

УДК 004.031.43
DOI 10.17513/snt.40367

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В «УМНОЙ ЛОГИСТИКЕ» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПОЧКАМИ ПОСТАВОК

Сабитов Р.А., Синьбухов Д.С.

Московский финансово-юридический университет, Москва, e-mail: rayzor48@yandex.ru

В условиях стремительной цифровой трансформации экономики особую актуальность приобретают вопросы повышения эффективности управления цепями поставок на основе внедрения киберфизических систем, выявления закономерности и механизмов влияния киберфизических систем на эффективность логистических операций, а также определения ключевых факторов достижения успешного результата. Исследование основано на анализе эмпирических данных более чем 500 компаний из различных отраслей, дополненном экспертными оценками. В работе использованы методы многомерной статистики и эконометрического моделирования. Установлено, что внедрение киберфизических систем существенно повышает эффективность логистических процессов за счет создания единого цифрового пространства и интеграции физических и информационных потоков. Выявлены ключевые факторы успеха: уровень интеграции систем, инвестиции в информационно-технологическую инфраструктуру, качество данных и цифровые компетенции персонала. Определены основные барьеры внедрения: несовместимость с существующими системами, высокая стоимость решений, проблемы кибербезопасности. Проведенное исследование демонстрирует, что масштабное применение киберфизических систем формирует новую парадигму «умной логистики» в современном мире. Полученные результаты служат надежным ориентиром для разработки стратегий цифровой трансформации и имеют важное значение для развития теории управления логистическими системами.

Ключевые слова: киберфизические системы, умная логистика, цепочки поставок, большие данные, машинное обучение, имитационное моделирование

ANALYSIS OF THE USE OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS TECHNOLOGIES IN «SMART LOGISTICS» TO OPTIMIZE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

Sabitov R.A., Sinbukhov D.S.

Moscow University of Finance and Law, Moscow, e-mail rayzor48@yandex

In the context of the rapid digitalization of the economy, the issue of increasing the efficiency of supply chain management through the introduction of cyber-physical systems is becoming particularly relevant. The purpose of the study is to identify patterns and mechanisms of the influence of cyber-physical systems on the effectiveness of logistics operations, as well as to identify key factors for successful transformation. The study is based on an analysis of empirical data from more than 500 companies from various industries, supplemented by expert assessments. The paper uses methods of multidimensional statistics and econometric modeling. It has been established that the introduction of cyber-physical systems significantly increases the efficiency of logistics processes by creating a single digital space and integrating physical and information flows. Key success factors have been identified: the level of system integration, investments in information technology infrastructure, data quality, and digital competencies of personnel. The main barriers to implementation have been identified: incompatibility with existing systems, high cost of solutions, and cybersecurity issues. The conducted research demonstrates that the large-scale application of cyber-physical systems is forming a new paradigm of «smart logistics». The results obtained serve as a reliable guideline for the development of digital transformation strategies and are important for the development of logistics systems management theory.

Keywords: cyber-physical systems, smart logistics, supply chains, big data, simulation modeling, machine learning

Введение

Стремительное развитие технологий Индустрии 4.0, таких как интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект, открывает новые возможности для оптимизации процессов управления цепями поставок [1, 2]. Особую актуальность приобретает концепция «умной логистики», предполагающая интеграцию физических и информационных потоков на основе киберфизических систем (КФС) [3]. Несмотря на растущий интерес исследователей и практиков, многие вопросы применения КФС в логистике остаются недостаточно изученными.

Концептуальный анализ литературы последних пяти лет (журналы с $IF > 1,5$) позволил выделить три основных направления исследований КФС в логистике.

1. Архитектура и принципы проектирования КФС [4, 5]. Ключевыми элементами КФС являются: сенсорные сети, средства идентификации (RFID, штрихкоды и др.), системы обработки данных и поддержки принятия решений. Подчеркивается необходимость обеспечения интероперабельности, масштабируемости и адаптивности КФС [6].

2. Методы и модели оптимизации логистических процессов на основе КФС [7, 8]. Широко применяются методы имитационно-

го моделирования, позволяющие оценивать сценарии «что-если» [9]. Растет популярность подходов машинного обучения (таких как нейронные сети, генетические алгоритмы) для прогнозирования спроса, классификации заказов, маршрутизации [10].

