

<https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-2-10-24>

ISSN 2949-0952 (Print)

УДК 656.07:004.9



## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0 В УСТОЙЧИВЫХ ЦЕПЯХ ПОСТАВОК\*

Семчук Д.Б.<sup>1</sup>, Осинцев Н.А.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, гор. Магнитогорск, Россия

\* Контактное лицо: [osintsev@magtu.ru](mailto:osintsev@magtu.ru)  
[semchuk\\_db@mail.ru](mailto:semchuk_db@mail.ru) (С.Д.Б.)

**Аннотация.** Активное влияние процессов глобализации, цифровизации и интеграции на мировую экономику привело к необходимости изменения подходов и методов управления цепями поставок. Одним из важных условий устойчивого развития компаний является использование принципов и технологий концепции «Индустрия 4.0» при управлении цепями поставок. В работе выполнен анализ основных понятий, принципов и технологий Индустрии 4.0, используемых в логистике и при управлении цепями поставок. Выявлены основные преимущества использования технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок и установлены причины недостаточной эффективной реализации данных технологий. Выполнена систематизация принципов Индустрии 4.0 в логистике и при управлении цепями поставок для достижения целей устойчивого развития. Использование предложенной системы принципов и технологий Индустрии 4.0 при планировании изменений в цепях позволит осуществить поэтапную цифровую трансформацию всей цепи поставок и её элементов, а также достичь синергетического эффекта в результате внедрения взаимодополняющих технологий.

**Ключевые слова:** индустрия 4.0, логистика, логистика 4.0, цепи поставок, цепи поставок 4.0, устойчивое развитие, принципы, технологии, систематизация

© Семчук Д.Б., Осинцев Н.А., 2023

Поступила: 23 июля 2023; Принята к публикации: 15 сентября 2023; Опубликована: 23 декабря 2023

\* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>

### Для цитирования:

Семчук Д.Б., Осинцев Н.А. Систематизация принципов и технологий Индустрии 4.0 в устойчивых цепях поставок // Недропользование и транспортные системы. 2023. Т.13. №2. С.10–24. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-2-10-24>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-2-10-24>

ISSN 2949-0952 (Print)



## SYSTEMATIZATION OF INDUSTRY 4.0 PRINCIPLES AND TECHNOLOGIES IN SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN

Dmitry Semchuk<sup>1</sup>, Nikita Osintsev<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

\* Corresponding: [osintsev@magtu.ru](mailto:osintsev@magtu.ru)  
[semchuk\\_db@mail.ru](mailto:semchuk_db@mail.ru) (S.D.)

**Abstract.** The active influence of globalization, digitalization, and integration processes on the world economy has led to the need to change approaches and methods of supply chain management. One of the important conditions for sustainable development of companies is the use of principles and technologies of the Industry 4.0 concept in supply chain management. The paper analyzes the main concepts, principles, and technologies of Industry 4.0 used in logistics and supply chain management. The main advantages of using Industry 4.0 technologies in supply chains are identified and the reasons for the lack of effective implementation of these technologies are established. The systematization of Industry 4.0 principles in logistics and supply chain management to achieve sustainable development goals is carried out. The use of the proposed system of Industry 4.0 principles and technologies in planning changes in chains will allow implementing a step-by-step digital transformation of the entire supply chain and its elements, as well as to achieve a synergistic effect as a result of the introduction of complementary technologies.

**Ключевые слова:** industry 4.0, logistics, logistics 4.0, supply chain, supply chain 4.0, sustainable development, principles, technology, systematization

© Semchuk D.B., Osintsev N.A., 2023

Received: July 23, 2023; Accepted: September 15, 2023; Published: December 23, 2023

\* The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation No. 23-21-10038, <https://rscf.ru/en/project/23-21-10038/>

### For citation:

Semchuk D., Osintsev N. Systematization of Industry 4.0 Principles and Technologies in Sustainable Supply Chain // Subsurface Management and Transportation Systems. 2023, Vol.13, No.2, pp.10-24. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2023-13-2-10-24>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

Эффективность функционирования современных предприятий зависит от потоковых явлений в экономике и методов управления этими потоками, которые являются инструментами логистики. Стремительное развитие данных методов обусловлено как рядом привычных факторов – увеличение объёмов товарных потоков, повышение конкуренции, изменениями в бизнес среде и поведении стейкхолдеров, так и новыми вызовами: сокращение продолжительности жизненного цикла товаров [1], стремительное развитие инноваций [2], повышение устойчивости [3], повышение рисков [4], а также трансформация цепей поставок, вызванная влиянием геополитических факторов (военные конфликты [5] и угрозы [6], пандемия Covid-19 [7, 8], санкции [9]).

Увеличивающаяся сложность и уязвимость глобальных цепей поставок приводят к различным проблемам их функционирования. Компании сталкиваются с нехваткой и отсутствием запасов, длительными сроками доставки и сбоями при транспортировке, нехваткой рабочей силы, замедлением производства и поставок, что влияет на процессы устойчивости цепей [10]. Специфика каждого элемента цепочки поставок и их влияние друг на друга обосновывает необходимость применения комплексного подхода при разработке стратегии развития как отдельного предприятия внутри цепи, так и всей цепи в целом с использованием современных концепций, основанных на принципах устойчивого развития и ESG-принципов (Environmental, Social, Governance – экология, социальная политика и управление), Индустрии 4.0. Реализация данных концепций позволяет применять в цепях поставок инновационные и «зелёные» технологии, открывая новые возможности для бизнеса и обеспечивая достижение целей устойчивого развития (ЦУР) [11].

Цепочки поставок – это интеллектуальные системы, которым необходимо адаптироваться, чтобы выжить. Современные цепи поставок должны по новому использовать устаревшие стратегии, повышать свою транспарентность, гибкость, надёжность, устойчивость, стабильность и масштабируемость [12]. Переход к цифровому производству и интернет-торговле обязывает по-новому посмотреть на логистику и управление цепями поставок как на инструменты управления цепями создания ценности и определить фокус изменений, которые должны произойти в них под влиянием перехода на киберпроизводство [13]. Основными факторами, определяющими направления трансформации цепей поставок, являются: меняющиеся ожидания клиентов, изменение конкурентного ландшафта транспортно-логистической сферы, омниканальность, логистическая конвергенция и доставка последней мили [14].

В последнее десятилетие все больший интерес научных исследователей и практиков привлекает решение проблем устойчивого развития в эпоху реализации концепции «Индустрия 4.0» [15, 16], в том

числе в логистике [17], управлении цепями поставок [18, 15] и в «зелёных» цепях поставок [19–21]. Несмотря на стремительное развитие научных исследований по данным направлениям, имеющиеся знания недостаточно систематизированы, а опыт их применения на практике пока несёт преимущественно частный характер, что не позволяет масштабировать его на всю цепочку.

Целью данной статьи является исследование принципов и технологий Индустрии 4.0, обеспечивающих устойчивое формирование и развития цепей поставок. Структура статьи организована следующим образом. В разделе «Литературный обзор» представлены результаты анализа исследований по проблемам реализации принципов и технологий Индустрии 4.0 в логистике и управлении цепями поставок. Раздел 3 содержит результаты систематизации принципов и технологий Индустрии 4.0 применительно к устойчивым цепям поставок. В разделе «Заключение» представлены основные результаты и показаны перспективы развития исследования.

## 2. Литературный обзор

### 2.1. Анализ понятий «Индустрия 4.0», «Логистика 4.0» и «Цепи поставок 4.0»

Термин «Индустрия 4.0» предложен немецкими исследователями Х.Кагерманом, В.-Д. Лукасом и В.Вальстером. Концепция «Индустрия 4.0» была озвучена в 2011 году президентом Всемирного экономического форума Клаусом Швабом на Ганноверской ярмарке как обозначение процесса коренного преобразования глобальных цепочек создания стоимости путём реализации инновационных технологий в производственных системах. К.Бартодзей [22] рассматривает Индустрию 4.0 как техническую интеграцию киберфизических систем в производственные и логистические процессы, а также использование Интернета вещей и сервисов в промышленных процессах.

