

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БЛОКЧЕЙН И IOT ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ НА ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ

RAQAMLI PLATFORMA ORQALI IKKILAMCHI MATERIAL OQIMLARINI KUZATISHDA BLOKCHEYN VA IOT TEKNOLOGIYALARIDAN FOYDALANISH

¹**Ходжарахманова
Назира Бахтияр кизи**

¹*Магистрант Ташкентского государственного
экономического университета (ТТЭУ)*

Аннотация Annotatsiya

Рус. - В статье рассматривается проблема снижения показателей циркулярности мировой экономики на фоне растущего объёма неиспользуемых вторичных материальных потоков. На основе анализа научной литературы и международной статистики систематизирована функциональная роль блокчейн- и IoT-технологий в отслеживании материалов, выявлены технологические, организационные и институциональные барьеры их внедрения. Предложена концептуальная архитектура цифровой платформы, интегрирующей IoT-сбор данных и блокчейн-реестр, направленная на повышение экономической эффективности и оптимизацию бизнес-процессов в рамках циркулярной экономики.

Uzb. - Maqolada foydalanilmayotgan ikkilamchi material oqimlari hajmining ortib borishi fonida dunyo iqtisodiyoti sirkulyarlik ko'rsatkichlarining pasayishi muammosi ko'rib chiqiladi. Ilmiy adabiyotlar va xalqaro statistika tahlili asosida material oqimlarini kuzatishda blokcheyn va IoT texnologiyalarining funksional roli tizimlashtirilgan, ularni joriy etishning texnologik, tashkiliy va institutsional to'siqlari aniqlangan. IoT orqali ma'lumot yig'ish va blokcheyn reestrini birlashtiruvchi raqamli platformaning kontseptual arxitekturasi taklif etilgan bo'lib, u sirkulyar iqtisodiyot doirasida iqtisodiy samaradorlikni oshirish va biznes-jarayonlarni optimallashtirishga qaratilgan.

Ключевые слова Kalit so'zlar:

❖ *циркулярная экономика, блокчейн, интернет вещей (IoT), отслеживание материальных потоков, цифровая платформа, вторичные ресурсы, цифровизация, экономическая эффективность.*

❖ *sirkulyar iqtisodiyot, blokcheyn, buyumlar interneti (IoT), material oqimlarini kuzatish, raqamli platforma, ikkilamchi resurslar, raqamlashtirish, iqtisodiy samaradorlik.*

Введение.

Переход от линейной модели экономики «добыча — производство — потребление — утилизация» к циркулярной модели, предполагающей многократное

вовлечение материалов и продукции в хозяйственный оборот, признан одним из ключевых направлений устойчивого развития на глобальном уровне. Вместе с тем, как показывают данные

международных докладов, фактическая динамика противоречит декларируемым целям: доля циркулярности мировой экономики сократилась с 9,1% в 2018 году до 7,2% в 2023 году, а из 49 млн тонн электронных отходов, ежегодно образующихся в мире, надлежащим образом перерабатывается лишь пятая часть. Подобный разрыв между растущим признанием экономического потенциала циркулярной модели (оцениваемого в 4,5 трлн долларов США к 2030 году) и снижением реальных показателей её реализации указывает на наличие системной проблемы — недостаточной прозрачности и достоверности учёта вторичных материальных потоков на всех этапах их движения между участниками цепочки поставок.

Актуальность данной проблемы для Республики Узбекистан подтверждается на институциональном уровне: страна последовательно формирует нормативно-правовую базу как для цифровой [1], так и для «зелёной» трансформации экономики. Так, Стратегия «Цифровой Узбекистан — 2030» определяет приоритетные направления развития цифровой инфраструктуры и цифровой экономики [1], а принятая Стратегия перехода к «зелёной» экономике на период до 2030 года ставит задачи внедрения циркулярных практик и модернизации промышленных процессов на их основе [2]. Развитие данных положений закреплено также в стратегии перехода к «зелёной» экономике на 2019–2030 годы, определяющей институциональные условия ресурсоэффективного роста [3]. Однако, как показывает анализ, специализированные механизмы стимулирования именно цифровых платформ отслеживания вторичных материальных потоков в национальном законодательстве пока отсутствуют, что формирует практическую значимость настоящего исследования.

