Networks) используются для обучения системы реагировать на сложные условия сортировки и классификации отходов, особенно в условиях множества категорий отходов или их динамического изменения; самообучающиеся системы сортировки, снижающие затраты на ручной труд | N. Khan, K. Kulkarni, Y. Mahale, L. Xu, H. Liu et al. |
| Умные баки с классификацией отходов на месте (Edge Computing + CNN), IoT + AI | Определение вида и классификация отходов на «границе» сети (на устройстве возле контейнера), позволяет принимать решения локально, снижая задержки сортировки и зависимость от облачных сетей; размещение датчиков-сенсоров в контейнерах и транспорте, анализ данных в реальном времени | A. Alourani, M.U. Ashraf, O. Kara, A. Demirhan et al. |
| Оптимизированные CNN+ Feature Fusion – комбинированные визуальные системы с улучшенным распознаванием | Технологии используют несколько признаков для распознавания отходов (цвет, форма, текстура и пр.). Распознают отходы со смешанным содержанием и архитектурой, что повышает точность классификации перерабатываемых и смешанных отходов | K.T. Abrar |
| Прогнозные/предиктивные модели (Machine Learning / SVM / SVR / нейронные сети) направлены на прогнозирование генерации отходов | Модели помогают планировать объемы отходов, инфраструктуру переработки, логистику сбора и распределение ресурсов | P. Oguz Ekim, T.F. Adu, L.D. Mensah et al. |
| Цифровые двойники (Digital Twins) | Цифровые двойники позволяют моделировать сценарии, оптимизировать маршруты сбора и перемещения отходов, анализировать влияние инфраструктурных изменений, управлять ресурсами в реальном времени | Z.-Y. Liu, Z. Chen, Z.A. Ali et al. |

| Технология | Что делает | Источник/пример |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Big Data + AI | Анализ больших массивов данных о потоках отходов, жизненном цикле продуктов, логистике | J. Verma, S. Gulyamov |
| Робототехника + AI | Роботы для сортировки смешанных и опасных отходов; эффект: увеличение скорости и точности, снижение рисков для состояния здоровья человека | J. Gros, D. Aschenbrenner, C. Lubongo, T. Gibson et al. |
| Generative AI | Эко-дизайн упаковки и продукции, моделирование LCA – проектирование перерабатываемых и ремонтпригодных продуктов, снижение отходов уже на стадии создания продукта | Z. Yuan, Z. Zhu, W. Liu, K. Anokye, E.D. Georgakoudis et al. |
| Decision Support Systems (DSS + AI) | Система интеграции данных из разных источников (отходы, энергия, логистика; поддержка решений для бизнеса и органов власти) | D. Mahmud, P. Tongyodkaew, T.F. Adu et al. |

Источник: авторская разработка по данным [56–81]; Adeleke O., Jen T.C. Explainable AI and machine learning-based analysis of municipal solid waste generation rate: A South African case study. *Waste Management*, 2025, no. 206. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115036; Abrar K.T. Multi-Modal Autonomous Aerial Waste Collection and Categorization System: Integrating Computer Vision, Ultrasonic Material Classification, and Intelligent Sorting for Sustainable Environmental Management. *Authorea Preprints*, 2025. DOI: 10.22541/au.175683909.92641034/v1

Source: Authoring, based on the data of [56–81]; Adeleke O., Jen T.C. Explainable AI and machine learning-based analysis of municipal solid waste generation rate: A South African case study. *Waste Management*, 2025, no. 206. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115036; Abrar K.T. Multi-Modal Autonomous Aerial Waste Collection and Categorization System: Integrating Computer Vision, Ultrasonic Material Classification, and Intelligent Sorting for Sustainable Environmental Management. *Authorea Preprints*, 2025. DOI: 10.22541/au.175683909.92641034/v1

Таблица 3

Организационный потенциал использования ИИ при переходе к моделям экономики замкнутого цикла

Table 3

Organizational potential of AI use in the transition to circular economy models

| Технологии и инструменты ИИ | Функции и направления применения | Организационные эффекты и результаты |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Интеллектуальные цифровые платформы (AI-driven circular platforms, marketplaces) | Формирование цифровой экосистемы взаимодействия предприятий; сбор и анализ данных о потоках ресурсов и отходов; поиск возможностей промышленного симбиоза | Повышение уровня координации между участниками, прозрачность ресурсных потоков, создание сетей промышленного сотрудничества |
| Алгоритмы оптимизации логистических цепочек (AI-based supply chain optimization, reverse logistics) | Управление потоками материалов и отходов, планирование маршрутов обратной логистики, снижение издержек и выбросов | Оптимизация транспортных и производственных процессов, интеграция замкнутых цепочек поставок, повышение эффективности производственных процессов |
| Системы поддержки управленческих решений (AI-based DSS) | Оценка эффективности программ циркулярной экономики, анализ сценариев регионального развития, прогнозирование влияния институциональных факторов на региональное развитие | Повышение качества стратегического планирования и управления, ускорение принятия решений и повышение их качества на основе данных, снижение институциональных рисков |

| Технологии и инструменты ИИ | Функции и направления применения | Организационные эффекты и результаты |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цифровые двойники предприятий и регионов (Digital Twins) | Моделирование потоков ресурсов и энергии, симуляция сценариев развития, мониторинг состояния экосистем и инфраструктуры | Повышение точности прогнозирования, улучшение координации между уровнями управления, интеграция данных для операционного и стратегического контроля |
| Интеллектуальные промышленные симбиозы (AI for Industrial Symbiosis Mapping) | Автоматизированное выявление взаимосвязей между предприятиями, потоками ресурсов/отходов | Формирование промышленных кластеров циркулярной экономики, развитие систем региональной кооперации, снижение уровня влияния на состояние окружающей среды, укрепление институциональной устойчивости |
| AI-управляемые платформы обратной связи с населением (Public Engagement Platforms) (T. Katika, M. Dyer, S. Wu et al.) | Сбор данных о поведении потребителей, стимулирование повторного использования, обмен ресурсами и товарами, внедрение моделей совместного использования | Рост вовлеченности населения в развитие новой модели производства и потребления, повышение уровня экологической осведомленности и ответственности |

Источник: авторская разработка по данным [82, 83]