С момента появления термина «Индустрия 4.0» в литературе появились множество определений данного понятия [23], а также использования собственных интерпретаций термина «Индустрия 4.0» в разных странах [24, 25]. Например, *Smart Industry* (Нидерланды), *Fabbrica Intelligente* (Италия), *Nouvelle France Industrielle* (Франция), *Smart Factory / Manufacturing Innovation 3.0* (Южная Корея), *Made in China 2025* (Китай), *SAMARTH Udyog Bharat 4.0* (Индия), *Catapult* (Великобритания), *Industrial Value Chain Initiative (IVI)* (Япония), *Produktion 2030* (Швеция), *Industria Conectada* (Испания), *Prumysl 4.0* (Чехия), *Advanced Manufacturing Partnership / Advanced Manufacturing 2.0* (США), *Intelligent Manufacturing Systems* (Швейцария), *Future of Manufacturing* (Норвегия) и др. В логистической деятельности в последние годы появляются такие новые понятия как «Логистика 4.0» (Logistics 4.0), «Умная логистика» (Smart Logistics), «Цепь поставок 4.0» (Supply Chain 4.0) и др.

Термин «Логистика 4.0» указывает на конкретное

применение Индустрии 4.0 в области логистики [26]. Авторы [27] на основе литературного обзора пришли к выводу, что Логистика 4.0 не является концепцией, а представляет собой комплекс известных технических, технологических и организационных решений для поддержания логистических процессов в цепочке поставок. По мнению [28], «Логистика 4.0» описывает переход от логистики, ориентированной на оборудование, к логистике, ориентированной на программное обеспечение. В контексте «Логистики 4.0» логистические системы состоят из автономных подсистем, где поведение отдельных участников зависит от других участников или смежных подсистем. Автономные системы взаимодействуют друг с другом для достижения своих индивидуальных целей и целей соответствующих заинтересованных сторон. Таким образом, они реализуют локальную оптимизацию, которая приводит к эмерджентному поведению [28]. В исследованиях [29] «Логистика 4.0» рассматривается как интеграция интеллектуальных технологий в логистику для удовлетворения спроса на продукцию и услуги с высокой степенью индивидуализации.

В работе [30] на основе обобщения технологий и принципов Индустрии 4.0 в цепях поставок представлено детальное определение: «Логистика 4.0 – это собирательный термин для обозначения технологий и концепций организации цепочки ценности (Value Chain). В рамках логистики киберфизических систем осуществляется контроль физических процессов, формируется виртуальная копия физического мира и принимаются децентрализованные решения. Через Интернет вещей киберфизические системы взаимодействуют друг с другом и людьми в режиме реального времени с использованием систем поддержки принятия решений. С помощью Интернета вещей участники цепочки ценности обмениваются как внутри-, так и межорганизационными услугами».

В последние годы всё чаще в научной литературе упоминается термин «Цепь поставок 4.0» [31]. Цепь поставок 4.0 основана на предыдущих поколениях цепочек поставок – 1.0 (эра до Интернета), 2.0 (эра Интернета), 3.0 (эра глобализации и аутсорсинга). В настоящее время на практике уже формируются цепи поставок 5.0, использующие новейшие технологии и инновационные подходы, позволяющие сделать цепочки ориентированными на клиента, прозрачными, устойчивыми, быстро реагирующими на внешние изменения и гибкими [12].

В работе [31] представлен анализ около 500 статей по проблемам реализации Индустрии 4.0 в цепях поставок. Авторы отмечают быструю трансформацию существующих цепей поставок в цепи поставок 4.0, в том числе, вызванную пандемией COVID-19. При этом указывают, что исследования в области цепочки поставок 4.0 все ещё находятся на зачаточной стадии. На основе обзора ими сформулировано определение цепи поставок 4.0 как подхода управления цепями поставок, который реструктурирует и оптимизирует процессы, деятельность и отношения в цепочке за

счёт использования различных технологий Индустрии 4.0 для повышения эффективности и получения большего конкурентного преимущества на рынке.

В другом обзоре [32] цепь поставок 4.0 рассматривается как интегрированная и скоординированная экосистема, возникшая в результате процесса оцифровки и общей интеграции интеллектуальных технологий в её деятельность. На основе анализа статей за 2010–2023 годы авторы показали, что Индустрия 4.0 потребовала от компаний переосмысления структуры и стратегии развития своих цепочек поставок, доказала преимущество использования технологий Индустрии 4.0 для достижения устойчивости цепей.

Таким образом, выполненный анализ среды управления цепями поставок в эпоху Индустрии 4.0 показывает растущий интерес учёных к исследованию и использованию достижений Индустрии 4.0 для повышения эффективности и устойчивости цепей поставок. Ключевой проблемой реализации концепции в компаниях и цепях поставок является отсутствие единой системы принципов и технологий Индустрии 4.0, а также недостаточная системность и комплексность реализации технологий Индустрии 4.0 для повышения устойчивости цепей поставок.

## 2.2. Анализ принципов и технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок

Несмотря на то, что концепция «Индустрия 4.0» изучается множеством исследователей [33], на данный момент не существует общепринятой системы принципов и технологий. Причиной этому является как адаптивный характер самой концепции, подразумевающий постоянное пополнение списка технологий вследствие их появления и обновления, так и разница в подходах к её изучению. Многие исследователи подходят к изучению концепции не системно, а затрагивая лишь определённую часть, например вопросы реализации технологий Интернета вещей, облачных технологий или искусственного интеллекта. По мнению [34], технологии Индустрии 4.0 можно разделить на физические и цифровые. Физические технологии в основном относятся к производственным технологиям, таким как аддитивное производство, роботы, датчики, беспилотники и др. Цифровые технологии в основном относятся к современным информационным и коммуникационным технологиям, таким как облачные вычисления, блокчейн, аналитика больших данных, моделирование и др.

На основе анализа работ, посвящённых интеграции «Индустрия 4.0» в цепи поставок, авторами [35] сформулированы три парадигмы Индустрии 4.0 – умный продукт (smart product), умная машина (smart machine) и расширенный оператор (augmented operator). Парадигма «Умный продукт» относится к объектам и машинам, которые оснащены датчиками и микрочипами, управляются программным обеспечением и подключены к Интернету. Это позволяет вносить изменения в производственный процесс – когда производить, где производить или какой пара-



метр следует принять для завершения производства продукта. Парадигма «Умная машина» относится к устройству, оснащённому технологиями межмашинного взаимодействия и/или когнитивных вычислений, то есть искусственным интеллектом и функциями машинного обучения. Используя эти технологии, машины могут рассуждать, принимать решения и, в итоге, действовать. Парадигма «Расширенный оператор» подчёркивает технологическую поддержку работника в производственной системе с большей гибкостью и модульностью. Расширенный оператор обеспечивает автоматизацию знаний в системе, тем самым делая их наиболее гибкой и адаптивной частью производственной системы [35].

В ряде работ [36, 37, 34, 38, 16, 25, 33, 39, 12, 31] представлены систематизация и описание технологий Индустрии 4.0. Анализ работ позволяет говорить об отсутствии единого взгляда на группировку и систематизацию множества технологий Индустрии 4.0. Наиболее часто выделяют следующие группы технологий Индустрии 4.0 при управлении устойчивыми цепями поставок [38, 39, 34]:

*Виртуальная реальность (Virtual reality)* – новые технологии, предлагающие интерактивный опыт, который может улучшить обучение, обслуживание и повысить эффективность процесса принятия решений. Основные преимущества [12]: повышение эффективности проектирования и планирования; повышение качества обучения; возможность создания прототипов продукции.

*Дополненная реальность (Augmented reality)* – технологии, которые могут повысить устойчивость цепей поставок путём наложения цифровой информации на реальную физическую среду. Основные преимущества [38, 33]: повышение прозрачности цепи поставок; повышение качества слежения за товарами; сокращение объёма отходов; контроль уровня запасов; инновационная упаковка и предоставление потребителям подробной информации о товарах; снижение энергопотребления; снижение числа ошибок на этапе проектирования (дизайна) продукции; повышение качества обучения персонала; повышение производительности.