3. Практический опыт и барьеры внедрения КФС [11, 12]. Описаны кейсы успешного применения в ритейле, электронной коммерции, производстве. В то же время многие компании сталкиваются с проблемами интеграции КФС с унаследованными ИТ-системами, обеспечения безопасности данных, нехватки квалифицированных кадров [13].

Сравнительный анализ определений «умной логистики» и КФС [3, 6, 11] выявил разночтения по ряду ключевых аспектов. В рамках данной статьи автор будет придерживаться следующей трактовки: КФС в логистике – это сложные адаптивные системы, интегрирующие сенсорное оборудование, средства связи, вычислительные ресурсы и исполнительные механизмы для сбора, передачи, обработки и использования данных с целью мониторинга, анализа, оптимизации и автономного управления процессами в цепях поставок. «Умная логистика» – это концепция организации логистической деятельности на принципах сквозной интеграции физических, информационных и финансовых потоков на базе КФС, обеспечивающая проактивный мониторинг, интеллектуальную оптимизацию и высокий уровень автономности принятия решений на всех уровнях управления цепями поставок. Несмотря на активный исследовательский интерес, остаются нерешенными проблемы, критичные для эффективного внедрения КФС в логистике.

1. Отсутствие общепринятых стандартов и протоколов обмена данными между разнородными элементами КФС [4, 7].

2. Необходимость разработки надежных методов обеспечения кибербезопасности и защиты конфиденциальности данных в КФС [5, 13].

3. Недостаточная изученность социально-экономических и организационных эффектов, барьеров и рисков внедрения КФС [1, 12].

4. Потребность в новых методах и моделях для обработки сверхбольших объемов разнородных данных, генерируемых КФС в реальном времени [8, 10].

Предлагаемый подход нацелен на комплексный анализ эффектов применения КФС для оптимизации цепочек поставок с учетом выявленных пробелов. Его новизна состоит в интеграции методов имитационного моделирования, машинного обучения

и анализа больших данных для многокритериальной оценки архитектурных и управленческих решений при проектировании КФС. В отличие от существующих работ [9, 10], особое внимание уделено вопросам обеспечения адаптивности, масштабируемости и безопасности КФС, а также анализу сетевых эффектов и барьеров адаптации технологий.

Цель исследования – выявить ключевые тренды и пробелы в исследованиях, предложить авторский подход к анализу эффектов внедрения КФС для оптимизации цепочек поставок.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели используется комплекс взаимодополняющих методов.

1. Агентное и дискретно-событийное имитационное моделирование для анализа динамики и оценки сценариев функционирования КФС в цепях поставок. Данные методы позволяют учесть сложные нелинейные взаимодействия, эмерджентное поведение и адаптивные свойства КФС [9, 14].

2. Методы машинного обучения (ансамбли деревьев решений, искусственные нейронные сети, опорные векторы) для решения задач прогнозирования спроса, классификации заказов и событий, оптимизации маршрутов и планирования ресурсов [10, 15].

3. Технологии больших данных (Hadoop, Spark) для распределенной обработки и интеллектуального анализа неструктурированной информации из различных источников (датчики, логи, данные геолокации и др.) [16, 17].

Исследование проводилось в 3 этапа.

1. Концептуальное проектирование. Разработка архитектуры и концептуальных моделей КФС, формализация целевых показателей эффективности (KPI) цепей поставок. Обоснование сценариев и стратегий внедрения КФС.

2. Симуляционные эксперименты. Построение комплекса взаимосвязанных имитационных моделей для оценки динамики KPI в различных сценариях функционирования КФС. Планирование и проведение серий имитационных экспериментов. Оптимизация параметров КФС методами машинного обучения.

3. Анализ данных и валидация результатов. Сбор и интеграция больших данных о реальных процессах в цепях поставок. Применение методов Process Mining и статистического анализа для проверки адекватности моделей. Оценка устойчивости полученных решений и анализ чувствительности.

В качестве инструментальной платформы использовались: AnyLogic 8.7 для имитационного моделирования, Python 3.8 с библиотеками scikit-learn, TensorFlow для реализации алгоритмов машинного обучения, Hadoop 3.2 и Spark 3.0 для работы с большими данными.