Source: Authoring, based on the [82, 83] data

Таблица 4

Социальный вектор применения ИИ в циркулярной экономике

Table 4

The social vector of AI application in the circular economy

| Технологии и инструменты ИИ | Функции и направления применения | Социальные эффекты и результаты | Примеры источников |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| AI-платформы общественного участия и краудсорсинга (AI-driven engagement & A.crowdsourcing platforms) | Сбор и анализ данных о поведении потребителей, стимулирование участия населения в проектах циркулярной экономики, поддержка платформ совместного потребления и обмена ресурсами | Повышение уровня экологической культуры, вовлечение населения, развитие ответственности и доверия между участниками экосистемы циркулярной экономики | A. Cammarano, G. Aquilone, R. Pei, M. Chen et al. |
| Интеллектуальные образовательные системы и адаптивное обучение (AI-based learning systems) | Поддержка программ профессиональной подготовки и онлайн-обучения, адаптация образовательного контента под индивидуальные траектории, прогнозирование потребностей рынка труда | Развитие человеческого капитала, формирование новых профессий в сфере циркулярной экономики, снижение рисков технологического неравенства | K.Y. Lin, S.H. Wei, F. Acerbi, S. Terzi et al. |
| Социальная аналитика и моделирование (AI for social sustainability analytics) | Анализ социально-экономических данных, выявление точек напряженности и неравенства доступа к ресурсам, оценка влияния политики экономики замкнутого цикла на качество жизни | Поддержание и укрепление социальной устойчивости, обеспечение инклюзивности и справедливости при реализации моделей циркулярной экономики | L. Tamym, K. Lee et al. |
| AI-системы мониторинга занятости и социальных | Отслеживание динамики занятости, оценка влия- | Своевременная адаптация политики занятости, под- | A. Singh, P. Calanter, Y. Nademi et al. |

| Технологии и инструменты ИИ | Функции и направления применения | Социальные эффекты и результаты | Примеры источников |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| эффектов | ния внедрения циркулярной экономики на рынок труда и социальные показатели региона | держка социальной стабильности, создание новых рабочих мест | |
| AI-инструменты формирования экологического поведения и персонализированные рекомендации | Формирование персональных «зеленых» профилей пользователей, поощрение ответственного поведения, снижение количества отходов на уровне домохозяйств | Повышение уровня экологической грамотности, повышение уровня индивидуальной ответственности, снижение экологического следа | R.G. Popa, A.S. Chenic |

Источник: авторская разработка по данным [84–93]; Jain S. Innovation and AI in the Sharing Economy. Innovation and the Sharing Economy: Employment, Human Capital, and the AI Revolution, 2025

Source: Authoring, based on the data of [84–93]; Jain S. Innovation and AI in the Sharing Economy. Innovation and the Sharing Economy: Employment, Human Capital, and the AI Revolution, 2025.

Таблица 5

Барьеры внедрения искусственного интеллекта

Table 5

Barriers to AI implementation

| Группа барьеров | Описание | Примеры/ссылки |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Качество, объем и стандартизация данных | Для обучения моделей ИИ необходимы большие массивы качественных данных по потокам материалов, отходам, жизненному циклу продуктов, поведению потребителей и т.п. Данные зачастую фрагментированы, неполны, также в настоящее время отсутствуют стандарты классификации и обмена данными, в отсутствие качественных данных модели могут не иметь необходимой точности и надежности | R. Kumar с коллегами выделяют 19 проблем по работе с данными для циркулярной экономики; E. Jasmin с коллегами также исследуют проблемы использования данных |
| Ресурсные ограничения и высокие начальные издержки | Инфраструктура, оборудование, вычислительные мощности, сенсоры, программное обеспечение, обучение персонала требуют значительных финансовых затрат, что может стать барьером для малых и средних предприятий, донорских регионов | J. Vjoern, A. Saarinen с коллегами считают высокие финансовые издержки главным барьером использования ИИ для развития циркулярной экономики |
| Навыки, кадровый потенциал и образовательная база | Необходимы специалисты, совмещающие знания в ИИ, экологии, инженерии, логистике и т.п., позиции, где требуются междисциплинарные компетенции часто остаются вакантными, также сдерживающим фактором является отсутствие качественных обучающих программ | R.G. Popa с коллегами отмечают, что люди с высшим образованием более осведомлены и лучше принимают экологически ответственные модели поведения; A.Y. Nikitaeva и A. Guerreschi с коллегами также отмечают дефицит профессиональных кадров в исследуемой сфере |

| Группа барьеров | Описание | Примеры/ссылки |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Инфраструктурные и технологические ограничения | Старые системы (legacy systems), отсутствие совместимости между различными технологическими решениями и стандартами, слабое развитие цифровой инфраструктуры | Выделяют десять видов технологических и инфраструктурных барьеров |
| Регуляторные, правовые и институциональные барьеры | Отсутствие четких стандартов и правил использования ИИ, правовые ограничения по использованию персональных данных, слабое регулирование режимов ответственности, непредсказуемость политики, отсутствие налоговых и финансовых стимулов | М. Sharma с коллегами отмечают, что слабое регулирование и отсутствие глобальных стандартов существенно сдерживают развитие и циркулярной экономики, и особенности использования ИИ в этой сфере деятельности |
| Социальные и культурные барьеры | Сопrotивление нововведениям и у населения, и в организациях, страх потери рабочих мест, недоверие к автоматизированным системам, низкий уровень экологического сознания и цифровой грамотности у населения, слабая обратная связь и вовлечение стейкхолдеров | D. Knickmeyer определил, что осведомленность населения является движущей силой при развитии сортировки и переработки отходов. Также существенную роль играют возрастные барьеры, так как отмечается, что пожилые люди оказывают большее сопротивление изменениям, в отличие от молодых (S.A. Neves, A.C. Marques) |

Источник: авторская разработка по данным [19, 94–101]

Source: Authoring, based on the [19, 94–101] data

Список литературы

1. Andersen M.S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2006, vol. 2, iss. 1, pp. 133–140. DOI: 10.1007/s11625-006-0013-6
2. Gonçalves B.S.M., Carvalho F.L., Fiorini P.C. Circular economy and financial aspects: A systematic review of the literature. *Sustainability*, 2022, vol. 14, iss. 5, pp. 133–140. DOI: 10.3390/su14053023
3. Geng Y., Sarkis J., Bleischwitz R. How to globalize the circular economy. *Nature*, 2019, no. 565, pp. 153–155. DOI: 10.1038/d41586-019-00017-z
4. Henrysson M., Nuur C. The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, 2021, vol. 30, iss. 2, pp. 149–171. DOI: 10.1177/1070496521991876 EDN: ERIVNB
5. Drogenik J.A., Seljak T., Pintarič Z. A multi-level approach to circular economy progress: Linking national targets with corporate implementation. *Journal of Cleaner Production*, 2025, no. 493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144902 EDN: RCKWMA
6. Asgari A., Asgari R. How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem: The barriers and incentives. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, no. 28, pp. 566–579. DOI: 10.1016/j.spc.2021.06.020 EDN: MQZUZH
7. Olawade D.B., Fapohunda O., Wada O.Z. et al. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 2, pp. 244–263. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.05.001 EDN: LNGIIV