*Большие данные (Big data)* – технологии, которые позволяют собирать, хранить, передавать и анализировать большие объёмы данных по всей цепочке поставок с целью создания знаний и информации. Основные преимущества [38]: возможность учёта большого объёма и разнообразия данных, генерируемых в цепях поставок; оперативный поиск информации для оптимизации процессов; сокращение использования ресурсов; снижение выбросов CO<sub>2</sub>; повышение эффективности планирования и прогнозирования; повышение эффективности анализа исторических и текущих данных.

*Роботизация (Robotics)* – технологии, способные к воспроизведению действий человека на производстве, а также к познанию, навигации, мобильности и сложным взаимодействиям. Это обеспечивает выпол-

нение процессов и операций с высокой автономностью, гибкостью и оптимальным взаимодействием. Основные преимущества [37]: повышение адаптивности и гибкости производственной системы; снижение затрат; повышение автономности и безопасности процессов; выполнение работ без участия человека.

*Аддитивное производство (Additive manufacturing)* – соединение материалов слой за слоем с целью создания физического результата на основе 3D-модели. Основные преимущества [38]: снижение отходов; производство товаров по индивидуальным заказам с более короткими сроками изготовления; уменьшение объёмов запасов сырья и готовой продукции; эффективное использование производственных мощностей.

*Интернет вещей (Internet of Things)* – сеть физических объектов, оснащённых встроенными компонентами и технологиями, исполнительными механизмами, датчиками, счётчиками и др. для обработки и обмена данными через Интернет. Основные преимущества [38, 12]: прозрачность и оптимизация процесса принятия решений; снижение энергопотребления; предиктивное и диагностическое обслуживание; повышение гибкости процессов; повышение эффективности контроля качества; сокращение нерационального производства; обнаружение неисправных компонентов; уменьшение амортизационных и других текущих затрат; увеличение скорости доставки продукции.

*Интеллектуальные системы (Intelligent systems)* – ключевые информационные системы в цепях поставок, обеспечивающие реализацию технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок – система планирования ресурсов предприятия (ERP – Enterprise Resource Planning), система управления взаимоотношениями с клиентами (CRM – Customer Relationship Management), система управления производством (MES – Manufacturing Execution System), система управления складом (WMS – Warehouse Management System), информационные системы управления (MIS – Management Information System), система управления перевозками (TMS – Transportation management systems), а также интеллектуальные транспортные системы. Основные преимущества [40, 41]: повышение эффективности планирования и управления; повышение качества контроля функционирования элементов цепей поставок; автоматизация транспортных и логистических операций; контроль, анализ и визуализация информации; поддержка реализации инструментов «зелёной» логистики; снижение затрат.

*Облачные вычисления (Cloud computing)* – технологии, которые обеспечивают совместное хранение, управление и анализ данных для облегчения взаимодействия в рамках всей цепи поставок. Основные преимущества [38, 12]: рационализация операций и процессов; повышение прозрачности и улучшение коммуникаций; снижение энергопотребления; повышение гибкости и масштабируемости; оптимизация логистических операций; сокращение количества

отходов; снижение уровня запасов; повышение производительности системы; сокращение выбросов парниковых газов; повышение эффективности планирования и прогнозирования; децентрализация производства.

*Моделирование (Simulation)* – использование данных, поступающих в режиме реального времени, для отражения физического мира в виртуальной модели, которая может включать технические устройства, продукты и людей. Основные преимущества [36, 37]: проверка эффективности изменений без их реализации; оценка изменений в конфигурации систем и процессов; повышение эффективности процессов планирования, прогнозирования, проектирования, принятия управленческих решений; повышение эффективности оценки динамики бизнес-систем; снижение затрат; сокращение циклов разработки и повышение качества продукции.

*Искусственный интеллект (Artificial intelligence)* – компьютерный интеллект, который может воспроизводить, аппроксимировать, автоматизировать и, в итоге, превосходить человеческое мышление. Основные преимущества [38, 12]: улучшение процесса принятия решений в цепи поставок; предиктивное обслуживание; сокращение выбросов CO<sub>2</sub>; оптимизация организационной структуры; улучшение информационных «зелёных» технологий; повышение энергосбережения; продвижение чистых производственных процессов; развитие инновационной экосистемы; дематериализация экономической деятельности; снижение ресурсоёмкости процессов; повышение качества обслуживания клиентов и управление отношениями с поставщиками.

Помимо перечисленных технологий на устойчивость цепей поставок оказывают влияние и другие технологии Индустрии 4.0 [38, 12, 39, 34]: киберфизические системы (Cyber-physical systems), радиочастотная идентификация (RFID – Radio Frequency IDentification), горизонтальная интеграция (Horizontal integration), вертикальная интеграция (Vertical integration), интернет услуг (Internet of service), интернет людей (Internet of people), информационная безопасность (Cyber security), нанотехнологии (Nanotechnology); семантические технологии (Semantic technologies), автоматизация (Automation), автономные транспортные средства и дроны (Autonomous vehicles and drones); цифровые двойники (Digital twins); блокчейн (Blockchain) и др.

Наличие единой системы принципов и технологий является базисом для построения стратегии развития компании и принятия решений, так как позволяет оценить объект изменений на соответствие принципам и понимать, какого результата можно достичь и с помощью какого набора технологий. В результате анализа научных публикаций по теме Индустрии 4.0, основные результаты которого представлены в **табл. 1**, была решена задача формирования системы ключевых принципов и технологий

Индустрии 4.0. Итоговая система включает в себя 7 базовых принципов, а именно:

- *функциональная совместимость человека и оборудования* подразумевает непосредственное участие технологий в деятельности работника и повышение синергетического эффекта от взаимодействия типа «человек-машина». Применяемые технологии могут выполнять ряд функций – повышение производительности, снижение рисков травмирования, повышение уровня коммуникации среди сотрудников и тому подобное. Реализация принципа происходит в результате роботизации производства и применения коллаборативных роботов (коботов) [42]; аддитивных технологий, а также инструментов дополненной и виртуальной реальности [37];
- *автоматизация процессов* как направление по переводу рабочих процессов в автоматический режим работы с ограниченным участием или без участия человека. Автоматизации подлежат как физические процессы, например, через применение роботов, так и управленческие, путём реализации интеллектуальных систем для принятия решений [43];
- *автономизация процессов* или реализация полностью автономных технологий, способных самостоятельно выполнять возложенные функции, например сбор, анализ и передачу данных. Полностью автономную технологию от автоматизированной отличает возможность объекта самостоятельно принимать решение по выполнению своих функций в режиме реального времени на основе актуальных данных [37]. Ключевые технологии автономизации – автономные роботы [37] и автономный транспорт [44], искусственный интеллект и Интернет вещей.
- *адаптивность* как свойство и действия по её повышению. Адаптивность подразумевает возможность системы оперативно реагировать на изменения путём продвинутого прогнозирования событий на основе имитационных моделей [45], сбора и обработке актуальной информации из окружающей среды (умные приборы), Интернет вещей и эффективном принятии решений (интеллектуальные системы и искусственный интеллект);
- *цифровизация информации* как процесс перевода данных в цифровой формат для возможности работы с ними другим технологиям Индустрии 4.0. Постоянный поток оцифрованной, понятной для машины информации является одним из базовых условий реализации практически всех современных технологий. Процесс цифровизации включает в себя реализацию технологий по сбору информации (сенсоры и датчики, RFID-метки), её обработке, например, методы обработки больших данных [46], или комбинированных систем (умные приборы и Интернет вещей);
- *прозрачность информации и процессов* как

возможность оперативно получать достоверную информацию о процессе, состоянии отдельного объекта или всей системы. Прозрачности в зависимости от масштаба можно добиться как с помощью отдельных технологий (установка датчиков на производственные станки), так и сложных комплексных решений вроде цифровых двойников, подразумевающих совместное применение облачных технологий, Интернета вещей, искусственного интеллекта и имитационного моделирования;

- интеграция систем и процессов, подразумевающая непрерывный процесс по увеличению количества и улучшению качества связей между производственными объектами с целью снижения общих издержек, устранения дублирования функ-

ций и реализации новых технологий на общей информационной базе. Также этот принцип реализуется путём увеличения эффективности взаимодействия типа «машина-машина» [47]. Ключевой технологией интеграции являются современные информационные системы (WMS, ERP и т.д.), способствующие активной цифровизации и дальнейшей интеграции с другими системами. При этом некоторые технологии значительно ускоряют процесс интеграции (облачные технологии), тогда как другие получают прирост эффективности при её реализации (имитационное моделирование, большие данные, интеллектуальные системы).