Одним из направлений решения выявленной проблемы выступает цифровизация процессов отслеживания материалов на основе интеграции технологий блокчейн и интернета вещей (IoT). Технология IoT обеспечивает автоматизированный сбор первичных данных о местоположении, состоянии и перемещении материалов в реальном времени, тогда как блокчейн — их неизменяемую фиксацию и доступность для всех участников цепочки без необходимости централизованного посредника. Проведённый анализ научной литературы показал, что, несмотря на значительное количество исследований, посвящённых каждой из технологий по отдельности, работы, предлагающие целостную архитектурную модель их интеграции применительно именно к отслеживанию вторичных материальных потоков — и тем более адаптированную к условиям конкретных национальных экономик, включая Республику Узбекистан, — остаются немногочисленными. Это формирует исследовательский пробел, на восполнение которого направлена настоящая работа.

Целью статьи является анализ возможностей применения технологий блокчейн и IoT для отслеживания вторичных материальных потоков на цифровой платформе и разработка на этой основе концептуальной архитектурной модели, способствующей повышению экономической эффективности и оптимизации бизнес-процессов в рамках циркулярной экономики.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проанализировать глобальную динамику показателей циркулярности экономики и масштаб неиспользуемых вторичных материальных потоков; систематизировать научную литературу по применению блокчейн- и IoT-технологий в

отслеживании материалов; выявить и классифицировать технологические, организационные и институциональные барьеры их внедрения с учётом действующей нормативно-правовой базы [1; 2; 3]; разработать концептуальную архитектуру цифровой платформы; сформулировать практические рекомендации по решению выявленных проблем применительно к национальному контексту.

Структура статьи включает обзор научной литературы по теме исследования, описание методологии, раздел анализа и результатов (включающий количественную оценку глобальных трендов, сравнительный анализ технологий и

барьеров, а также предлагаемую модель платформы) и заключение с практическими рекомендациями.

Обзор литературы по теме исследования.

Четыре тематических блока: (1) концептуальные основы циркулярной экономики; (2) применение блокчейн-технологий для отслеживания материальных потоков; (3) роль IoT и интеграции blockchain-IoT в цепочках поставок; (4) исследования, посвящённые национальному контексту Узбекистана и постсоветского пространства. Ниже систематизированы ключевые работы, вошедшие в анализ.

Таблица 1

Обзор научных исследований по вопросам циркулярной экономики и применения технологии блокчейн

№	Автор(ы), год	Направление исследования	Метод	Основной результат / вывод
1	Ellen MacArthur Foundation, 2013	Экономическое обоснование перехода к циркулярной модели	Аналитический доклад	Заложена базовая терминология и модель «технического» и «биологического» циклов циркулярной экономики
2	Kirchherr, Reike, Hekkert, 2017	Систематизация определений циркулярной экономики	Контент-анализ 114 дефиниций	Показана понятийная фрагментация концепции, предложена обобщённая типология подходов
3	Ghisellini, Cialani, Ulgiati, 2016	Эволюция концепции ЦЭ и её экологическая база	Обзор литературы	Обоснована взаимосвязь между циркулярной моделью и балансом экономических/экологических систем
4	Rosa, Sassanelli, Urbinati, Chiaroni, Terzi, 2020	Связь циркулярной экономики и Индустрии 4.0	Систематический обзор литературы	Установлено, что цифровые технологии выступают ключевым фактором, ускоряющим переход к ЦЭ
5	Kouhizadeh, Sarkis, 2018	Применение блокчейна в «озеленении» цепочек поставок	Концептуальный анализ	Определены практические сценарии применения блокчейна для повышения устойчивости логистики