8. Tura N., Hanski J., Ahola T. et al. Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 2019, no. 212, pp. 90–98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.202
9. Vanhuyse F., Fejzić E., Ddiba D. et al. The lack of social impact considerations in transitioning towards urban circular economies: A scoping review. *Sustainable Cities and Society*, 2021, no. 75. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103394
10. Henrysson M., Nuur C. The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, 2021, vol. 30, iss. 2, pp. 149–171. DOI: 10.1177/1070496521991876/
11. Alonso-Almeida M., Rodriguez-Anton J.M., Bagur-Femenías L. et al. Institutional entrepreneurship enablers to promote circular economy in the European Union: Impacts on transition towards a more circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2021, no. 281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124841
12. Pagoropoulos A., Pigosso D.C.A., McAlloone T.C. The emergent role of digital technologies in the Circular Economy: A review. *Procedia CIRP*, 2017, no. 64, pp. 19–24. DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.047
13. Preut A., Kopka J.-P., Clausen U. Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 18. DOI: 10.3390/su131810467
14. Sadeghi M., Mahmoudi A., Deng X. et al. 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*, 2023, vol. 20, iss. 5, pp. 4991–5012. DOI: 10.1007/s13762-022-04298-2
15. Gupta A., Singh R.K. Applications of emerging technologies in logistics sector for achieving circular economy goals during COVID-19 pandemic: Analysis of critical success factors. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2021, vol. 27, iss. 3, pp. 1–22. DOI: 10.1080/13675567.2021.1985095
16. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, no. 127, pp. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
17. Kirchherr J., Yang N.-H.N., Spüntrup F.S. et al. Conceptualizing the circular economy (Revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, vol. 194, iss. 2. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107001
18. Agyemang M., Kusi-Sarpong S., Khan S.A. et al. Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. *Management Decision*, 2019, vol. 57, iss. 4, pp. 971–994. DOI: 10.1108/MD-11-2018-1178
19. Neves S.A., Marques A.C. Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130865
20. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. et al. The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 2017, no. 143, pp. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
21. Zacho K.O., Mosgaard M.A., Riisgaard H. Capturing uncaptured values – A Danish case study on municipal preparation for reuse and recycling of waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 136, iss. 39, pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.031

22. Morseletto P. Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 153, iss. 3. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553
23. Desrochers P., Leppälä S. Industrial symbiosis: Old wine in recycled bottles? Some perspective from the history of economic and geographical thought. *International Regional Science Review*, 2010, vol. 33, iss. 3, pp. 338–361. DOI: 10.1177/0160017610375441
24. Raut S., Hossain N.U.I., Kouhizadeh M. et al. Application of artificial intelligence in circular economy: A critical analysis of the current research. *Sustainable Futures*, 2025, no. 9. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100784
25. Nwokediegwu Z.Q.S., Ugwuanyi E.D., Data M. et al. AI-driven waste management systems: A comparative review of innovations in the USA and Africa. *Engineering Science & Technology Journal*, 2024, vol. 5, iss. 2, pp. 507–516. DOI: 10.51594/estj/v5i2.828
26. Yi Zh., Ayangbah S. The impact of AI innovation management on organizational productivity and economic growth: An analytical study. *International Journal of Business Management and Economic Review*, 2024, vol. 7, iss. 3, pp. 61–84. DOI: 10.35409/IJBMER.2024.3580
27. Wang Q., Zhang F., Li R. Artificial intelligence and sustainable development during urbanization: Perspectives on AI R&D innovation, AI infrastructure, and AI market advantage. *Sustainable Development*, 2024, vol. 33, iss. 1, pp. 1136–1156. DOI: 10.1002/sd.3150
28. Hernandez J.C.R., Villa-Enciso E., Cardona-Acevedo S. et al. Smart innovation for a circular economy: A systematic review of emerging trends and the future of AI in the sustainable economy. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 13. DOI: 10.3390/su17135793
29. Lv X., Wang Y., Liu L. et al. Digital green innovation economy for Industry 5.0. *Sustainable Economies*, 2024, vol. 2, iss. 1, p. 8. DOI: 10.62617/se.v2i1.8
30. Skubis I., Wolniak R., Grebski W.W. AI and human-centric approach in smart cities management: Case studies from Silesian and lesser Poland voivodships. *Sustainability*, 2024, vol. 16, iss. 18, pp. 1–26. DOI: 10.3390/su16188279
31. Chien C.-F., Aviso K., Tseng M.-L. et al. Solid waste management in emerging economies: Opportunities and challenges for reuse and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, no. 188. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106635
32. Fang B., Yu J., Chen Z. et al. Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, vol. 21, iss. 4, pp. 1959–1989. DOI: 10.1007/s10311-023-01604-3
33. Olawade D., Fapohunda O., Wada O.Z. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 5, pp. 244–263. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.05.001
34. Reddy V.V. et al. Waste to wealth generation: Innovative methodologies in resource utilization and minimization in circular economy. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 453, iss. 6. DOI: 10.1051/e3sconf/202345301035
35. Li H., Li Z., Zhu P. Digital platforms as enablers of circular economy practices: Insights from a Chinese province? *Technology in Society*, 2026, no. 84. DOI: 10.1016/j.techsoc.2025.103075
36. Petrik D., Hiller S., Morar D. Digital platforms for circular economy: Empirical development of a taxonomy and archetypes. *Electronic Markets*, 2025, vol. 35, iss. 1, pp. 1–25. DOI: 10.1007/s12525-025-00792-w

37. Jensen H.H. Digital business ecosystem's role in a circular economy. *Circular Economy Opportunities and Pathways for Manufacturers*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 323–343. DOI: 10.1007/978-3-031-75279-7_12
38. Liam N., Simanjuntak A., Newell H. et al. Opportunities and challenges in implementing circular economy within digital platforms. *International Transactions on Education Technology (ITEE)*, 2025, vol. 3, iss. 2, pp. 125–133. DOI: 10.33050/itee.v3i2.765
39. Faria E., Barreto C., Caldeira-Pires A. et al. Brazilian circular economy pilot project: Integrating local stakeholders' perception and social context in industrial symbiosis analyses. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 4. DOI: 10.3390/su15043395
40. Yu C., Dijkema G.P.J., de Jong W.M. et al. From an eco-industrial park towards an eco-city: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, no. 102, pp. 264–274. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.021
41. Park H.S., Behera S.K. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, 2013, no. 64, pp. 478–485. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.032
42. Chen X., Fugita T., Fujii M. et al. The impact of scale, recycling boundary, and type of waste on symbiosis and recycling: An empirical study of Japanese eco-towns. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, iss. 1, pp. 129–141. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00422.x
43. Morales M.E., Diemer A., Cervantes G. By-product synergy changes in the industrial symbiosis dynamics at the Altamira-Tampico industrial corridor: 20 Years of industrial ecology in Mexico. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, no. 140, pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.026
44. Corder G.D., Golev A., Fyfe J. et al. The status of industrial ecology in Australia: Barriers and enablers. *Resources*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 340–361. DOI: 10.3390/resources3020340
45. Xie X., Wei B., Hu S. Integrated network analysis on industrial symbiosis: Case study of Qinghai salt lake industrial park. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139235
46. Wilson M., Paschen J., Pitt L. The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2021, vol. 33, iss. 1, pp. 9–25. DOI: 10.1108/MEQ-10-2020-0222
47. Mukherjee S., Nagariya R., Mathiyazhagan K. et al. Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: A developing country perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 2024, vol. 35, iss. 6, pp. 1779–1806. DOI: 10.1108/IJLM-03-2023-0102
48. Tsolakis N., Harrington T.S., Srari J.S. Digital supply network design: A Circular Economy 4.0 decision-making system for real-world challenges. *Production Planning & Control*, 2021, vol. 34, iss. 10, pp. 1–26. DOI: 10.1080/09537287.2021.1980907
49. Boonkanit P., Suthiluck K. Developing a decision-making support system for a smart construction and demolition waste transition to a circular economy. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 12. DOI: 10.3390/su15129672
50. Preut A., Kopka J.P., Clausen U. Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 18. DOI: 10.3390/su131810467