Таблица 1. Результаты анализа упоминания принципов Индустрии 4.0 в научной литературе  
Table 1. Results of the analysis of mentions of the principles of Industry 4.0 in the scientific literature

№	Принципы	Ключевые технологии	Источники
1	Функциональная совместимость человека и оборудования	Виртуальная реальность, дополненная реальность, роботы, аддитивное производство, имитационное моделирование, искусственный интеллект	[37, 42, 47, 48, 22, 49–54]
2	Автоматизация процессов	Роботы, аддитивное производство, искусственный интеллект, интеллектуальные системы, Интернет вещей	[37, 43, 55–57, 22, 49, 51, 52, 54]
3	Автономизация процессов	Роботы, интеллектуальные системы, Интернет вещей, искусственный интеллект	[37, 44, 56, 22, 58, 49, 59]
4	Адаптивность	Интеллектуальные системы, Интернет вещей, имитационное моделирование, аддитивное производство, роботы, искусственный интеллект	[57, 56, 22, 58, 50, 59, 53, 54]
5	Цифровизация информации	Большие данные, виртуальная реальность, дополненная реальность, имитационное моделирование, Интернет вещей	[46, 60, 56, 57, 22, 61, 50, 62, 51, 59, 52, 53]
6	Прозрачность информации	Имитационное моделирование, облачные технологии, интеллектуальные системы, Интернет вещей, виртуальная реальность, дополненная реальность	[44, 56, 63, 64, 57, 62, 51, 59, 53, 54]
7	Интеграция систем и процессов	Облачные технологии, имитационное моделирование, большие данные, роботы, аддитивное производство, интеллектуальные системы, Интернет вещей, искусственный интеллект	[56, 57, 22, 50, 62, 51, 59, 52–54, 65]

### 3. Систематизация принципов и технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок

Концепция «Индустрия 4.0» позволяет в полной мере реализовать комплексный и системный подход к управлению и оптимизации цепей поставок, так как внедряемые технологии воздействуют на логистические потоки и рассчитаны на улучшение методов управления вдоль всей цепи поставок, что обосновывает использование обоих подходов в данном исследовании. Реализация технологий Индустрии 4.0 по отношению к одному из элементов цепи поставок неизменно влечёт за собой изменения в других элементах и в системе в целом. Комплексность означает необходимость всестороннего анализа всех направлений Индустрии 4.0, а системность подразумевает охват всех элементов цепи поставок при реализации технологий с целью получения синерге-

тического эффекта. В работе также применяется потоковое представление процессов – важный элемент системного подхода в логистике.

На основе проведённого литературного анализа, а также анализа существующего опыта реализации технологий Индустрии 4.0 в различных элементах цепей поставок была осуществлена систематизация принципов и технологий Индустрии 4.0 (рис. 1). Предложенная система принципов, включающая в себя принципы функциональной совместимости человека и оборудования, автоматизации и автономизации процессов, адаптивности, цифровизации и прозрачности информации, интеграции систем и процессов в полной мере отражает основные идеи концепции, а комплексная реализация упомянутых технологий позволяет эти принципы осуществить.

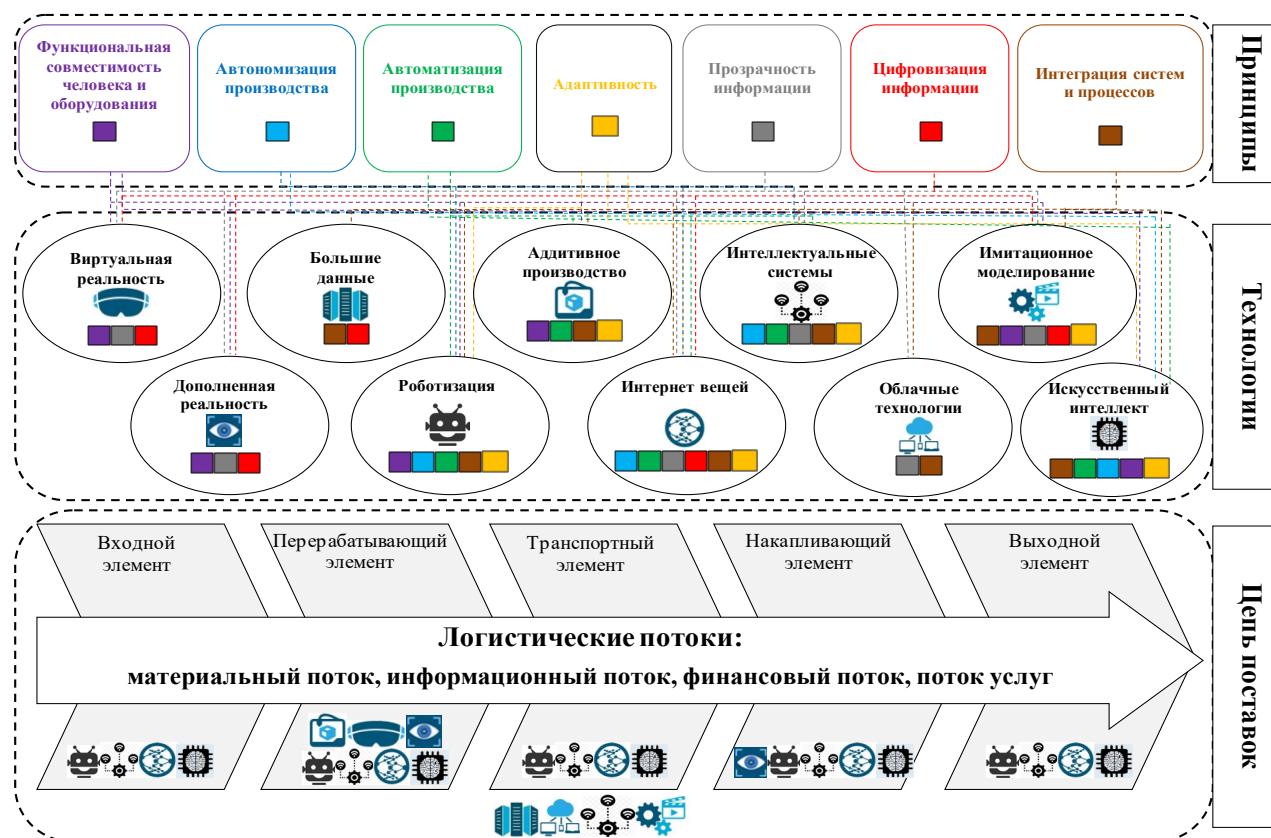


Рис. 1. Систематизация принципов и технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок

Fig. 1. Industry 4.0 principles and technologies systematization

На (рис. 1) также показаны возможности реализации концепции в цепях поставок и их элементах.