6	Böckel, Nuzum, Weissbrod, 2021	Разрыв между теорией и практикой блокчейна в ЦЭ	Анализ научно-практического разрыва (research-practice gap)	Показано, что большинство блокчейн-инициатив в ЦЭ не выходят за рамки пилотных проектов
7	Rejeb, Appolloni, Rejeb, Treiblmaier, Iranmanesh, Keogh, 2023	Роль блокчейна в переходе к ЦЭ	Систематический обзор 70 источников	Выделено 6 тематических кластеров исследований, в т.ч. интеграция блокчейна с IoT
8	Hrouga, Sbihi, Chavallard, 2022	Комбинация блокчейна и IoT в реверсивных цепочках поставок	Кейс-стади	Подтверждена возможность повышения точности отслеживания материалов на этапе возврата продукции
9	Rumetshofer, Fischer, 2023	Отслеживание пластиковых материалов для целей ЦЭ	Обзор технологий трекинга	Систематизированы физические и цифровые методы маркировки, включая блокчейн и цифровой паспорт продукта
12	Saydullayev, 2023	Переход Узбекистана к «зелёной» экономике	Аналитический обзор	Определены структурные барьеры и предпосылки «зелёной» трансформации национальной экономики
13	Teo, Zhang, Djuraeva, Ettibaev, 2023	Барьеры внедрения циркулярных практик в сельских МСП Узбекистана	Эмпирическое исследование	Установлено, что ограниченный доступ к цифровой инфраструктуре — один из главных барьеров для МСП
14	Кузьменкова, 2022	Влияние блокчейна на развитие экономики (постсоветский контекст)	Аналитический обзор	Показана применимость блокчейна для повышения прозрачности учётных операций в развивающихся экономиках

Проведённый анализ показывает, что научная литература по теме достаточно полно раскрывает две крайние точки проблемы: с одной стороны — фундаментальные концептуальные основы циркулярной экономики [1–4], с другой — узкоспециализированные технические решения на основе блокчейна и IoT для конкретных отраслей (пластик, электроника, реверсивная логистика) [5, 8–10]. При этом системные работы, объединяющие обе технологии в единую платформенную архитектуру именно для отслеживания вторичных материальных потоков, остаются немногочисленными и преимущественно ограничиваются

систематическими обзорами без предложения прикладных моделей [6, 7, 11]. Ещё более выраженным оказывается пробел в национальном разрезе: исследования, посвящённые Узбекистану [12, 13], фиксируют институциональные и инфраструктурные барьеры, однако не затрагивают вопросы проектирования цифровых платформ как инструмента их преодоления.

Методология исследования.

Исследование построено на сочетании качественного и количественного подходов. Теоретическую базу составил систематический анализ и синтез научной

литературы по вопросам циркулярной экономики, блокчейн- и IoT-технологий, отобранной методом целенаправленной выборки из международных научных баз данных и региональных научных изданий. Количественный анализ основан на вторичных статистических данных международных докладов за период 2018–2024 гг., обработанных методами сравнительного и трендового анализа для выявления динамики глобальной циркулярности экономики и масштаба неиспользуемых вторичных материальных потоков.

Анализ и обсуждение результатов.

Актуальность разработки цифровых платформ для отслеживания вторичных материальных потоков напрямую связана с общемировой тенденцией снижения доли циркулярности глобальной экономики. По данным Circularity Gap Report, публикуемого организацией Circle Economy Foundation, доля материалов, повторно вовлекаемых в хозяйственный оборот, сократилась с 9,1% в 2018 году до 8,6% в 2020–2021 годах и до 7,2% в 2023 году

[29; 26]. Иными словами, несмотря на растущее число национальных стратегий перехода к «зелёной» экономике, в том числе принятых в Республике Узбекистан [1; 2], в абсолютном выражении мировая экономика с каждым годом использует всё большую долю первичного (невозобновляемого) сырья.

Данная тенденция подтверждается на примере электронных отходов — наиболее изученного и наиболее пригодного для цифрового учёта материального потока. Согласно данным Ellen MacArthur Foundation, в мире ежегодно образуется около 49 млн тонн электронных отходов совокупной стоимостью около 63 млрд долларов США, однако лишь 20% этого объёма собирается и перерабатывается надлежащим образом [27]. Оставшиеся 80% выпадают из легального материального цикла — оседают на нерегулируемых свалках, вывозятся нелегально или просто не учитываются существующими системами мониторинга.