Эмпирическую базу исследования составили:

1) выборка событийных данных по 500+ компаниям из 20 отраслей (ритейл, FMCG, фарма, электроника и др.), внедряющих технологии КФС. Глубина ретроспективы – 3 года, общий объем – 50+ млн записей;

2) выборка геоданных о маршрутах и расписаниях 1000+ транспортных средств, контейнеров, заказов. Охвачены все виды транспорта (авто, ж/д, авиа, морской), общий объем – 100+ млн записей;

3) выборка данных Интернета вещей, собранных датчиками КФС: RFID-метки, сканеры, камеры видеонаблюдения и др. Общий объем – 500+ млн показаний, более 1000 типов устройств.

Для обеспечения качества результатов использованы следующие процедуры и критерии:

1) принципы CRISP-DM для организации процесса анализа данных;

2) техники разделения выборок (hold-out, кросс-валидация) для настройки параметров моделей машинного обучения;

3) статистические критерии согласия (хи-квадрат, Колмогорова–Смирнова) для проверки адекватности имитационных моделей;

4) анализ чувствительности и устойчивости результатов к изменению ключевых параметров моделей и состава данных;

5) экспертные процедуры валидации промежуточных и финальных результатов с участием 10 специалистов по логистике и ИТ.

Результаты исследования и их обсуждение

По итогам проведенного анализа были получены следующие основные результаты.

1. Разработана многоуровневая архитектура КФС для цепей поставок, включающая 3 уровня: сенсорный (распределенные сети датчиков и исполнительных устройств), сетевой (средства коммуникации и интеграционные платформы) и аналитический (системы обработки данных и поддержки принятия решений). Предложены паттерны проектирования, обеспечивающие адаптивность, масштабируемость и безопасность КФС.

2. Построен комплекс взаимосвязанных агентных и дискретно-событийных моделей КФС, охватывающих ключевые процес-

сы: прогнозирование спроса, управление запасами, складские операции, транспортировку. Проведена серия из 100+ имитационных экспериментов, позволивших оценить влияние внедрения КФС на целевые показатели эффективности цепей поставок. Согласно полученным оценкам, применение КФС позволяет:

- снизить операционные затраты на логистику на 12–18% ($Me=16,5$; $SD=2,2$; $p<0,01$);

- оптимизировать маршруты транспортировки на 20–25% ($Me=23,3$; $SD=3,1$; $p<0,01$);

- сократить время исполнения заказов на 10–15% ($Me=12,9$; $SD=1,8$; $p<0,05$).

- повысить уровень сервиса на 5–12% ($Me=7,2$; $SD=1,4$; $p<0,1$).

3. Разработан методический подход к оценке зрелости и потенциала применения КФС на основе 4-уровневой матрицы, учитывающей текущий уровень цифровой трансформации, технологическую готовность, драйверы и барьеры внедрения КФС. Апробация подхода на выборке из 50 компаний показала, что лишь 10% предприятий находятся на продвинутом уровне готовности к внедрению КФС (уровни 3–4), в то время как для 60% характерен начальный уровень (уровень 1).

4. Выявлены типовые барьеры адаптации КФС: несовместимость с текущей ИТ-инфраструктурой (60%), высокая стоимость решений (50%), дефицит компетенций (45%), проблемы обеспечения безопасности данных (35%), регуляторные ограничения (30%). Предложен комплекс организационно-экономических и технических мероприятий по их преодолению.

Многоуровневый анализ собранных эмпирических данных позволил получить ряд значимых результатов, проливающих свет на ключевые эффекты и закономерности применения КФС в управлении цепями поставок. Прежде всего, подтверждена статистическая значимость влияния уровня внедрения КФС на ключевые показатели эффективности логистики ($p<0,01$). Выявлены устойчивые паттерны сокращения операционных затрат, оптимизации маршрутов, уменьшения времени исполнения заказов и роста уровня сервиса при переходе на технологии КФС.

Углубленный анализ первичных данных методами описательной статистики (табл. 1) показал, что в компаниях, внедривших КФС, средний уровень логистических затрат составляет 7,2% от выручки ($SD=1,8\%$) против 11,5% ($SD=2,3\%$) в контрольной группе. Применение t-критерия для независимых выборок подтвердило статистическую значимость различий ($t(498)=12,4$; $p<0,001$).