Таким образом, анализ зарубежного опыта реализации принципов и технологий концепции «Индустрия 4.0» в логистике и управлении цепями поставок для достижения целей устойчивого развития позволил сформулировать следующие положения [66–68]:

- Индустрия 4.0 – концепция развития промышленности, основывающаяся на массовом внедрении киберфизических систем в производство. Принципы и технологии концепции «Индустрия 4.0» дополняют достижения третьей промышленной революции, а не заменяют их;
- основные принципы концепции «Индустрия 4.0»: функциональная совместимость человека и оборудования, автономизация и децентрализация производства, прозрачность информации, а также возможность её виртуализации, интеграция физических операций и процессов в единое информационное пространство. Сопоставление принципов Индустрии 4.0 и принципов устойчивого развития позволяет говорить о наличии противоречий, однако большинство принципов Индустрии 4.0 направлены на формирование баланса между экономическими, экологическими и социальными аспектами деятельности;
- технологии Индустрии 4.0 являются эффективным инструментом совершенствования производства, обеспечивают снижение негативного влияния на экологию и социальную сферу, способствуют достижению ЦУР. Наиболее перспективными технологиями для достижения таких ЦУР, как «Качественное образование», «Достойная работа и экономический рост», «Индустриализация, инновации и инфраструктура», «Устойчивые города» считаются «интернет вещей», облачные технологии, «умные» системы и дополненная реальность;
- концепция «Индустрия 4.0» позволяет в полной мере реализовать комплексный и системный подход к управлению и оптимизации цепей поставок, так как внедряемые технологии воздействуют на логистические потоки и рассчитаны на улучшение методов их управления вдоль всей цепи поставок. Однако как показал анализ, наблюдается отсутствие комплексного подхода реализации Индустрии 4.0 в логистике и при управлении цепями поставок – технологии рассматриваются в отрыве друг от друга и не учитывается их влияние на другие элементы цепи поставок;
- реализация принципов Индустрии 4.0 позволяет значительно повысить эффективность функцио-



нирования логистической системы за счёт совершенствования качества и оперативности работы с информационным логистическим потоком, повышая его прозрачность и управляемость. Использование технологий Индустрии 4.0 применительно к элементам цепей поставок приводит к оптимизации работы оборудования, повышению уровня автономности и автоматизации процессов.

В то же время реализация Индустрии 4.0 в устойчивых цепях поставок недостаточно изучена. Необходимо выявлять экономические, геополитические, технические и социальные факторы реализации данной концепции в цепях поставок и разрабатывать рекомендации по адаптации существующих технологий Индустрии 4.0 для достижения целей устойчивого развития.

#### 4. Заключение

В работе представлены результаты анализа публикаций по теме Индустрии 4.0 и применения концепции в логистике и управления цепями поставок. Установлено, что в настоящее время отсутствует единая системы принципов и технологий Индустрии

4.0 для формирования устойчивых цепей поставок. Авторами проанализированы существующие понятия, принципы и технологии Индустрии 4.0, предложена их систематизация для реализации в устойчивых цепях поставок. Система включает 7 принципов: функциональная совместимость человека и оборудования, автоматизация и автономизация процессов, адаптивность, цифровизация и прозрачность информации, интеграция систем и процессов. Установлены принципы, которые должны использоваться для реализации технологий Индустрии 4.0 в цепях поставок.

Дальнейшее развитие исследования предполагает разработку методики выбора технологии Индустрии 4.0 для реализации в цепях поставок с целью повышения их устойчивости. Такая методика основана на комплексной оценке цепи поставок и технологий Индустрии 4.0 по множеству параметров и показателей. Для создания такой методики целесообразным является использование методов многокритериального анализа.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>

#### Список литературы

1. Rasi R. Z., Ismail H., Shahbaz M. S., Kaliani Sundram V. P. Interdisciplinary Challenges in the Circular Supply Chains: A systematic literature review // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. No. 4. <https://www.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15225>.
2. Malacina I., Teplov R. Supply Chain Innovation Research: A Bibliometric Network Analysis and Literature Review // *International Journal of Production Economics*. 2022. Vol. 251. pp. 108540. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108540>.
3. Осинцев Н., Рахмангулов А. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. № 3. С. 180-196. <https://www.doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196>.
4. Emrouznejad A., Abbasi S., Sıcakyüz Ç. Supply Chain Risk Management: A Content Analysis - Based Review of Existing and Emerging Topics // *Supply Chain Analytics*. 2023. Vol. 3. pp. 100031. <https://www.doi.org/10.1016/j.sca.2023.100031>.
5. Srari J. S., Graham G., van Hoek R., Joglekar N., Lorentz H. Impact Pathways: Unhooking Supply Chains from Conflict Zones – Reconfiguration and Fragmentation Lessons from the Ukraine-Russia War // *International Journal of Operations & Production Management*. 2023. Vol. 43. No/ 13. pp. 289-301. <https://www.doi.org/10.1108/IJOPM-08-2022-0529>.
6. Liso N. de, Zamparini L. Innovation, Transport Security and Supply Chains: A Review // *Transport Reviews*. 2022. Vol. 42. No 6. pp. 725-738. <https://www.doi.org/10.1080/01441647.2022.2105415>.
7. Farooq M. U., Hussain A., Masood T., Habib M. S. Supply Chain Operations Management in Pandemics: A State-of-the-Art Review Inspired by COVID-19 // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 5. pp. 2504. <https://www.doi.org/10.3390/su13052504>.
8. Siagian H., Tarigan Z. J. H., Jie F. Supply Chain Integration Enables Resilience, Flexibility, and Innovation to Improve Business Performance in COVID-19 Era // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 9. pp. 4669. <https://www.doi.org/10.3390/su13094669>.
9. Meyer K. E., Fang T., Panibratov A. Y., Peng M. W., Gaur A. International Business Under Sanctions // *Journal of World Business*. 2023. Vol. 58.No. 2. pp. 101426. <https://www.doi.org/10.1016/j.jwb.2023.101426>.
10. Sudan T., Taggar R., Jena P. K., Sharma D. Supply Chain Disruption Mitigation Strategies to Advance Future Research Agenda: A Systematic Literature Review // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 425. pp. 138643. <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138643>.

11. United Nations. Division for Sustainable Development Goals [Электронный ресурс]. URL: <https://sdgs.un.org/> (дата обращения: 25.05.2022).
12. Tavara M. Reinventing the Future Supply Chains with Disruptive Technologies // Supply Chain Analytics. 2023. Vol. 4. pp. 100047. <https://www.doi.org/10.1016/j.sca.2023.100047>.
13. Дыбская В., Сергеев В., Лычкина Н. Цифровые технологии в логистике и управлении цепями поставок: аналитический обзор. Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. 190 с. ISBN 978-57598-2348-3.
14. Щербаков В., Силкина Г. Цепи поставок 4.0: переход от цифровизации к интеллектуальному управлению. / Под ред. А.У. Альбеков. Ростовский государственный экономический университет “РИНХ”. С. 76-83.
15. Gajdzik B., Grabowska S., Saniuk S., Wieczorek T. Sustainable Development and Industry 4.0: A Bibliometric Analysis Identifying key Scientific Problems of the Sustainable Industry 4.0 // Energies. 2020. Vol. 13. No. 16. pp. 4254. <https://www.doi.org/10.3390/en13164254>.
16. Kamble S. S., Gunasekaran A., Gawankar S. A. Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying the Current Trends and Future Perspectives // Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 117. pp. 408-425. <https://www.doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>.
17. Hofmann E., Rüsç M. Industry 4.0 and the Current Status as well as Future Prospects on Logistics // Computers in Industry. 2017. Vol. 89. pp. 23-34. <https://www.doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>.
18. Cañas H., Mula J., Campuzano-Bolarín F. A General Outline of a Sustainable Supply Chain 4.0 // Sustainability. 2020. Vol. 12. No. 19. pp. 7978. <https://www.doi.org/10.3390/su12197978>.
19. Giovanni P. de, Cariola A. Process Innovation through Industry 4.0 Technologies, Lean Practices and Green Supply Chains // Research in Transportation Economics. 2020. pp. 100869. <https://www.doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100869>.
20. Srhir S., Jaegler A., Montoya-Torres J. R. Introducing a Framework Toward Sustainability Goals in a Supply Chain 4.0 Ecosystem // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 418. pp. 138111. <https://www.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138111>.
21. Machado E., Scavarda L. F., Caiado R. G. G., Thomé A. M. T. Barriers and Enablers for the Integration of Industry 4.0 and Sustainability in Supply Chains of MSMEs // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 21. pp. 11664. <https://www.doi.org/10.3390/su132111664>.
22. The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics / Ed. C.J. Bartodziej. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. 150 P. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4>.
23. Janik A., Ryszko A. Mapping the Field of Industry 4.0 Based on Bibliometric Analysis // 32nd International Business Information Management Association Conference (IBIMA). / Ed. Khalid S. Soliman. Seville, Spain, 15-16.11.2018. pp. 6316-6330.
24. Trotta D., Garengo P. Industry 4.0 Key Research Topics: A bibliometric Review. // 7th International Conference on Industrial Technology and Management. United Kingdom: IEEE, 2018. pp. 113-117. <https://www.doi.org/10.1109/ICITM.2018.8333930>.
25. Kumar S., Suhaib M., Asjad M. Industry 4.0: Complex, Disruptive, but Inevitable // Management and Production Engineering Review. 2020. Vol. 11. No. 1. pp. 43-51. <https://www.doi.org/10.24425/mper.2020.132942>.
26. Paksoy T., Koçhan Ç., Ali S. S. Logistics 4.0: Digital Transformation of Supply Chain Management. CRC Press, 2020. ISBN 9780429327636.
27. Szymańska O., Adamczak M., Cyplik P. Logistics 4.0 – a New Paradigm or Set of Known Solutions? // Research in Logistics and Production. 2017. Vol. 7. No. 4. pp. 299-310. <https://www.doi.org/10.21008/j.2083-4950.2017.7.4.2>.
28. Timm I. J., Lorig F. Logistics 4.0 – A Challenge for Simulation // 2015 Winter Simulation Conference (WSC). Huntington Beach, CA, USA: IEEE, 06-09.12.2015. pp. 3118-3119. <https://www.doi.org/10.1109/WSC.2015.7408428>.
29. Khan S., Singh R., Haleem A., Dsilva J., Ali S. S. Exploration of Critical Success Factors of Logistics 4.0: A DEMATEL Approach // Logistics. 2022. Vol. 6. No. 1. pp. 13. <https://www.doi.org/10.3390/logistics6010013>.
30. Wang K. Logistics 4.0 Solution – New Challenges and Opportunities // 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation. Manchester, UK: Atlantis Press, 10-11.11.2016. <https://www.doi.org/10.2991/iwama-16.2016.13>.
31. Lee C. K. M., Chung S. Y. From Industry 4.0 to Supply Chain 4.0: A Systematic Review // Smart Manufacturing. 2022. Vol. 1. No. 1. <https://www.doi.org/10.1142/S2737549822300024>.
32. Bakhshi Movahed A., Aliahmadi A., Parsanejad M., Nozari H. A Systematic Review of Collaboration in Supply Chain 4.0 with Meta-Synthesis Method // Supply Chain Analytics. 2023. Vol. 4. pp. 100052. <https://www.doi.org/10.1016/j.sca.2023.100052>.
33. Oztemel E., Gursev S. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. No. 1. pp. 127-182. <https://www.doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.