51. Ali Z.A., Zain M., Hasan R. et al. Digital twins: Cornerstone to circular economy and sustainability goals. *Environment, Development and Sustainability*, 2025, pp. 1–42. DOI: 10.1007/s10668-025-06221-4
52. Askar R., Karaca F., Salles A. et al. Driving the built environment twin transition: Synergising circular economy and digital tools. *Circular Economy Design and Management in the Built Environment*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 459–505. DOI: 10.1007/978-3-031-73490-8_17
53. Sharma A., Sharma R. Assessing the influence of artificial intelligence on sustainable consumption behavior and lifestyle choices. *Young Consumers*, 2024. DOI: 10.1108/YC-09-2024-2214
54. Zhao J., Gómez Fariñas B. Artificial intelligence and sustainable decisions. *European Business Organization Law Review*, 2022, vol. 24, iss. 1, pp. 1–39. DOI: 10.1007/s40804-022-00262-2
55. Trevisan A.H., Lobo A., Guzzo D. et al. Barriers to employing digital technologies for a circular economy: A multi-level perspective. *Journal of Environmental Management*, 2023, no. 332. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117437
56. Chhabra M., Sharan B., Elbarachi M. Intelligent waste classification approach based on improved multi-layered convolutional neural network. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, vol. 83, iss. 36. DOI: 10.1007/s11042-024-18939-w
57. Jose J., Mana S.C., Babu K.S. et al. Enhancing waste classification accuracy with Channel and Spatial Attention-Based Multiblock Convolutional Network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, iss. 2. DOI: 10.1007/s10661-025-13629-y
58. Altikat A., Gulbe A., Altikat S. Intelligent solid waste classification using deep convolutional neural networks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, vol. 19, iss. 4, pp. 1285–1292. DOI: 10.1007/s13762-021-03179-4
59. Ihueze C.C., Okafor C.E., Omeiza O.E. Robust design and intelligent modelling of organic-based composites for armoury applications. *SN Computer Science*, 2024, vol. 5, iss. 7. DOI: 10.1007/s42979-024-03199-0
60. Oise G., Konyeha S. Environmental impacts in e-waste management using deep learning. *Discover Artificial Intelligence*, 2025, vol. 5, iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s44163-025-00376-9
61. Kumar S.K., Sulochana C.H., Kumar T.A. et al. Spatio-temporal data analytics for e-waste management system using hybrid deep belief networks. *Spatiotemporal Data Analytics and Modeling*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2024, pp. 135–160. DOI: 10.1007/978-981-99-9651-3_7
62. Khan N., Kulkarni K., Mahale Y. et al. Waste objects segregation using deep reinforcement learning with Deep Q-Networks. *Ingénierie Des Systèmes D'information*, 2024, vol. 29, iss. 6. DOI: 10.18280/isi.290612
63. Xu L., Liu H., Zhao H. et al. Autonomous navigation of unmanned vehicle through deep reinforcement learning. *Proc. 5th Int. Conf. on Artificial Intelligence and Computer Engineering*, 2025, pp. 480–484. DOI: 10.1145/3716895.3716980
64. Alourani A., Ashraf M.U., Aloraini M. Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies. *PeerJ Computer Science*, 2025, no. 11. DOI: 10.7717/peerj-cs.2777

65. Kara O., Demirhan A. Recycle aware: A new smart end-to-end recycle bin with embedded deep learning. *Signal, Image and Video Processing*, 2025, vol. 19, iss. 8. DOI: 10.1007/s11760-025-04216-2
66. Oguz Ekim P. Machine learning approaches for municipal solid waste generation forecasting. *Environmental Engineering Science*, 2021, vol. 38, iss. 6, pp. 489–499. DOI: 10.1089/ees.2020.0232
67. Adu T.F., Mensah L.D., Rockson M. Forecasting municipal solid waste generation and composition using machine learning and GIS techniques: A case study of Cape Coast, Ghana. *Cleaner Waste Systems*, 2025, no. 10. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100218
68. Liu Z.-Y., Hansen D.W., Chen Z. Leveraging digital twins to support industrial symbiosis networks: A case study in the Norwegian wood supply chain collaboration. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 3. DOI: 10.3390/su15032647
69. Ali Z.A., Zain M., Hasan R. et al. Circular economy advances with artificial intelligence and digital twin: Multiple-case study of Chinese industries in agriculture. *Journal of Knowledge Economy*, 2024, vol. 16, iss. 1, pp. 2192–2228. DOI: 10.1007/s13132-024-02101-w
70. Verma J. Deep technologies using big data in: Energy and waste management. *Deep Learning Technologies for the Sustainable Development. Goals: Issues and Solutions in the Post-COVID Era*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 21–39. DOI: 10.1007/978-981-19-5723-9_2
71. Gulyamov S. Intelligent waste management using IoT, blockchain technology and data analytics. *E3S Web of Conferences*, 2024, no. 501. DOI: 10.1051/e3sconf/202450101010
72. Aschenbrenner D., Gros J., Fangerow N. et al. Recyclebot-using robots for sustainable plastic recycling. *Procedia CIRP*, 2024, vol. 116, pp. 275–280. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.047
73. Lubongo C., Bin Daej M.A.A., Alexandridis P. Recent developments in technology for sorting plastic for recycling: The emergence of artificial intelligence and the rise of the robots. *Recycling*, 2024, vol. 9, iss. 4. DOI: 10.3390/recycling9040059
74. Gibson T. Recycling robots. *Mechanical Engineering*, 2020, vol. 142, iss. 1, pp. 32–37. DOI: 10.1115/1.2020-JAN2
75. Yuan Z. Application of green ecological design in food packaging design. *Journal of Food Quality*, 2022, no. 2, iss. 1-7. DOI: 10.1155/2022/8491934
76. Zhu Z., Liu W., Ye S. et al. Packaging design for the circular economy: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, no. 32, pp. 817–832. DOI: 10.1016/j.spc.2022.06.005
77. Anokye K. Reviewing the efficacy of eco-design strategies for sustainable packaging in Ghana: Challenges, opportunities, and the way forward. *Materials Circular Economy*, 2025, vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1007/s42824-025-00185-6
78. Georgakoudis E.D., Pechlivanidou G.G., Tipi N.S. Sustainable packaging design: Packaging optimization and material reduction for environmental protection and economic benefits to industry and society. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, iss. 15. DOI: 10.3390/app15158289
79. Mahmud D. An IoT-enabled decision support system for circular economy business models: A review of economic efficiency and sustainability outcomes. *American Journal of Scholarly Research and Innovation*, 2025, vol. 4, iss. 1, pp. 250–286. DOI: 10.63125/28kdxg31
80. Tongyodkaew P., Songmuang P. AI implementations on circular economy: A systematic literature review. *International Conference on Computational Data and Social Networks*. Singapore, Springer, 2025, pp. 411–419. DOI: 10.1007/978-981-96-6389-7_38

