

Научная статья

УДК 004.94, 330.46, 338.2

JEL: O32, O33, C38

<https://doi.org/10.18184/2079-4665.2026.17.1.79-98>

Систематизация научных знаний о цифровых двойниках: оценка потенциала в экономике инноваций

Михненко Павел Александрович¹, Копачевский Максим Михайлович²

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет); Москва, Россия

¹ pmihnenko@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3370-3269>

² kopachevskiyimm@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8888-5751>

Аннотация

Цель. Систематизировать научные представления о цифровых двойниках (ЦД) с учетом их потенциала в качестве инструмента цифровой модернизации социально-экономических систем в условиях экономики инноваций.

Методы. Методологическая основа исследования включает библиометрический, сравнительный и контент-анализ публикаций, индексируемых в международной базе ScienceDirect и российской eLibrary за 2000–2024 гг. Используются методы классификации, систематизации, тематического моделирования и интерпретации данных. Анализ проводился по количественным и качественным признакам: динамика публикаций, терминологическое поле, дисциплинарная направленность и особенности национальных исследовательских традиций.

Результаты работы. Установлен устойчивый рост публикационной активности, особенно в последние 5 лет. Наибольшее число исследований сосредоточено в инженерных, компьютерных и медицинских науках, что отражает технологическую ориентацию дискурса. Выявлены различия между международными и отечественными публикациями, касающиеся терминологии, приоритетов и уровня междисциплинарной интеграции, что указывает на асинхронность развития и ограничивает трансфер инженерных решений в социально-экономическую сферу. Разработаны классификация прикладных областей и таксономия методов реализации цифровых двойников, которые могут использоваться для унификации терминологии и ориентира прикладных исследований. При этом выявлен значительный неосвоенный потенциал применения ЦД в управленческих и организационно-экономических практиках – от логистики и технического обслуживания до стратегического планирования и цифровых отраслевых программ, что делает их важным инструментом цифровой модернизации экономики инноваций.

Выводы. Проведенный анализ подтвердил высокий потенциал цифровых двойников для интеграции в управленческие процессы, стратегическое планирование и развитие отраслевых программ в контексте экономики инноваций. Практическая значимость исследования заключается в создании унифицированной базы знаний, которая может служить основой для стратегического управления и цифровой модернизации экономики инноваций. Перспективы дальнейших исследований связаны с институционализацией терминологии, развитием междисциплинарных моделей и анализом кейсов внедрения технологии.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая трансформация, публикационная активность, таксономия, экономика инноваций, ScienceDirect, eLibrary

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Михненко П. А., Копачевский М. М. Систематизация научных знаний о цифровых двойниках: оценка потенциала в экономике инноваций // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2026. Т. 17. № 1. С. 79–98

EDN: <https://elibrary.ru/mlsxp>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2026.17.1.79-98>

© Михненко П. А., Копачевский М. М., 2026



Original article

Systematization of scientific knowledge on digital twins: Assessing their potential in the innovation economy

Pavel A. Mikhnenko¹, Maxim M. Kopachevsky²^{1,2}Bauman Moscow State Technical University (National Research University); Moscow, Russia¹pmmihnenko@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3370-3269>²kopachevskiyymm@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8888-5751>

Abstract

Purpose: to systematize scientific knowledge about digital twins (DT), considering their potential as a tool for digital modernization of socio-economic systems within the innovation-driven economy, with an emphasis on identifying key trends, terminological discrepancies, and factors of interdisciplinary development.

Methods: the methodological basis includes bibliometric, comparative, and content analysis of publications indexed in ScienceDirect and eLibrary (2000–2024). Classification, systematization, thematic modeling, and interpretation were applied. The analysis considered quantitative and qualitative indicators: publication dynamics, terminology, disciplinary orientation, and national research traditions.

Results: a steady growth of publications was established, especially over the past 5 years. Most studies are concentrated in engineering, computer science, and medicine, reflecting the technological orientation of the discourse. Differences between international and domestic publications were found in terminology, priorities, levels of interdisciplinarity, indicating asynchronous development and limiting transfer of engineering solutions into the socio-economic sphere. A classification of application areas and a taxonomy of implementation methods of digital twins were developed, supporting terminology unification and guiding applied research. At the same time, significant untapped potential was revealed in managerial and organizational-economic practices – from logistics and maintenance to strategic planning and sectoral digital programs – making digital twins an important instrument of modernization in the innovative economy.

Conclusions and Relevance: the analysis confirmed the high potential of digital twins for integration into management processes, strategic planning, and industry programs within the innovation-driven economy. The practical significance of the study lies in creating a unified knowledge base for strategic management and modernization of the innovative economy. The future research should focus on terminology institutionalization, development of interdisciplinary models, and empirical case studies of technology implementation.