34. Bai C., Dallasega P., Orzes G., Sarkis J. Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective // International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 229. pp. 107776. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.
35. Koh L., Orzes G., Jia F. The Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0): Technologies Disruption on Operations and Supply Chain Management // International Journal of Operations & Production Management. 2019. Vol. 39. pp. 817-828. <https://www.doi.org/10.1108/IJOPM-08-2019-788>.
36. Saucedo-Martínez J. A., Pérez-Lara M., Marmolejo-Saucedo J. A., Salais-Fierro T. E., Vasant P. Industry 4.0 Framework for Management and Operations: A Review // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2018. Vol. 9. No. 3. pp. 789-801. <https://www.doi.org/10.1007/s12652-017-0533-1>.
37. Alcácer V., Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. Vol. 22. No. 3. pp. 899-919. <https://www.doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>.
38. El Jaouhari A., Arif J., Samadhiya A., Kumar A. Net Zero Supply Chain Performance and Industry 4.0 Technologies: Past Review and Present Introspective Analysis for Future Research Directions // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 11. pp. e21525. <https://www.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21525>.
39. Rad F. F., Oghazi P., Palmié M., Chirumalla K., Pashkevich N., Patel P. C., Sattari S. Industry 4.0 and Supply Chain Performance: A Systematic Literature Review of the Benefits, Challenges, and Critical Success Factors of 11 Core Technologies // Industrial Marketing Management. 2022. Vol. 105. pp. 268-293. <https://www.doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.06.009>.
40. Осинцев Н. А. Методологические основы устойчивого развития логистических цепей грузопотоков: дис. ... докт. техн. наук 2.9.9, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2023. 360 с.
41. Barreto L., Amaral A., Pereira T. Industry 4.0 Implications in Logistics: An Overview // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 13. pp. 1245-1252. <https://www.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>.
42. Mihelj M., Bajd T., Ude A., Lenarčič J., Stanovnik A., Munih M., Rejc J., Šlajpah S. Collaborative Robots. // Robotics / M. Mihelj et al. Cham: Springer International Publishing, 2019. pp. 173-187. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4\\_12](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4_12).
43. Phillips-Wren G. Intelligent Systems to Support Human Decision Making. // Management Association, Information Resources: Artificial Intelligence. IGI Global, 2017. pp. 3023-3036. <https://www.doi.org/10.4018/978-1-5225-1759-7.ch125>.
44. Abosuliman S. S., Almagrabi A. O. Routing and Scheduling of Intelligent Autonomous Vehicles in Industrial Logistics Systems // Soft Computing. 2021. Vol. 25. No. 18. pp. 11975-11988. <https://www.doi.org/10.1007/s00500-021-05633-4>.
45. Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Aleksandrin D. V., Shevkunov N. O. Multi-criteria Model for the Development of Industrial Logistics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. pp. 12103. <https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012103>.
46. Big Data: A Primer / Ed. P. Bhuyan et al. New Delhi: Springer India, 2015. МПКТ.11. 184 p.
47. Gilchrist A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Berkeley, CA: Apress, 2016. 250 p. <https://www.doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>. ISBN 978-1-4842-2046-7.
48. Esengün M., İnce G. The Role of Augmented Reality in the Age of Industry 4.0. // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. C. 201-215. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_12](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_12).
49. Al-Ani A. CPS and the worker: Reorientation and Requalification? // Industrial Internet of Things / S. Jeschke et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 563-574. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7\\_23](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_23).
50. Palviainen M., Mäntyjärvi J., Ronkainen J., Tuomikoski M. Towards User-driven Cyber-physical Systems – Strategies to Support User Intervention in Provisioning of Information and Capabilities of Cyber-Physical Systems. // Industrial Internet of Things / S. Jeschke et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 575-593. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7\\_24](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_24).
51. Dustdar S., Nastić S., Ščekić O. Smart Cities: The Internet of Things, People and Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017. 268p. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-60030-7>. ISBN 978-3-319-60029-1.
52. Satoglu S., Ustundag A., Cevikcan E., Durmusoglu M. B. Lean Transformation Integrated with Industry 4.0 Implementation Methodology. // Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era / F. Calisir et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 97-107. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-71225-3\\_9](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-71225-3_9).
53. Thames L., Schaefer D. Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges. // Cybersecurity for Industry 4.0 / L. Thames et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 1-33. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9\\_1](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9_1).