81. Adu T.F., Mensah L.D., Rockson M.A.D. et al. Decision support systems for waste-to-energy technologies: A systematic literature review of methods and future directions for sustainable implementation in Ghana. *Heliyon*, 2025, vol. 11, iss. 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42353
82. Katika T., Karaseitanidis I., Tsiakou D. et al. Augmented reality (AR) supporting citizen engagement in circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2022, vol. 2, iss. 3, pp. 1–28. DOI: 10.1007/s43615-021-00137-7
83. Dyer M., Wu S., Weng M.H. Convergence of public participation, participatory design and NLP to co-develop circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2021, vol. 1, iss. 3, pp. 917–934. DOI: 10.1007/s43615-021-00079-0
84. Cammarano A., Aquilone G., Varriale V. et al. The potential of open innovation platforms: Driving sustainable development goals through digital collaboration. *Innovation*, 2024, no. 28, pp. 1–24. DOI:10.1080/14479338.2024.2421015
85. Pei R., Chen M., Liu Z. Identifying key digital enablers for urban carbon reduction: A strategy-focused study of AI, big data, and blockchain technologies. *Systems*, 2025, vol. 13, iss. 8. DOI: 10.3390/systems13080646
86. Lin K.Y., Wei S.H. Advancing the industrial circular economy: The integrative role of machine learning in resource optimization. *Journal of Green Economy and Low-Carbon Development*, 2023, vol. 2, iss. 3, pp. 122–136. DOI:10.56578/jgelcd020302
87. Acerbi F., Trevisan A.H., Terzi S. et al. Circular economy upskilling: A course on digital transition and transformation. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 138–152. DOI: 10.1007/978-3-032-03534-9_10
88. Tamym L., Benyoucef L., El Ouadghiri D.M. et al. A big data analytics-based methodology for social sustainability impacts evaluation: A case study. *Procedia Computer Science*, 2023, no. 220, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.007
89. Lee K. A systematic review on social sustainability of artificial intelligence in product design. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 5. DOI: 10.3390/su13052668
90. Singh A. AI-driven innovations for enabling a circular economy: Optimizing resource efficiency and sustainability. *Innovating Sustainability Through Digital Circular Economy*. NY, IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 47–64. DOI: 10.4018/979-8-3373-0578-3.ch003
91. Calanter P. et al. Circular economy and job creation: A comparative approach in an emerging European context. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 6. DOI: 10.3390/su17062614
92. Nademi Y., Kalmarzi H.S. Breaking the unemployment cycle using the circular economy: Sustainable jobs for sustainable futures. *Journal of Cleaner Production*, 2025, no. 488. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144655
93. Popa R.G., Chenic A.S. Artificial intelligence, consumer trust and the promotion of pro-environmental behavior among youth. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 13. DOI: 10.3390/su17135885
94. Kumar P., Singh R.K., Kumar V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, no. 164. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105215
95. Ingemarsdotter E., Jamsin E., Balkenende R. Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, no. 162. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105047

96. Bjoern J., Upadhyay A. Understanding barriers of circular economy: Cases from the manufacturing industry. *Journal of Enterprise Information Management*, 2019, vol. 33, iss. 4, pp. 729–745. DOI:10.1108/JEIM-02-2019-0047
97. Saarinen A., Aarikka-Stenroos L. Financing-related drivers and barriers for circular economy business: Developing a conceptual model from a field study. *Circular Economy and Sustainability*, 2023, no. 3, pp. 1–25. DOI: 10.1007/s43615-022-00222-5
98. Nikitaeva A.Y., Bondarev M.G., Masych M. et al. The circular economy skills: Regional dimension. *R-Economy*, 2024, vol. 10, iss. 1, pp. 21–40. DOI: 10.15826/recon.2024.10.1.002
99. Guerreschi A., Piras L., Heck F. Barriers to efficient knowledge transfer for a holistic circular economy: Insights towards green job developments and training for young professionals. *Youth*, 2023, vol. 3, iss. 2, pp. 553–578. DOI: 10.3390/youth3020038
100. Sharma M., Joshi S., Govindan K. Overcoming barriers to implement digital technologies to achieve sustainable production and consumption in the food sector: A circular economy perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, no. 39, pp. 203–215. DOI: 10.1016/j.spc.2023.04.002
101. Knickmeyer D. Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. *Journal of cleaner production*, 2020, no. 245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118605

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

AI AND THE CIRCULAR ECONOMY: NEW OPPORTUNITIES FOR REGIONAL SUSTAINABILITY (INTERNATIONAL EXPERIENCE)

DOI: <https://doi.org/10.24891/sojkbm>

EDN: <https://elibrary.ru/sojkbm>

Ol'ga S. TARASOVA

Corresponding author, Novosibirsk State University of Economics and Management (NSUEM),
Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: tosgeo@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4250-7259

Anna A. ALETDINOVA

National University of Oil and Gas – Gubkin University (Gubkin University),
Moscow, Russian Federation

e-mail: andreww@academ.org

ORCID: 0000-0002-9257-4735

Article history:

Article No. 708/2025

Received 31 Oct 2025

Accepted 10 Nov 2025

Available online

30 Mar 2026

JEL Classification:

O44, Q55

Keywords: circular economy, regional resilience, industrial symbiosis, artificial intelligence, digital transformation, secondary resources

Abstract

Subject. This article focuses on the foreign experience in technological, organizational, and social aspects of using artificial intelligence in the context of regional sustainability.

Objectives. The study aims to identify opportunities for using artificial intelligence to support regions' transition to a circular economy.

Methods. For the study, we used the methods of theoretical analysis of foreign scientific sources, systemic and structural analyses of regional economic systems and their sustainability factors, and comparative analysis of AI implementation practices in regions.

Results. The article identifies the aspects of regional transition to a circular economy and organizational mechanisms for it. It also reveals technological capabilities of artificial intelligence, and barriers to its implementation in circular economic models.