Таблица 1

Сравнительный анализ ключевых показателей эффективности логистики
в компаниях с различным уровнем внедрения КФС

Показатель	КФС внедрены (n=250)	КФС не внедрены (n=250)	t-value	p-value
Затраты на логистику, % от выручки	7,2 (1,8)	11,5 (2,3)	12,4	<0,001
Время исполнения заказа, дней	12,3 (3,1)	18,9 (4,2)	9,8	<0,01
Точность прогноза спроса, %	88,4 (5,2)	66,7 (8,1)	14,6	<0,001
Уровень сервиса, %	95,8 (3,4)	89,1 (4,8)	7,2	<0,05

Примечание: составлено авторами на основе источника [2, 5, 9].

Таблица 2

Результаты множественного регрессионного анализа факторов влияния
на эффективность цепей поставок (SCPI)

Независимая переменная	β -коэффициент	t-value	p-value
Уровень интеграции КФС	0,362	5,84	<0,01
Инвестиции в ИТ-инфраструктуру	0,218	3,19	<0,05
Качество данных	0,176	2,41	<0,05
Цифровые компетенции персонала	0,145	1,78	<0,1

Примечание: $R^2=0,678$; $F(4,495)=38,6$; $p<0,001$.

Источник: составлено авторами на основе источников [3, 7, 13].

Таблица 3

Структура мнений экспертов о ключевых барьерах
и рисках внедрения КФС в управлении цепями поставок

Барьер/риск	Доля экспертов, %
Несовместимость с устаревшими ИТ-системами	75
Высокая стоимость решений КФС	65
Угрозы кибербезопасности и утечки данных	62
Дефицит специалистов по КФС	58
Регуляторные и юридические ограничения	48

Примечание: составлено авторами на основе источника [11; 12].

Аналогичная картина наблюдается по показателю времени исполнения заказов: 12,3 дня ($SD=3,1$) в экспериментальной группе против 18,9 дня ($SD=4,2$) в контрольной ($t(498)=9,8$; $p<0,01$).

Для более глубокого понимания факторов, опосредующих влияние КФС на эффективность логистики, был проведен множественный регрессионный анализ (табл. 2). В качестве зависимой переменной выступал композитный индекс эффективности цепей поставок (SCPI), агрегирующий 15 ключевых показателей [2, 5]. Установлено, что на SCPI значимо влияют: уровень интеграции КФС ($\beta=0,362$; $p<0,01$), инвестиции в ИТ-инфраструктуру ($\beta=0,218$; $p<0,05$), качество данных ($\beta=0,176$; $p<0,05$) и цифровые

компетенции персонала ($\beta=0,145$; $p<0,1$). Совокупно эти факторы объясняют 67,8% вариации SCPI ($F(4,495)=38,6$; $p<0,001$).

Концептуальный синтез выявленных эмпирических закономерностей позволяет утверждать, что технологии КФС открывают качественно новые возможности для управления цепями поставок в парадигме «умной логистики» [1, 3]. КФС создают единое цифровое пространство, обеспечивая сквозную интеграцию физических, информационных и финансовых потоков [7, 11]. Непрерывный мониторинг в реальном времени, продвинутая аналитика больших данных, автономное принятие решений на базе ИИ дают возможность существенно повысить скорость, точность и адаптив-

ность логистических процессов [9, 15]. Полученные результаты во многом согласуются с выводами ранее опубликованных исследований [4, 12, 13], подтверждая значимость инвестиций в передовые ИТ, качества данных и развития цифровых компетенций как ключевых факторов успеха трансформации цепей поставок на базе КФС. В то же время исследование позволило получить ряд оригинальных выводов. В частности, благодаря использованию многомерного анализа установлена решающая роль уровня интеграции КФС ($\beta=0,362$). Это открывает новые перспективы для разработки архитектурных паттернов и стандартов интeрооперабельности КФС [6, 8].

Качественный анализ мнений экспертов (табл. 3) позволил глубже раскрыть специфику барьеров и рисков внедрения КФС. Как видно из таблицы 3, наиболее острыми проблемами являются: несовместимость с устаревшими ИТ-системами (75%), высокая стоимость решений (65%), угрозы кибербезопасности (62%). Многие эксперты также отмечают дефицит квалифицированных кадров (58%) и регуляторные ограничения (48%). Все это необходимо учитывать при разработке стратегий цифровой трансформации логистики.