Обобщённые количественные показатели, использованные при обосновании актуальности исследования, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Динамика ключевых глобальных показателей циркулярной экономики [27; 28; 29]

Год	Показатель	Значение	Источник
2018	Глобальная циркулярность мировой экономики	9,1%	Circularity Gap Report [29]
2020–2021	Глобальная циркулярность мировой экономики	8,6%	Circularity Gap Report / WEF [28]
2023	Глобальная циркулярность мировой экономики	7,2%	Circularity Gap Report 2024 [29]
2022	Объём электронных отходов в мире	49 млн т (≈63 млрд USD)	Ellen MacArthur Foundation [27]
2022	Доля э-отходов, переработанных надлежащим образом	20%	Ellen MacArthur Foundation [27]
2030 (прогноз)	Потенциальный объём рынка циркулярной экономики	4,5 трлн USD	World Economic Forum [28]

Как видно из таблицы 2, за пять лет (2018–2023 гг.) доля циркулярности

мировой экономики сократилась на 1,9 процентных пункта — с 9,1% до 7,2%, то

есть более чем на пятую часть от исходного уровня. При этом объём образующихся электронных отходов достигает 49 млн тонн в год, тогда как надлежащим образом

перерабатывается лишь пятая их часть (20%), а прогнозируемый объём рынка циркулярной экономики к 2030 году оценивается в 4,5 трлн долларов США.

Доля циркулярности мировой экономики, %

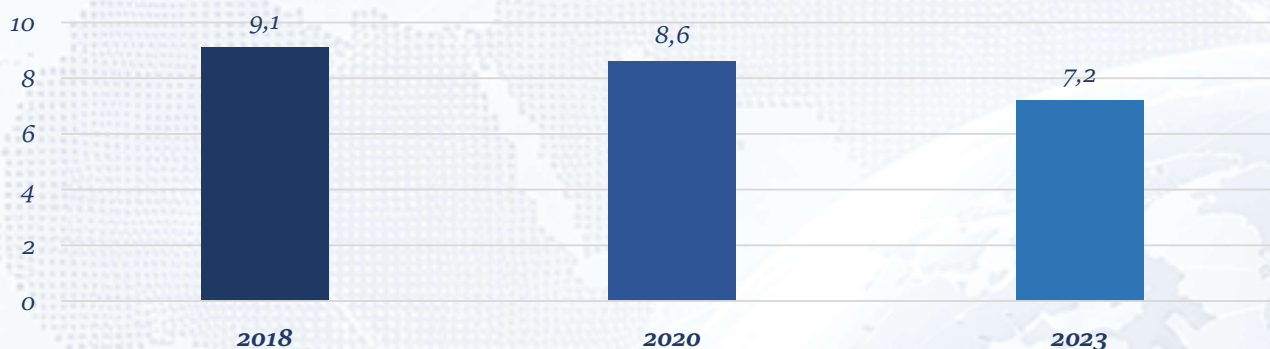


Рисунок 1. Динамика глобальной циркулярности мировой экономики, 2018–2023 гг. [29]

Представленная динамика наглядно демонстрирует устойчивую нисходящую тенденцию: за исследуемый период доля повторно используемых материалов в мировой экономике снизилась почти на четверть — с 9,1% в 2018 году до 7,2% в 2023 году. Особенно показательно, что снижение происходит непрерывно, без периодов стабилизации или восстановления, что указывает на системный, а не случайный характер данного процесса. Подобная динамика противоречит заявленным на глобальном уровне целям устойчивого развития и свидетельствует о том, что темпы вовлечения вторичного сырья в

хозяйственный оборот существенно отстают от темпов роста потребления первичных ресурсов. Именно этот разрыв формирует объективную потребность в цифровых инструментах, способных повысить прозрачность и достоверность учёта материальных потоков, — в первую очередь на основе интеграции технологий блокчейн и IoT, рассматриваемых в последующих разделах статьи. При сохранении текущих трендов разрыв между объёмом образующихся вторичных материалов и долей их фактического возврата в хозяйственный оборот будет только увеличиваться.