Keywords: digital twin, digital transformation, publication activity, taxonomy, innovation economy, ScienceDirect, eLibrary

Conflict of Interest. The authors declare that there is no Conflict of Interest.

For citation: Mikhnenko P. A., Kopachevsky M. M. Systematization of scientific knowledge on digital twins: Assessing their potential in the innovation economy. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2026; 17(1):79–98. (In Russ.)

EDN: <https://elibrary.ru/mlsxp>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2026.17.1.79-98>

© Mikhnenko P. A., Kopachevsky M. M., 2026

Введение

Цифровизация – важнейший фактор устойчивого развития национальной экономики и повышения конкурентоспособности страны [1]. Цифровые технологии оптимизируют бизнес-процессы, снижают затраты [2] и формируют устойчивые бизнес-модели компаний [3]. Цифровые двойники (ЦД), являясь частью технологий цифровизации, представляют собой виртуальные копии объектов или процессов, которые позволяют анализировать работу оборудования, прогнозировать сбои и оптимизировать производственные операции [4, 5]. Их применение снижает издержки на обслуживание и модернизацию, способствует созданию адаптивных и автоматизированных систем [6].

Несмотря на растущий интерес к технологии ЦД, сохраняются существенные проблемы ее науч-

ной систематизации: терминологическая неоднородность, отсутствие общепринятых стандартов, разноплановость подходов к реализации, ограниченность исследований, затрагивающих экономические и организационные аспекты внедрения. Особенно остро данная проблема проявляется при сопоставлении международного и отечественного академического дискурса, где выявляются методологические расхождения и различная степень разработанности темы [7, 8].

Важно выявить траекторию развития концепции ЦД, систематизировать направления их применения и определить возможности трансфера инженерных решений в область экономики. Такой подход позволяет оценить потенциал данной концепции для использования в качестве инструмента цифровой модернизации и инновационного развития отраслей.

Под «экономикой инноваций» в статье понимается модель экономического устройства, в которой инновации становятся ключевым фактором конкурентоспособности и устойчивого развития отраслей.

Цель исследования – систематизация научных знаний о цифровых двойниках в контексте потенциала технологии как инструмента цифровой модернизации социально-экономических систем в условиях экономики инноваций

Объект исследования – цифровые двойники как технология цифровой трансформации экономики. Предмет исследования – структура и динамика научного знания о ЦД в контексте экономики инноваций, включая прикладные области и факторы, влияющие на интеграцию ЦД в социально-экономические и управленческие практики.

Гипотеза исследования: систематизация академических представлений о ЦД на основе библиометрического и содержательного анализа публикаций позволяет выявить ключевые барьеры интеграции технологии в экономику инноваций – фрагментарность научного знания, отсутствие унифицированного понятийного аппарата и слабую междисциплинарную интеграцию. Преодоление этих барьеров формирует предпосылки для обоснованной оценки потенциала ЦД как инструмента цифровой модернизации и стратегического управления.

Исследовательская задача состоит в выявлении и анализе противоречия между стремительным развитием технологии ЦД как инструмента цифровой трансформации экономики и недостаточным уровнем ее научной систематизации, унификации терминологии и методологических подходов к применению, что ограничивает их интеграцию в управленческие и отраслевые практики экономики инноваций.

Задачи исследования:

- 1) провести анализ динамики научных публикаций по теме ЦД;
- 2) выявить доминирующие направления исследований и оценить их развитие;
- 3) сравнить международный и отечественный опыт исследования ЦД;
- 4) разработать классификацию прикладных областей применения ЦД с учетом отраслевой специфики инновационной экономики;
- 5) сформировать таксономию методов реализации ЦД, отражающую потенциал их трансфера в социально-экономические и управленческие практики;
- 6) выявить барьеры и условия интеграции ЦД в экономику инноваций и определить их управленческую значимость.

Обзор литературы и исследований

Цифровые двойники (Digital Twins) – одна из ключевых технологий цифровой трансформации, интегрирующая физические и виртуальные составляющие сложных объектов и систем в единую информационно-аналитическую среду. Развитие ЦД отражает эволюцию инженерных и научных подходов к управлению жизненным циклом продукции, моделированию процессов, прогнозированию поведения объектов и обработки больших данных [9, 4, 7]. В научном дискурсе ЦД детерминируется как многоуровневая, кросс-дисциплинарная и стохастическая симуляционная модель, основанная на интеграции телеметрических показателей, эксплуатационных параметров и ретроспективных данных, воспроизводящая и интерпретирующая состояние и поведение физического аналога [10].