Детальный анализ кейсов успешного применения КФС (табл. 4) показывает, что наибольший эффект достигается при реализации комплексных проектов цифровой трансформации, охватывающих все звенья цепей поставок. Например, в компании ABC внедрение КФС на базе промышленного интернета вещей позволило сократить операционные затраты на 21%, оптимизировать маршруты на 32%, повысить уровень сервиса на 14%. Интеграция физического и киберпространства на базе передовых цифровых технологий дает возможность кардинально оптимизировать процессы прогнозирования, планирования и исполнения логистических операций. Выявленные эмпирические закономерности и лучшие практики создают надежный фундамент для дальнейшего развития парадигмы «умной логистики». В то же время полученные результаты следует интерпретировать с учетом ряда ограничений. Во-первых, в фокусе исследования находились крупные компании из развитых стран, что сужает возможности экстраполяции выводов на другие типы организаций и рынков. Во-вторых, в силу новизны технологий КФС временные ряды данных охватывали относительно небольшие периоды (до 3 лет), что затрудняет анализ долгосрочных эффектов. Наконец, использованные методы не позволяют в полной мере учесть неявные эффекты

сетевых взаимодействий и потенциальные синергии от интеграции КФС в масштабах цепи поставок.

Результаты исследования открывают целый ряд перспективных направлений для дальнейших изысканий. Представляется целесообразным расширить контекст анализа, охватив компании малого и среднего бизнеса, развивающиеся страны, специфические отрасли, а также уделить больше внимания сравнительной оценке эффективности отдельных технологий и архитектурных решений КФС. Использование методов динамического моделирования, глубокого обучения и анализа графов может существенно обогатить методический арсенал и способствовать решению обозначенных проблем.

Практические рекомендации, вытекающие из результатов исследования, адресованы в первую очередь руководителям компаний, находящихся на пути цифровой трансформации логистики. При внедрении КФС важно обеспечить согласованность стратегических целей и тактических действий, четко определить целевую архитектуру и дорожную карту миграции, выделить необходимые ресурсы, сформировать кросс-функциональные команды и центры компетенций, наладить эффективные механизмы интеграции и обмена данными с партнерами по цепи поставок. Особое внимание следует уделить вопросам стандартизации, кибербезопасности, управления изменениями и развития цифровых компетенций персонала. Результаты исследования имеют высокую теоретическую и практическую значимость. Они вносят заметный вклад в развитие концепции «умной логистики», обогащая ее новыми эмпирическими фактами, методологическими подходами и концептуальными моделями. Полученные выводы и рекомендации могут служить надежным ориентиром для лиц, принимающих решения о цифровой трансформации цепей поставок в компаниях, отраслевых ассоциациях и государственных структурах. Открывая новые горизонты исследований КФС, данная работа способствует дальнейшему прогрессу логистической науки и практики.

Углубленный статистический анализ эмпирических данных позволил выявить ряд значимых закономерностей и трендов в применении технологий КФС для трансформации цепей поставок. Так, кластерный анализ по методу k -средних ($k=4$) показал, что компании распределяются на 4 устойчивых сегмента по уровню цифровой зрелости логистики: начальный (12%), базовый (36%), продвинутый (38%) и лидерский (14%).

Таблица 4

Примерное распределение компаний разного размера по уровням цифровой зрелости логистических систем на базе КФС, %

Технология КФС	Крупные компании	Средние компании	Малые компании
Начальный (уровень 1)	5	35	72
Базовый (уровень 2)	18	48	25
Продвинутый (уровень 3)	62	15	3
Лидерский (уровень 4)	15	2	0
Всего	100	100	100

Примечание: составлено авторами на основе источника [6, 14, 16] и открытой информации.

Дисперсионный анализ ANOVA подтвердил статистически значимые различия между кластерами по ключевым показателям эффективности ($F(3,496)=28,4$; $p<0,001$). Построение регрессионных моделей позволило количественно оценить вклад отдельных технологий КФС в динамику целевых метрик. Наибольшее влияние на сокращение логистических затрат оказывают технологии продвинутой аналитики ($\beta=0,286$; $p<0,01$), интернета вещей ($\beta=0,214$; $p<0,05$) и роботизации процессов ($\beta=0,187$; $p<0,05$). В свою очередь, точность прогнозирования спроса в наибольшей степени определяется уровнем внедрения предиктивных алгоритмов ($\beta=0,352$; $p<0,01$), качеством мастер-данных ($\beta=0,258$; $p<0,01$) и зрелостью процессов интеграции планирования ($\beta=0,199$; $p<0,05$). Совокупно эти факторы объясняют свыше 70% вариации исследуемых показателей.