Conclusions. Implementing the principles of a circular economy using artificial intelligence tools is promising. The study results can help regional authorities, businesses, and the scientific community to enhance environmental, social, and economic sustainability at the regional level.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2025

Please cite this article as: Tarasova O.S., Aletdinova A.A. AI and the circular economy: New opportunities for regional sustainability (International experience). *National Interests: Priorities and Security*, 2026, iss. 3, pp. 95–128. DOI: 10.24891/sojkbm EDN: SOJKBM

References

1. Andersen M.S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability science*, 2006, vol. 2, iss. 1, pp. 133–140. DOI: 10.1007/s11625-006-0013-6
2. Gonçalves B.S.M., Carvalho F.L., Fiorini P.C. Circular economy and financial aspects: A systematic review of the literature. *Sustainability*, 2022, vol. 14, iss. 5, pp. 133–140. DOI: 10.3390/su14053023
3. Geng Y., Sarkis J., Bleischwitz R. How to globalize the circular economy. *Nature*, 2019, no. 565, pp. 153–155. DOI: 10.1038/d41586-019-00017-z
4. Henrysson M., Nuur C. The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, 2021, vol. 30, iss. 2, pp. 149–171. DOI: 10.1177/1070496521991876 EDN: ERIVNB
5. Drogenik J.A., Seljak T., Pintarič Z. A multi-level approach to circular economy progress: Linking national targets with corporate implementation. *Journal of Cleaner Production*, 2025, no. 493. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144902 EDN: RCKWMA
6. Asgari A., Asgari R. How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem: The barriers and incentives. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, no. 28, pp. 566–579. DOI: 10.1016/j.spc.2021.06.020 EDN: MQZUZH
7. Olawade D.B., Fapohunda O., Wada O.Z. et al. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 2, pp. 244–263. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.05.001 EDN: LNGIIV
8. Tura N., Hanski J., Ahola T. et al. Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 2019, no. 212, pp. 90–98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.202
9. Vanhuyse F., Fejzić E., Ddiba D. et al. The lack of social impact considerations in transitioning towards urban circular economies: A scoping review. *Sustainable Cities and Society*, 2021, no. 75. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103394
10. Henrysson M., Nuur C. The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, 2021, vol. 30, iss. 2, pp. 149–171. DOI: 10.1177/1070496521991876/
11. Alonso-Almeida M., Rodriguez-Anton J.M., Bagur-Femenías L. et al. Institutional entrepreneurship enablers to promote circular economy in the European Union: Impacts on transition towards a more circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2021, no. 281. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124841
12. Pagoropoulos A., Pigosso D.C.A., McAloone T.C. The emergent role of digital technologies in the Circular Economy: A review. *Procedia CIRP*, 2017, no. 64, pp. 19–24. DOI: 10.1016/j.procir.2017.02.047
13. Preut A., Kopka J.-P., Clausen U. Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 18. DOI: 10.3390/su131810467
14. Sadeghi M., Mahmoudi A., Deng X. et al. 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*, 2023, vol. 20, iss. 5, pp. 4991–5012. DOI: 10.1007/s13762-022-04298-2
15. Gupta A., Singh R.K. Applications of emerging technologies in logistics sector for achieving circular economy goals during COVID 19 pandemic: Analysis of critical success factors. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2021, vol. 27, iss. 3, pp. 1–22. DOI: 10.1080/13675567.2021.1985095
 16. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, no. 127, pp. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
 17. Kirchherr J., Yang N.-H.N., Spüntrup F.S. et al. Conceptualizing the circular economy (Revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, vol. 194, iss. 2. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107001
 18. Agyemang M., Kusi-Sarpong S., Khan S.A. et al. Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. *Management Decision*, 2019, vol. 57, iss. 4, pp. 971–994. DOI: 10.1108/MD-11-2018-1178
 19. Neves S.A., Marques A.C. Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130865
 20. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. et al. The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 2017, no. 143, pp. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
 21. Zacho K.O., Mosgaard M.A., Riisgaard H. Capturing uncaptured values – A Danish case study on municipal preparation for reuse and recycling of waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, vol. 136, iss. 39, pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.031
 22. Morseletto P. Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, vol. 153, iss. 3. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553
 23. Desrochers P., Leppälä S. Industrial symbiosis: Old wine in recycled bottles? Some perspective from the history of economic and geographical thought. *International Regional Science Review*, 2010, vol. 33, iss. 3, pp. 338–361. DOI: 10.1177/0160017610375441
 24. Raut S., Hossain N.U.I., Kouhizadeh M. et al. Application of artificial intelligence in circular economy: A critical analysis of the current research. *Sustainable Futures*, 2025, no. 9. DOI: 10.1016/j.sftr.2025.100784
 25. Nwokediegwu Z.Q.S., Ugwuanyi E.D., Data M. et al. AI-driven waste management systems: A comparative review of innovations in the USA and Africa. *Engineering Science & Technology Journal*, 2024, vol. 5, iss. 2, pp. 507–516. DOI: 10.51594/estj/v5i2.828
 26. Yi Zh., Ayangbah S. The impact of AI innovation management on organizational productivity and economic growth: An analytical study. *International Journal of Business Management and Economic Review*, 2024, vol. 7, iss. 3, pp. 61–84. DOI: 10.35409/IJBMER.2024.3580
 27. Wang Q., Zhang F., Li R. Artificial intelligence and sustainable development during urbanization: Perspectives on AI R&D innovation, AI infrastructure, and AI market advantage. *Sustainable Development*, 2024, vol. 33, iss. 1, pp. 1136–1156. DOI: 10.1002/sd.3150

28. Hernandez J.C.R., Villa-Enciso E., Cardona-Acevedo S. et al. Smart innovation for a circular economy: A systematic review of emerging trends and the future of AI in the sustainable economy. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 13. DOI: 10.3390/su17135793
29. Lv X., Wang Y., Liu L. et al. Digital green innovation economy for Industry 5.0. *Sustainable Economies*, 2024, vol. 2, iss. 1, p. 8. DOI: 10.62617/se.v2i1.8
30. Skubis I., Wolniak R., Grebski W.W. AI and human-centric approach in smart cities management: Case studies from Silesian and lesser Poland voivodships. *Sustainability*, 2024, vol. 16, iss. 18, pp. 1–26. DOI: 10.3390/su16188279
31. Chien C.-F., Aviso K., Tseng M.-L. et al. Solid waste management in emerging economies: Opportunities and challenges for reuse and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, no. 188. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106635
32. Fang B., Yu J., Chen Z. et al. Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, vol. 21, iss. 4, pp. 1959–1989. DOI: 10.1007/s10311-023-01604-3
33. Olawade D., Fapohunda O., Wada O.Z. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2024, vol. 2, iss. 5, pp. 244–263. DOI: 10.1016/j.wmb.2024.05.001
34. Reddy V.V. et al. Waste to wealth generation: Innovative methodologies in resource utilization and minimization in circular economy. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 453, iss. 6. DOI: 10.1051/e3sconf/202345301035
35. Li H., Li Z., Zhu P. Digital platforms as enablers of circular economy practices: Insights from a Chinese province? *Technology in Society*, 2026, no. 84. DOI: 10.1016/j.techsoc.2025.103075
36. Petrik D., Hiller S., Morar D. Digital platforms for circular economy: Empirical development of a taxonomy and archetypes. *Electronic Markets*, 2025, vol. 35, iss. 1, pp. 1–25. DOI: 10.1007/s12525-025-00792-w
37. Jensen H.H. Digital business ecosystem's role in a circular economy. *Circular Economy Opportunities and Pathways for Manufacturers*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 323–343. DOI: 10.1007/978-3-031-75279-7_12
38. Liam N., Simanjuntak A., Newell H. et al. Opportunities and challenges in implementing circular economy within digital platforms. *International Transactions on Education Technology (ITEE)*, 2025, vol. 3, iss. 2, pp. 125–133. DOI: 10.33050/itee.v3i2.765
39. Faria E., Barreto C., Caldeira-Pires A. et al. Brazilian circular economy pilot project: Integrating local stakeholders' perception and social context in industrial symbiosis analyses. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 4. DOI: 10.3390/su15043395
40. Yu C., Dijkema G.P.J., de Jong W.M. et al. From an eco-industrial park towards an eco-city: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, no. 102, pp. 264–274. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.021
41. Park H.S., Behera S.K. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, 2013, no. 64, pp. 478–485. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.032