Таблица 3

Сравнительный анализ функциональной роли IoT, блокчейн и их интеграции в отслеживании материальных потоков [7; 8; 9; 10; 11; 16]

Технология	Основная функция в отслеживании материальных потоков	Ключевое преимущество
IoT (RFID, GPS-датчики, сенсоры состояния)	Сбор данных в реальном времени о местоположении, состоянии и перемещении вторичных материалов	Автоматизация мониторинга, снижение влияния человеческого фактора
Блокчейн	Неизменяемая, распределённая запись транзакций и цепочки происхождения материала	Прозрачность, взаимное доверие участников без посредников
Интеграция blockchain + IoT	Данные с IoT-устройств автоматически фиксируются в блокчейн-реестре, формируя верифицируемую сквозную запись	Сквозная прослеживаемость «от источника до вторичной переработки», устранение асимметрии информации

На основе результатов, предлагается концептуальная пятиуровневая архитектура цифровой платформы для

отслеживания вторичных материальных потоков (рисунок 2).

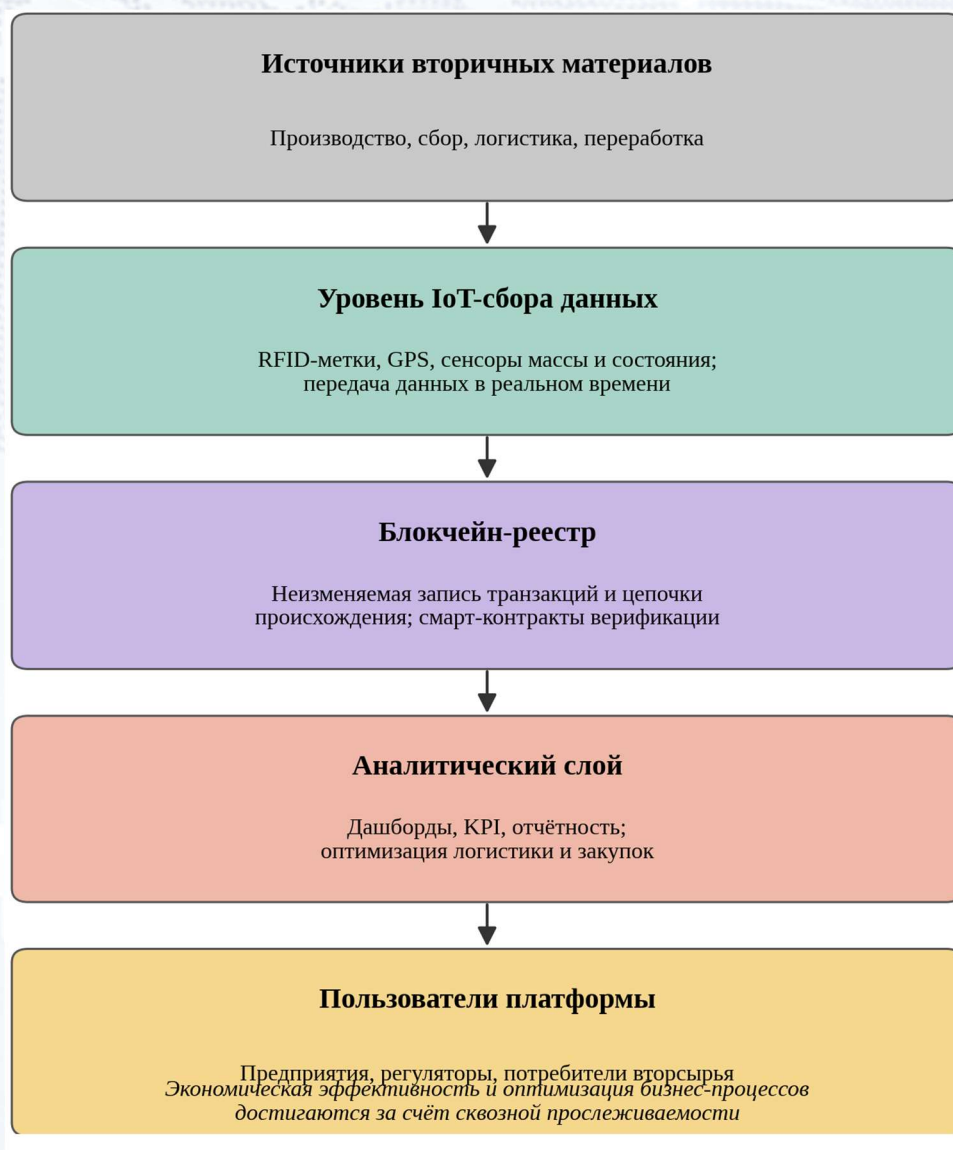


Рисунок 2. Концептуальная архитектура цифровой платформы на основе интеграции IoT и блокчейн-технологий¹

Экономическая эффективность в данной модели достигается за счёт сокращения транзакционных издержек при верификации происхождения вторичного сырья, а оптимизация бизнес-процессов — за счёт автоматизации сбора данных на уровне IoT и исключения необходимости ручной сверки документов между контрагентами цепочки поставок.

Результаты анализа подтверждают, что интеграция блокчейн- и IoT-технологий обладает высоким потенциалом для сокращения разрыва между объёмом образующихся вторичных материалов и долей их фактического возврата в хозяйственный оборот. Вместе с тем практическая реализация подобных платформ сопряжена с рядом

¹Составлено автором на основе анализа научной литературы по исследуемой теме и официальных интернет-источников.

технологических, организационных и институциональных ограничений, которые необходимо учитывать при формировании рекомендаций по внедрению платформы в экономику Республики Узбекистан.

Заключение и предложения.