54. Serpanos D., Wolf M. Internet-of-Things (IoT) Systems: Architectures, Algorithms, Methodologies. Cham: Springer International Publishing, 2018. 95 p. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-69715-4>. ISBN 978-3-319-69714-7.
55. Beyca O. F., Hancerliogullari G., Yazici I. Additive Manufacturing Technologies and Applications. // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 217-234. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_13](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_13).
56. Karacay G., Aydın B. Internet of Things and New Value Proposition. // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 173-185. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_10](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_10).
57. Sendler U. The Internet of Things: Industrie 4.0 Unleashed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. 270 p. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-662-54904-9>. ISBN 978-3-662-54903-2.
58. Jeschke S., Brecher C., Meisen T., Özdemir D., Eschert T. Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. // Industrial Internet of Things / S. Jeschke et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 3-19. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7\\_1](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_1).
59. I. Meneguette R., E. De Grande R., A. F. Loureiro A. Intelligent Transport System in Smart Cities. Cham: Springer International Publishing, 2018. <https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-93332-0>. ISBN 978-3-319-93331-3.
60. Sami Sivri M., Oztaysi B. Data analytics in manufacturing. // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 155-172. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_9](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_9).
61. Maier A., Schriegel S., Niggemann O. Big Data and Machine Learning for the Smart Factory – Solutions for Condition Monitoring, Diagnosis and Optimization. // Industrial Internet of Things / S. Jeschke et al. Cham: Springer International Publishing, 2017. pp. 473-485. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7\\_18](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-42559-7_18).
62. Tripathy B. K., Anuradha J. Internet of Things (IoT). Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2018.: CRC Press, 2017. <https://www.doi.org/10.1201/9781315269849>. ISBN 9781315269849.
63. Budak A., Ustundag A., Kilinc M. S., Cevikcan E. Digital Traceability Through Production Value Chain // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 251-265. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_15](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_15).
64. Ervural B. C., Ervural B. Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era. // Industry 4.0: Managing the Digital Transformation / A. Ustundag et al. Cham: Springer International Publishing, 2018. pp. 267-284. [https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5\\_16](https://www.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_16).
65. Velikanov V. S., Dyorina N. V., Korotkova A. N., Dyorina K. S. The Challenges of Industry 4.0 and the Need for New Answers in the Mining Industry // News of the Ural State Mining University. 2021. No. 2. pp. 154-166. <https://www.doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-154-166>.
66. Осинцев Н., Семчук Д. Реализация принципов и технологий концепции Индустрия 4.0 в логистике. Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. С. 27.
67. Семчук Д., Осинцев Н. Реализация принципов устойчивого развития на основе интеграции технологий Индустрии 4.0. Экономический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. С. 406-407.
68. Семчук Д., Осинцев Н. Оптимизация логистических потоков путём реализации технологий Индустрии 4.0. Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. С. 22.

#### References

1. Rasi, R. Z., Ismail, H., Shahbaz, M. S. and Kaliani Sundram, V. P. 2023. Interdisciplinary Challenges in the Circular Supply Chains: A Systematic Literature Review. *Heliyon*, Vol. 9, No. 4, e15225.
2. Malacina, I. and Teplov, R. 2022. Supply Chain Innovation Research: A Bibliometric Network Analysis and Literature Review. *International Journal of Production Economics*, Vol. 251, p. 108540.
3. Osintsev, N. A. and Rakhmangulov, A. N. 2023. Supply Chain Sustainability Assessment Based on Gray Relational Analysis. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, Vol. 21, No. 3, pp. 180–96. (In Russ.).
4. Emrouznejad, A., Abbasi, S. and Sıcakyüz, Ç. 2023. Supply Chain Risk Management: A Content Analysis-based Review of Existing and Emerging Topics. *Supply Chain Analytics*, Vol. 3, p. 100031.
5. Srai, J. S., Graham, G., van Hoek, R., Joglekar, N. and Lorentz, H. 2023. Impact Pathways: Unhooking Supply Chains from Conflict Zones – Reconfiguration and Fragmentation Lessons from the Ukraine-Russia War. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 43, No. 13, pp. 289–301.
6. Liso, N. de and Zamparini, L. 2022. Innovation, Transport Security and Supply Chains: A Review. *Transport Reviews*, Vol. 42, No. 6, pp. 725–38.
7. Farooq, M. U., Hussain, A., Masood, T. and Habib, M. S. 2021. Supply Chain Operations Management in Pandemics: A State-of-the-Art Review Inspired by COVID-19. *Sustainability*, Vol. 13, No. 5, p. 2504.
8. Siagian, H., Tarigan, Z. J. H. and Jie, F. 2021. Supply Chain Integration Enables Resilience, Flexibility, and Innovation to Improve Business Performance in COVID-19 Era. *Sustainability*, Vol. 13, No. 9, p. 4669.



9. Meyer, K. E., Fang, T., Panibratov, A. Y., Peng, M. W. and Gaur, A. 2023. International Business Under Sanctions. *Journal of World Business*, Vol. 58, No. 2, p. 101426.
10. Sudan, T., Taggar, R., Jena, P. K. and Sharma, D. 2023. Supply Chain Disruption Mitigation Strategies to Advance Future Research Agenda: A Systematic Literature Review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 425, p. 138643.
11. United Nations. Division for Sustainable Development Goals. <https://sdgs.un.org/> (Accessed 25 May 2022).
12. Tavana, M. 2023. Reinventing the Future Supply Chains with Disruptive Technologies. *Supply Chain Analytics*, Vol. 4, p. 100047.
13. Dybskaya, V. V., Sergeev, V. I. and Lychkina, N. N. 2020. *Digital Technologies in Logistics and Supply Chain Management: Analytical Review*. Moscow, Publishing House of the Higher School of Economics. (In Russ.).
14. Shcherbakov, V. V. and Silkina, G. 2021. Supply chains 4.0: Moving from Digitalization to Intelligent Management. A. U. Albekov (ed.), *Ecosystem approach in logistics: retrospective, status, expectations. Materials of the International Scientific and Practical Conference. XVII South-Russian Logistics Forum*. Rostov-on-Don, Rostov State University of Economics "RINH", pp. 76–83. (In Russ.).
15. Gajdzik, B., Grabowska, S., Saniuk, S. and Wieczorek, T. 2020. Sustainable Development and Industry 4.0: A Bibliometric Analysis Identifying Key Scientific Problems of the Sustainable Industry 4.0. *Energies*, Vol. 13, No. 16, p. 4254.
16. Kamble, S. S., Gunasekaran, A. and Gawankar, S. A. 2018. Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying the Current Trends and Future Perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 117, pp. 408–25.
17. Hofmann, E. and Rüsçh, M. 2017. Industry 4.0 and the Current Status as well as Future Prospects on Logistics. *Computers in Industry*, Vol. 89, pp. 23–34.
18. Cañas, H., Mula, J. and Campuzano-Bolarín, F. 2020. A General Outline of a Sustainable Supply Chain 4.0. *Sustainability*, Vol. 12, No. 19, p. 7978.
19. Giovanni, P. de and Cariola, A. 2020. Process Innovation Through Industry 4.0 Technologies, Lean Practices and Green Supply Chains. *Research in Transportation Economics*, p. 100869.
20. Srhir, S., Jaegler, A. and Montoya-Torres, J. R. 2023. Introducing a Framework Toward Sustainability Goals in a Supply Chain 4.0 Ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 418, p. 138111.
21. Machado, E., Scavarda, L. F., Caiado, R. G. G. and Thomé, A. M. T. 2021. Barriers and Enablers for the Integration of Industry 4.0 and Sustainability in Supply Chains of MSMEs. *Sustainability*, Vol. 13, No. 21, p. 11664.
22. Bartodziej, C. J. (ed.). 2017. *The Concept Industry 4.0. An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics*. Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden.
23. Janik, A. and Ryszko, A. 2018. Mapping the Field of Industry 4.0 Based on Bibliometric Analysis. Khalid S. Soliman (ed.), *32nd International Business Information Management Association Conference (IBIMA)*, pp. 6316–6330.
24. Trotta, D. and Garengo, P. 2018. Industry 4.0 Key Research Topics: A Bibliometric Review, *7th International Conference on Industrial Technology and Management*. United Kingdom, IEEE, pp. 113–117.
25. Kumar, S., Suhaib, M. and Asjad, M. 2020. Industry 4.0: Complex, Disruptive, but Inevitable. *Management and Production Engineering Review*, Vol. 11, No. 1, pp. 43–51.
26. Paksoy, T., Koçhan, Ç. and Ali, S. S. 2020. *Logistics 4.0. Digital Transformation of Supply Chain Management*, CRC Press.
27. Szymańska, O., Adamczak, M. and Cyplik, P. 2017. Logistics 4.0 – a New Paradigm or Set of Known Solutions? *Research in Logistics and Production*, Vol. 7, No. 4, pp. 299–310.
28. Timm, I. J. and Lorig, F. 2015. Logistics 4.0 – A Challenge for Simulation, *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, IEEE, pp. 3118–3119.
29. Khan, S., Singh, R., Haleem, A., Dsilva, J. and Ali, S. S. 2022. Exploration of Critical Success Factors of Logistics 4.0: A DEMATEL Approach. *Logistics*, Vol. 6, No. 1, p. 13.
30. Wang, K. 2016. Logistics 4.0 Solution – New Challenges and Opportunities, *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. Paris, France, Atlantis Press.
31. Lee, C. K. M. and Chung, S. Y. 2022. From Industry 4.0 to Supply Chain 4.0: A Systematic Review. *Smart Manufacturing*, Vol. 01, No. 01.
32. Bakhshi Movahed, A., Aliahmadi, A., Parsanejad, M. and Nozari, H. 2023. A Systematic Review of Collaboration in Supply Chain 4.0 With Meta-synthesis Method. *Supply Chain Analytics*, Vol. 4, p. 100052.
33. Oztemel, E. and Gursev, S. 2020. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 31, No. 1, pp. 127–82.
34. Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. and Sarkis, J. 2020. Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective. *International Journal of Production Economics*, Vol. 229, p. 107776.