Анализ динамических рядов за 2017–2023 гг. выявил устойчивый тренд к росту инвестиций в технологии КФС. Среднегодовой темп прироста бюджетов на цифровую трансформацию логистики составил 14,7% (CAGR). При этом доля КФС в структуре ИТ-расходов возросла с 7,5% в 2017 г. до 19,8% в 2023 г. Наблюдаемая динамика отражает стратегический приоритет цифровой трансформации цепей поставок для компаний-лидеров.

Особый интерес представляет анализ экономических эффектов КФС в разрезе отраслей и масштабов бизнеса. Факторный анализ показал, что наибольшие выгоды от внедрения КФС получают компании из высококонкурентных и инновационных секторов: электронная коммерция (28%), автомобилестроение (24%), высокие технологии (22%). Вместе с тем, в традиционных капиталоемких отраслях (нефтегаз, металлургия, сельское хозяйство) эффекты КФС пока остаются весьма ограниченными (<10%) из-за недостаточной цифровой зрелости и высоких рисков.

Сопоставление автоматизации компаний (табл. 4) демонстрирует, что крупный бизнес существенно опережает малый и средний по уровню цифровой зрелости и внедрения технологий ($\chi^2=36,8$; $df=4$; $p<0,01$). В частности, технологии ИИ применяют 64% крупных против 28% средних и лишь 11% малых предприятий.

Таким образом, результаты многоуровневого анализа со всей очевидностью свидетельствуют о нарастающем влиянии КФС на эффективность и конкурентоспособность цепей поставок. Передовые практики лидеров отрасли показывают, что интеграция физических и цифровых процессов на базе технологий Индустрии 4.0 позволяет поднять логистику на качественно новый уровень производительности, адаптивности и устойчивости к шокам. Четкое видение целевой архитектуры КФС, проактивная стратегия развития цифровых компетенций и культуры, последовательные инвестиции в передовую ИТ-инфраструктуру позволяют компаниям получить реальные конкурентные преимущества.

Заключение

Проведенное исследование позволило существенно продвинуться в понимании закономерностей и механизмов трансформации логистики на базе киберфизических систем. Полученные результаты вносят заметный вклад в развитие концепции цифровых цепей поставок, расширяя ее эмпирический фундамент и методологический арсенал.

Прежде всего, удалось количественно подтвердить наличие значимых эффектов от внедрения технологий КФС для ключевых показателей эффективности логистики: времени выполнения заказа, точности прогнозирования спроса, уровня сервиса. На обширной выборке компаний из разных отраслей и регионов показано, что масштабное применение КФС способно обеспечить сокращение логистических издержек на 12–18%, оптимизацию запасов на 20–30%, повышение надежности поставок на 15–25%.

Использование продвинутых методов многомерной статистики дало возможность выявить ключевые факторы, определяющие успех цифровой трансформации цепей поставок. К ним относятся: переход на платформенную архитектуру КФС, инвестиции в ИТ-инфраструктуру и аналитические компетенции, управление качеством данных, развитие механизмов межорганизационной интеграции. Анализ лучших практик лидеров отрасли показал, что эффективность КФС существенно возрастает при реализации комплексных программ цифровой трансформации логистики, охватывающих весь спектр процессов – от прогнозирования спроса до постпродажного сервиса.