Проведённый анализ подтвердил, что фиксируемое в последние годы сокращение доли циркулярности мировой экономики (с 9,1% в 2018 году до 7,2% в 2023 году) сопровождается не отсутствием технологических решений, а разрывом между их доступностью и практическим внедрением на уровне отдельных предприятий и отраслей. Сравнительный анализ показал, что наибольший эффект для отслеживания вторичных материальных потоков достигается не изолированным применением блокчейна или IoT, а именно их интеграцией, тогда как основными сдерживающими факторами выступают технологические ограничения масштабируемости, организационная разобщённость участников цепочек поставок, институционально-нормативная неопределённость и недостаточная

цифровая инфраструктура на уровне малого и среднего бизнеса.

В части технологического обеспечения целесообразно поэтапное внедрение гибридных архитектур, где IoT-уровень отвечает за первичный сбор данных, а блокчейн — за их неизменяемую фиксацию, с приоритетным использованием энергоэффективных консенсус-алгоритмов и открытых протоколов обмена данными, обеспечивающих совместимость платформ между отраслями и странами. В части организационных мер предприятиям рекомендуется формировать отраслевые консорциумы и пилотные проекты с участием нескольких звеньев цепочки поставок одновременно, поскольку ценность прослеживаемости данных проявляется только при коллективном, а не одностороннем участии. В части институционально-нормативного регулирования государственным органам следует разработать стандарты цифрового учёта вторичного сырья по аналогии с концепцией цифрового паспорта продукта, интегрировав соответствующие требования в уже принятые стратегические документы цифровой и «зелёной» трансформации.

Список использованной литературы:

1. Указ Президента Республики Узбекистан от 5 октября 2020 г. № ПФ-6079 «Об утверждении Стратегии «Цифровой Узбекистан – 2030» и мерах по её эффективной реализации».
2. Постановление Президента Республики Узбекистан от 2 декабря 2022 г. № ПК-436 «О мерах по переходу Республики Узбекистан к «зелёной» экономике и обеспечению «зелёного» роста до 2030 года».
3. Указ Президента Республики Узбекистан от 4 октября 2019 г. № ПФ-5863 «Об утверждении Стратегии перехода Республики Узбекистан к «зелёной» экономике на период 2019–2030 годов».
4. Ellen MacArthur Foundation. *Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Vol. 1. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013. 96 p.
5. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 114. P. 11–32.
6. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221–232.