35. Koh, L., Orzes, G. and Jia, F. 2019. The fourth industrial revolution (Industry 4.0): Technologies Disruption on Operations and Supply Chain Management. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 39, 6/7/8, pp. 817–28.
36. Saucedo-Martínez, J. A., Pérez-Lara, M., Marmolejo-Saucedo, J. A., Salais-Fierro, T. E. and Vasant, P. 2018. Industry 4.0 Framework for Management and Operations: A Review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 9, No. 3, pp. 789–801.
37. Alcácer, V. and Cruz-Machado, V. 2019. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 22, No. 3, pp. 899–919.
38. El Jaouhari, A., Arif, J., Samadhiya, A. and Kumar, A. 2023. Net Zero Supply Chain Performance and Industry 4.0 Technologies: Past Review and Present Introspective Analysis for Future Research Directions. *Heliyon*, Vol. 9, No. 11, e21525.
39. Rad, F. F., Oghazi, P., Palmié, M., Chirumalla, K., Pashkevich, N., Patel, P. C. and Sattari, S. 2022. Industry 4.0 and Supply Chain Performance: A Systematic Literature Review of the Benefits, Challenges, and Critical Success Factors of 11 Core Technologies. *Industrial Marketing Management*, Vol. 105, pp. 268–93.
40. Osintsev, N. A. 2023. Methodological Basis for Sustainable Development of Cargo Flows Logistics Chains. D. thesis 2.9.9, Nosov Magnitogorsk State Technical University. (In Russ.).
41. Barreto, L., Amaral, A. and Pereira, T. 2017. Industry 4.0 Implications in Logistics: An Overview. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 1245–52.
42. Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., Rejc, J. and Šlajpah, S. 2019. Collaborative Robots. M. Mihelj, T. Bajd, A. Ude, J. Lenarčič, A. Stanovnik, M. Munih, J. Rejc and S. Šlajpah (eds), *Robotics*. Cham, Springer International Publishing, pp. 173–187.
43. Phillips-Wren, G. 2017. Intelligent Systems to Support Human Decision Making, *Management Association, Information Resources: Artificial Intelligence*, IGI Global, pp. 3023–3036.
44. Abosuliman, S. S. and Almagrabi, A. O. 2021. Routing and Scheduling of Intelligent Autonomous Vehicles in Industrial Logistics Systems. *Soft Computing*, Vol. 25, No. 18, pp. 11975–88.
45. Rakhmangulov, A. N., Kornilov, S. N., Aleksandrin, D. V. and Shevkunov, N. O. 2020. Multi-criteria Model for the Development of Industrial Logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 966, p. 12103.
46. Bhuyan, P., Chenthati, D. and Mohanty, H. (eds). 2015. *Big Data. A Primer*. New Delhi, Springer India. (Studies in Big Data, 11).
47. Gilchrist, A. 2016. *Industry 4.0. The Industrial Internet of Things*. Berkeley, CA, Apress.
48. Esengün, M. and İnce, G. 2018. The Role of Augmented Reality in the Age of Industry 4.0. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 201–215.
49. Al-Ani, A. 2017. CPS and the worker: Reorientation and Requalification? S. Jeschke, C. Brecher, H. Song and D. B. Rawat (eds), *Industrial Internet of Things*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), pp. 563–574.
50. Palviainen, M., Mäntyjärvi, J., Ronkainen, J. and Tuomikoski, M. 2017. Towards User-driven Cyber-physical Systems – Strategies to Support user Intervention in Provisioning of Information and Capabilities of Cyber-physical Systems. S. Jeschke, C. Brecher, H. Song and D. B. Rawat (eds), *Industrial Internet of Things*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), pp. 575–593.
51. Dustdar, S., Nastić, S. and Šćekić, O. 2017. *Smart Cities. The Internet of Things, People and Systems*. Cham, Springer International Publishing.
52. Satoglu, S., Ustundag, A., Cevikcan, E. and Durmusoglu, M. B. 2018. Lean Transformation Integrated with Industry 4.0 Implementation Methodology. F. Calisir and H. Camgoz Akdag (eds), *Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era*. Cham, Springer International Publishing (Lecture Notes in Management and Industrial Engineering), pp. 97–107.
53. Thames, L. and Schaefer, D. 2017. Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges. L. Thames and D. Schaefer (eds), *Cybersecurity for Industry 4.0*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 1–33.
54. Serpanos, D. and Wolf, M. 2018. *Internet-of-Things (IoT) Systems. Architectures, Algorithms, Methodologies*. Cham, Springer International Publishing.
55. Beyca, O. F., Hancerliogullari, G. and Yazici, I. 2018. Additive Manufacturing Technologies and Applications. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 217–234.

56. Karacay, G. and Aydın, B. 2018. Internet of Things and New Value Proposition. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 173–185.
57. Sendler, U. 2018. *The Internet of Things. Industrie 4.0 Unleashed*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
58. Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D. and Eschert, T. 2017. Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. S. Jeschke, C. Brecher, H. Song and D. B. Rawat (eds), *Industrial Internet of Things*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), pp. 3–19.
59. I. Meneguette, R., E. De Grande, R. and A. F. Loureiro, A. 2018. *Intelligent Transport System in Smart Cities*. Cham, Springer International Publishing.
60. Sami Sivri, M. and Oztaysi, B. 2018. Data Analytics in Manufacturing. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 155–172.
61. Maier, A., Schriegel, S. and Niggemann, O. 2017. Big Data and Machine Learning for the Smart Factory – Solutions for Condition Monitoring, Diagnosis and Optimization. S. Jeschke, C. Brecher, H. Song and D. B. Rawat (eds), *Industrial Internet of Things*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Wireless Technology), pp. 473–485.
62. Tripathy, B. K. and Anuradha, J. 2017. *Internet of Things (IoT)*. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2018., CRC Press.
63. Budak, A., Ustundag, A., Kilinc, M. S. and Cevikcan, E. 2018. Digital Traceability Through Production Value Chain. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 251–265.
64. Ervural, B. C. and Ervural, B. 2018. Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era. A. Ustundag and E. Cevikcan (eds), *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*. Cham, Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), pp. 267–284.
65. Velikanov, V. S., Dyorina, N. V., Korotkova, A. N. and Dyorina, K. S. 2021. The Challenges of Industry 4.0 and the Need for New Answers in the Mining Industry. *News of the Ural State Mining University*, No. 2, pp. 154–66.
66. Osintsev, N. A. and Semchuk, D. 2019. Implementation of the Principles and Technologies of the Industry 4.0 Concept in Logistics, *Actual problems of modern science, technology and education: 77 international scientific conference Magnitogorsk, April 22-26, 2019*. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University , p. 27. (In Russ.).
67. Semchuk, D. B. and Osintsev, N. A. 2019. Realization of Sustainable Development Principles Based on the Integration of Industry 4.0 Technologies, *Sustainable development and new economic models. International scientific conference dedicated to the 40th anniversary of the Department of Economics of Nature Management, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University*. Moscow, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University , pp. 406–407. (In Russ.).
68. Semchuk, D. B. and Osintsev, N. A. Optimization of Logistics Flows by Implementing Industry 4.0 Technologies, *Actual Problems of Modern Science* , p. 22. (In Russ.).