42. Chen X., Fugita T., Fujii M. et al. The impact of scale, recycling boundary, and type of waste on symbiosis and recycling: An empirical study of Japanese eco-towns. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, vol. 16, iss. 1, pp. 129–141. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00422.x
43. Morales M.E., Diemer A., Cervantes G. By-product synergy changes in the industrial symbiosis dynamics at the Altamira-Tampico industrial corridor: 20 Years of industrial ecology in Mexico. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, no. 140, pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.09.026
44. Corder G.D., Golev A., Fyfe J. et al. The status of industrial ecology in Australia: Barriers and enablers. *Resources*, 2014, vol. 3, iss. 2, pp. 340–361. DOI: 10.3390/resources3020340
45. Xie X., Wei B., Hu S. Integrated network analysis on industrial symbiosis: Case study of Qinghai salt lake industrial park. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 429. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139235
46. Wilson M., Paschen J., Pitt L. The circular economy meets artificial intelligence (AI): Understanding the opportunities of AI for reverse logistics. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2021, vol. 33, iss. 1, pp. 9–25. DOI: 10.1108/MEQ-10-2020-0222
47. Mukherjee S., Nagariya R., Mathiyazhagan K. et al. Artificial intelligence-based reverse logistics for improving circular economy performance: A developing country perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 2024, vol. 35, iss. 6, pp. 1779–1806. DOI: 10.1108/IJLM-03-2023-0102
48. Tsolakis N., Harrington T.S., Srari J.S. Digital supply network design: A Circular Economy 4.0 decision-making system for real-world challenges. *Production Planning & Control*, 2021, vol. 34, iss. 10, pp. 1–26. DOI: 10.1080/09537287.2021.1980907
49. Boonkanit P., Suthiluck K. Developing a decision-making support system for a smart construction and demolition waste transition to a circular economy. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 12. DOI: 10.3390/su15129672
50. Preut A., Kopka J.P., Clausen U. Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 18. DOI: 10.3390/su131810467
51. Ali Z.A., Zain M., Hasan R. et al. Digital twins: Cornerstone to circular economy and sustainability goals. *Environment, Development and Sustainability*, 2025, pp. 1–42. DOI: 10.1007/s10668-025-06221-4
52. Askar R., Karaca F., Salles A. et al. Driving the built environment twin transition: Synergising circular economy and digital tools. *Circular Economy Design and Management in the Built Environment*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 459–505. DOI: 10.1007/978-3-031-73490-8_17
53. Sharma A., Sharma R. Assessing the influence of artificial intelligence on sustainable consumption behavior and lifestyle choices. *Young Consumers*, 2024. DOI: 10.1108/YC-09-2024-2214
54. Zhao J., Gómez Fariñas B. Artificial intelligence and sustainable decisions. *European Business Organization Law Review*, 2022, vol. 24, iss. 1, pp. 1–39. DOI: 10.1007/s40804-022-00262-2

55. Trevisan A.H., Lobo A., Guzzo D. et al. Barriers to employing digital technologies for a circular economy: A multi-level perspective. *Journal of Environmental Management*, 2023, no. 332. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117437
56. Chhabra M., Sharan B., Elbarachi M. Intelligent waste classification approach based on improved multi-layered convolutional neural network. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, vol. 83, iss. 36. DOI: 10.1007/s11042-024-18939-w
57. Jose J., Mana S.C., Babu K.S. et al. Enhancing waste classification accuracy with Channel and Spatial Attention-Based Multiblock Convolutional Network. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, iss. 2. DOI: 10.1007/s10661-025-13629-y
58. Altikat A., Gulbe A., Altikat S. Intelligent solid waste classification using deep convolutional neural networks. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021, vol. 19, iss. 4, pp. 1285–1292. DOI: 10.1007/s13762-021-03179-4
59. Ihueze C.C., Okafor C.E., Omeiza O.E. Robust design and intelligent modelling of organic-based composites for armoury applications. *SN Computer Science*, 2024, vol. 5, iss. 7. DOI: 10.1007/s42979-024-03199-0
60. Oise G., Konyeha S. Environmental impacts in e-waste management using deep learning. *Discover Artificial Intelligence*, 2025, vol. 5, iss. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1007/s44163-025-00376-9
61. Kumar S.K., Sulochana C.H., Kumar T.A. et al. Spatio-temporal data analytics for e-waste management system using hybrid deep belief networks. *Spatiotemporal Data Analytics and Modeling*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2024, pp. 135–160. DOI: 10.1007/978-981-99-9651-3_7
62. Khan N., Kulkarni K., Mahale Y. et al. Waste objects segregation using deep reinforcement learning with deep Q networks. *Ingénierie Des Systèmes D'information*, 2024, vol. 29, iss. 6. DOI: 10.18280/isi.290612
63. Xu L., Liu H., Zhao H. et al. Autonomous navigation of unmanned vehicle through deep reinforcement learning. *Proc. 5th Int. Conf. on Artificial Intelligence and Computer Engineering*, 2025, pp. 480–484. DOI: 10.1145/3716895.3716980
64. Alourani A., Ashraf M.U., Aloraini M. Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies. *PeerJ Computer Science*, 2025, no. 11. DOI: 10.7717/peerj-cs.2777
65. Kara O., Demirhan A. Recycle aware: A new smart end-to-end recycle bin with embedded deep learning. *Signal, Image and Video Processing*, 2025, vol. 19, iss. 8. DOI: 10.1007/s11760-025-04216-2
66. Oguz Ekim P. Machine learning approaches for municipal solid waste generation forecasting. *Environmental Engineering Science*, 2021, vol. 38, iss. 6, pp. 489–499. DOI: 10.1089/ees.2020.0232
67. Adu T.F., Mensah L.D., Rockson M. Forecasting municipal solid waste generation and composition using machine learning and GIS techniques: A case study of Cape Coast, Ghana. *Cleaner Waste Systems*, 2025, no. 10. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100218