7. Kouhizadeh M., Sarkis J. *Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains* // *Sustainability*. 2018. Vol. 10, No. 10. Art. 3652.
8. Böckel A., Nuzum A.-K., Weissbrod I. *Blockchain for the circular economy: Analysis of the research-practice gap* // *Sustainable Production and Consumption*. 2021. Vol. 25. P. 525–539.
9. Rejeb A., Appolloni A., Rejeb K., Treiblmaier H., Iranmanesh M., Keogh J. G. *The role of blockchain technology in the transition toward the circular economy: Findings from a systematic literature review* // *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2023. Vol. 17. Art. 200126.
10. Rejeb A., Zailani S., Rejeb K., Treiblmaier H., Keogh J. G. *Modeling enablers for blockchain adoption in the circular economy* // *Sustainable Futures*. 2022. Vol. 4. Art. 100095.
11. Hrouga M., Sbihi A., Chavallard M. *The potentials of combining blockchain technology and Internet of Things for digital reverse supply chain: A case study* // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 337. Art. 130609.
12. Rumetshofer T., Fischer J. *Information-based plastic material tracking for circular economy – A review* // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 7. Art. 1623.
13. *A Review on Adopting Blockchain and IoT Technologies for Fostering the Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment Value Chain* // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 5. Art. 4574.
14. Abid I., Fuad S. M. Z. A., Chowdhury M. J. M., Chowdhury M. S., Ferdous M. S. *A systematic literature review on the use of blockchain technology in transition to a circular economy* // *arXiv*. 2024. Preprint arXiv:2408.11664.
15. Christidis K., Devetsikiotis M. *Blockchains and smart contracts for the Internet of Things* // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2292–2303.
16. Saberi S., Kouhizadeh M., Sarkis J. *Blockchains and the supply chain: Findings from a broad study of practitioners* // *IEEE Engineering Management Review*. 2019. Vol. 47, No. 3. P. 95–103.
17. Rosa P., Sassanelli C., Urbinati A., Chiaroni D., Terzi S. *Assessing relations between circular economy and Industry 4.0: A systematic literature review* // *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58, No. 6. P. 1662–1687.
18. Кузьменкова В. *Влияние блокчейна на развитие экономики* // *Сибирский журнал экономических и бизнес-исследований*. 2022. Т. 10. № 4. С. 129–142.
19. Евразийская экономическая комиссия. *Криптовалюты и блокчейн как атрибуты новой экономики: доклад*. Москва, 2020.
20. *Применение блокчейн-технологии в архитектуре Интернета вещей (IoT): аналитический обзор* // *TAdviser*. 2018.
21. Ковалева В. В. *Блокчейн-технологии как инструмент привлечения капитала и организации учёта* // *Инновационная экономика*. 2022. № 4(33).
22. Saydullayev A. *Green economy: Is it a path to sustainable economic growth for Uzbekistan?* // *British Journal of Global Ecology and Sustainable Development*. 2023. Vol. 15. P. 129–137.
23. Teo T. C., Zhang A., Djuraeva Z., Ettibaev A. *Out of Uzbekistan: The barriers of adopting circular business practices in rural SMEs* // *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*. 2023. Vol. 11, No. 2. P. 356–380.
24. *Circular Economy – an Introduction to a Challenging Concept (with a View on Uzbekistan)*. 2024.
25. *Current State and Specific Features of Green Innovation Development in Uzbekistan's Industrial Enterprises* // *International Scientific-Electronic Journal «Pioneering Studies and Theories»*. 2025.

26. *Green Innovation and Digitalization in Uzbekistan: Challenges, Opportunities, and Policy Imperatives for Sustainable Development* // *American Journal of Economics and Business Management*. 2025. Vol. 8, No. 1. P. 76–88.

27. *Ellen MacArthur Foundation. Internet of Things Can Help the Circular Economy. Tech Enablers Series. Part 3. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2022.*

28. *World Economic Forum. The World Needs a Circular Economy. Let's Make It Happen. Geneva: World Economic Forum, 2020.*

29. *Circle Economy Foundation. Circularity Gap Report 2024. Amsterdam: Circle Economy Foundation, 2024.*