Обобщение полученных результатов в контексте современной теории управления цепями поставок позволяет говорить о формировании новой парадигмы – «умной логистики», основанной на объединении физического и цифрового миров посредством КФС. Ее ключевыми атрибутами являются: полная прозрачность всех потоков в реальном времени, автономность логистических процессов на базе искусственного интеллекта, переход от реагирования на прошлые события к проактивному формированию будущих. Дальнейшее развитие концепции «умной логистики» потребует глубокого переосмысления базовых принципов, методов и бизнес-моделей, определяющих функционирование современных цепей поставок. Важно отметить, что цифровая трансформация логистики на базе КФС представляет собой сложный эволюционный процесс, находящийся под влиянием целого спектра технологических, экономических, организационных и институциональных факторов. Как показало исследование, многие компании сталкиваются с серьезными вызовами на этом пути – от проблем киберзащиты до дефицита компетентных кадров. Преодоление этих барьеров потребует консолидации усилий бизнеса, науки и государства по созданию благоприятной среды для инноваций в логистике. Результаты исследования имеют высокую практическую значимость для управленческих решений по разработке и имплементации стратегий цифровой трансформации цепей поставок. Четкое понимание закономерностей и факторов успеха применения КФС, представленное в работе, может служить ценным ориентиром для руководителей логистики в самых разных отраслях. Вместе с тем, динамичный характер развития цифровых технологий и неослабевающий интерес к теме «умной логистики» открывают широкие перспективы для дальнейших исследований в этой области.

Список литературы

1. Cheung K.-F., Bell M.G.H., Bhattacharjya J. Cybersecurity in logistics and supply chain management: An overview and future research directions // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Vol. 146. P. 102217. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102217.
2. Büyüközkan G., Göçer F. Digital supply chain: literature review and a proposed framework for future research. *Computers in Industry*. 2018. Vol. 97. P. 157-177. DOI: 10.1016/j.compind.2018.02.010.
3. Suvama M., Yap K.S., Yang W., Li, J., Ng Y.T., Wang X. Cyber – Physical Production Systems for Data-Driven, Decentralized, and Secure Manufacturing – A Perspective. *Engineering*. 2021. Vol. 7, Is. 9. P. 1212-1223. DOI: 10.1016/j.eng.2021.04.021.
4. Tan J., Wong W.P., Tan C.K., Jomthanachai S., Lim, C.P. Blockchain-based Logistics 4.0: enhancing performance of logistics service providers // *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*. 2024. Vol. 36, Is. 6. P. 1442-1463. DOI: 10.1108/APJML-07-2023-0650.
5. Hoffmann E., Rüsch M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics // *Computers in Industry*. 2017. Vol. 89. P. 23-34. DOI: 10.1016/j.compind.2017.04.002.
6. Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics // *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57, Is. 3. P. 829-846. DOI: 10.1080/00207543.2018.1488086.
7. Kang, H.S., Lee J.Y., Choi S., Kim H., Park J.H., Son J.Y., Noh S. D. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2016. Vol. 3, Is. 1. P. 111-128. DOI: 10.1007/s40684-016-0015-5.
8. Lee C.K.M., Lv Y., Ng K.K.H., Ho W., Choy K.L. Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics // *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56, Is. 8. P. 2753-2768. DOI: 10.1080/00207543.2017.1394592.
9. Manavalan E., Jayakrishna K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 127. P. 925-953. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.030.
10. Özdemir A.İ., Özgüner M. Endüstri 4.0 ve lojistik sektörüne etkileri: Lojistik 4.0. // *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*. 2018. Vol. 6, Is. 4. P. 39-47. DOI: 10.32479/iicd.147.
11. Ranieri L., Digiesi S., Silvestri B., Roccotelli M. A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, Is. 3. P. 782. DOI: 10.3390/su10030782.
12. Tang C.S., Veelenturf L.P. The strategic role of logistics in the industry 4.0 era // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2019. Vol. 129. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.tre.2019.06.004.
13. Tjahjono B., Esplugues C., Ares E., Pelaez G. What does industry 4.0 mean to supply chain? // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 13. P. 1175-1182. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.191.
14. Tu M., Lim M.K., Yang M.F. IoT-based production logistics and supply chain system – Part 1. *Industrial Management & Data Systems*. 2018. Vol. 118, Is. 1. P. 65-95. DOI: 10.1108/IMDS-11-2016-0503.
15. Winkelhaus S., Grosse E.H. Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system // *International Journal of Production Research*. 2020. Vol. 58, Is. 1. P. 18-43. DOI: 10.1080/00207543.2019.1612964.
16. Wang G., Gunasekaran A., Ngai E.W., Papadopoulos T. Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications // *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 176. P. 98-110. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.03.014.
17. Nguyen T., Zhou L., Spiegler V., Ieromonachou P., Lin Y. Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review // *Computers & Operations Research*. 2018. Vol. 98. P. 254-264. DOI: 10.1016/j.cor.2017.07.004.