68. Liu Z.-Y., Hansen D.W., Chen Z. Leveraging digital twins to support industrial symbiosis networks: A case study in the Norwegian wood supply chain collaboration. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 3. DOI: 10.3390/su15032647
69. Ali Z.A., Zain M., Hasan R. et al. Circular economy advances with artificial intelligence and digital twin: Multiple-case study of Chinese industries in agriculture. *Journal of Knowledge Economy*, 2024, vol. 16, iss. 1, pp. 2192–2228. DOI: 10.1007/s13132-024-02101-w
70. Verma J. Deep technologies using big data in: Energy and waste management. *Deep Learning Technologies for the Sustainable Development. Goals: Issues and Solutions in the Post-COVID Era*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 21–39. DOI: 10.1007/978-981-19-5723-9_2
71. Gulyamov S. Intelligent waste management using IoT, blockchain technology and data analytics. *E3S Web of Conferences*, 2024, no. 501. DOI: 10.1051/e3sconf/202450101010
72. Aschenbrenner D., Gros J., Fangerow N. et al. Recyclebot—using robots for sustainable plastic recycling. *Procedia CIRP*, 2024, vol. 116, pp. 275–280. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.047
73. Lubongo C., Bin Daej M.A.A., Alexandridis P. Recent developments in technology for sorting plastic for recycling: The emergence of artificial intelligence and the rise of the robots. *Recycling*, 2024, vol. 9, iss. 4. DOI: 10.3390/recycling9040059
74. Gibson T. Recycling robots. *Mechanical Engineering*, 2020, vol. 142, iss. 1, pp. 32–37. DOI: 10.1115/1.2020-JAN2
75. Yuan Z. Application of green ecological design in food packaging design. *Journal of Food Quality*, 2022, no. 2, iss. 1-7. DOI: 10.1155/2022/8491934
76. Zhu Z., Liu W., Ye S. et al. Packaging design for the circular economy: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, no. 32, pp. 817–832. DOI: 10.1016/j.spc.2022.06.005
77. Anokye K. Reviewing the efficacy of eco-design strategies for sustainable packaging in Ghana: Challenges, opportunities, and the way forward. *Materials Circular Economy*, 2025, vol. 7, iss. 1. DOI: 10.1007/s42824-025-00185-6
78. Georgakoudis E.D., Pechlivanidou G.G., Tipi N.S. Sustainable packaging design: Packaging optimization and material reduction for environmental protection and economic benefits to industry and society. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, iss. 15. DOI: 10.3390/app15158289
79. Mahmud D. An IoT-enabled decision support system for circular economy business models: A review of economic efficiency and sustainability outcomes. *American Journal of Scholarly Research and Innovation*, 2025, vol. 4, iss. 1, pp. 250–286. DOI: 10.63125/28kdxg31
80. Tongyodkaew P., Songmuang P. AI implementations on circular economy: A systematic literature review. *International Conference on Computational Data and Social Networks*. Singapore, Springer, 2025, pp. 411–419. DOI: 10.1007/978-981-96-6389-7_38
81. Adu T.F., Mensah L.D., Rockson M.A.D. et al. Decision support systems for waste-to-energy technologies: A systematic literature review of methods and future directions for sustainable implementation in Ghana. *Heliyon*, 2025, vol. 11, iss. 3. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42353

82. Katika T., Karaseitanidis I., Tsiakou D. et al. Augmented reality (AR) supporting citizen engagement in circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2022, vol. 2, iss. 3, pp. 1–28. DOI: 10.1007/s43615-021-00137-7
83. Dyer M., Wu S., Weng M.H. Convergence of public participation, participatory design and NLP to co-develop circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2021, vol. 1, iss. 3, pp. 917–934. DOI: 10.1007/s43615-021-00079-0
84. Cammarano A., Aquilone G., Varriale V. et al. The potential of open innovation platforms: Driving sustainable development goals through digital collaboration. *Innovation*, 2024, no. 28, pp. 1–24. DOI:10.1080/14479338.2024.2421015
85. Pei R., Chen M., Liu Z. Identifying key digital enablers for urban carbon reduction: A strategy-focused study of AI, big data, and blockchain technologies. *Systems*, 2025, vol. 13, iss. 8. DOI: 10.3390/systems13080646
86. Lin K.Y., Wei S.H. Advancing the industrial circular economy: The integrative role of machine learning in resource optimization. *Journal of Green Economy and Low-Carbon Development*, 2023, vol. 2, iss. 3, pp. 122–136. DOI:10.56578/jgelcd020302
87. Acerbi F., Trevisan A.H., Terzi S. et al. Circular economy upskilling: A course on digital transition and transformation. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 138–152. DOI: 10.1007/978-3-032-03534-9_10
88. Tamym L., Benyoucef L., El Ouadghiri D.M. et al. A big data analytics-based methodology for social sustainability impacts evaluation: A case study. *Procedia Computer Science*, 2023, no. 220, pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.007
89. Lee K. A systematic review on social sustainability of artificial intelligence in product design. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 5. DOI: 10.3390/su13052668
90. Singh A. AI-driven innovations for enabling a circular economy: Optimizing resource efficiency and sustainability. *Innovating Sustainability Through Digital Circular Economy*. NY, IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 47–64. DOI: 10.4018/979-8-3373-0578-3.ch003
91. Calanter P., Drăgoi A.E., Gramaticu M. et al. Circular economy and job creation: A comparative approach in an emerging European context. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 6. DOI: 10.3390/su17062614
92. Nademi Y., Kalmarzi H.S. Breaking the unemployment cycle using the circular economy: Sustainable jobs for sustainable futures. *Journal of Cleaner Production*, 2025, no. 488. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144655
93. Popa R.G., Chenic A.S. Artificial intelligence, consumer trust and the promotion of pro-environmental behavior among youth. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 13. DOI: 10.3390/su17135885
94. Kumar P., Singh R.K., Kumar V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, no. 164. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105215

95. Ingemarsdotter E., Jamsin E., Balkenende R. Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, no. 162. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105047
96. Bjoern J., Upadhyay A. Understanding barriers of circular economy: Cases from the manufacturing industry. *Journal of Enterprise Information Management*, 2019, vol. 33, iss. 4, pp. 729–745. DOI:10.1108/JEIM-02-2019-0047
97. Saarinen A., Aarikka-Stenroos L. Financing-related drivers and barriers for circular economy business: Developing a conceptual model from a field study. *Circular Economy and Sustainability*, 2023, no. 3, pp. 1–25. DOI: 10.1007/s43615-022-00222-5
98. Nikitaeva A.Y., Bondarev M.G., Masych M. et al. The circular economy skills: Regional dimension. *R-Economy*, 2024, vol. 10, iss. 1, pp. 21–40. DOI: 10.15826/recon.2024.10.1.002
99. Guerreschi A., Piras L., Heck F. Barriers to efficient knowledge transfer for a holistic circular economy: Insights towards green job developments and training for young professionals. *Youth*, 2023, vol. 3, iss. 2, pp. 553–578. DOI: 10.3390/youth3020038
100. Sharma M., Joshi S., Govindan K. Overcoming barriers to implement digital technologies to achieve sustainable production and consumption in the food sector: A circular economy perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, no. 39, pp. 203–215. DOI: 10.1016/j.spc.2023.04.002
101. Knickmeyer D. Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 2020, no. 245. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118605

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.