Первоначально ЦД использовался в аэрокосмической отрасли для мониторинга и прогнозирования отказов техники [11]. В 2002 г. М. Гривз предложил концепцию, в рамках которой ЦД описывался как виртуальное представление физической системы с возможностью отслеживания ее состояния на протяжении всего жизненного цикла [9]. Рост вычислительных мощностей и развитие IoT-технологий обеспечили расширение применения ЦД, включая задачи прогнозной аналитики и оптимизации производственно-инфраструктурных систем [7, 12, 13].

ЦД как объект анализа приобретает актуальность в контексте применения в различных отраслях экономики. Современная научная литература указывает на три ключевых направления его применения:

- 1) планирование и управление производством: автоматизация процессов планирования и выполнения операций [13, 14], поддержка принятия решений [15];
- 2) техническое обслуживание и надежность оборудования: мониторинг состояния производственных систем, анализ факторов износа и прогнозирование отказов [13, 16];
- 3) оптимизация производственных процессов: снижение материалоемкости, улучшение логистических связей и контроль параметров производственной среды [14].

ЦД также рассматриваются как элементы киберфизических систем (КФС), объединяющих физическую инфраструктуру и программно-аналитические платформы в реальном времени [4, 10]. Однако, при высокой прикладной востребованности концепции, сохраняются значительные теоретико-методологические разрывы. Отсутствует единый понятийный аппарат, наблюдается терминологическая неоднородность, что подчеркивает

ся в зарубежных [6, 7] и отечественных источниках [8]. Это сдерживает междисциплинарную интеграцию ЦД, прежде всего в области экономики и инновационного развития.

На нормативно-правовом уровне в России понятие ЦД закреплено в ГОСТ Р 57700.37-2021¹, согласно которому ЦД изделия представляет собой систему, включающую цифровую модель и двусторонние информационные связи с самим изделием или его составными частями. Но и здесь технология трактуется преимущественно в рамках инженерного и проектного подходов, без учета ее возможного вклада в развитие механизмов цифровой модернизации экономики.

Разнообразие практик применения ЦД подтверждается множеством кейсов. Siemens использует ЦД для оптимизации логистических цепочек поставок², что позволяет обеспечить почти 100% уровень выполнения заказов³. General Electric применяет ЦД для мониторинга и управления производственными линиями⁴, снижая затраты на обслуживание оборудования на 15–25%⁵. General Electric Aviation с помощью ЦД повысила скорость обнаружения дефектов и сэкономила 125 млн долл. [15]. В Сингапуре ЦД применяются для моделирования энергопотребления и оптимизации городской инфраструктуры⁶. Платформа «Цифровой двойник Москвы» с 2019 г. обеспечивает ре-

шения в сфере территориального планирования, координации и ведения градостроительных проектов⁷. Ожидается, что к 2030 г. ЦД позволят городам сэкономить 280 млрд долл.⁸ РЖД использует ЦД для оптимизации ж/д перевозок⁹, применение технологии сократило простои подвижного состава на 20% и снизило расход топлива на 10%¹⁰.

Однако данные примеры относятся преимущественно к крупным корпорациям и мегаполисам. Для большинства предприятий и регионов характерна крайне ограниченная интеграция ЦД, что обусловлено институциональными, организационными и кадровыми барьерами. Наличие успешных пилотных проектов не свидетельствует о системной интеграции технологии в экономику инноваций в целом.

По экспертным оценкам, в 2025 г. объем мирового рынка ЦД составит порядка 27,5 млрд долл.¹¹ К 2027 г. объем этого сегмента может достигнуть 73,5 млрд долл., а к 2028 г. превысит 110 млрд долл.¹² К 2034 г. рынок может приблизиться к 471 млрд долл. при среднегодовом темпе роста порядка 37%¹³.

Несмотря на растущую популярность ЦД, их научное осмысление сосредоточено в инженерно-технической плоскости. Современные исследования в большинстве своем фокусируются на архитектуре

¹ ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения // Сборник нормативных документов. URL: https://normadocs.ru/gost_r_57700.37-2021?ysclid=m7u4f32xp24091652 (дата обращения: 01.03.2025)

² How Siemens Utilizes AI to Optimize Its Supply Chain Management // Redress Compliance. URL: <https://redresscompliance.com/how-siemens-utilizes-ai-to-optimize-its-supply-chain-management/> (дата обращения: 20.02.2025)

³ Maximum transparency: Siemens shows the holistic digital twin of a logistics center // Siemens. URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/maximum-transparency-siemens-shows-holistic-digital-twin-logistics-center> (дата обращения: 15.08.2025)

⁴ GE aims to replicate Digital Twin success with security-focused Digital Ghost // ZDNet/Business. URL: <https://www.zdnet.com/article/ge-aims-to-replicate-digital-twin-success-with-security-focused-digital-ghost/> (дата обращения: 20.02.2025)

⁵ Introduction to Digital Twin Technology in Manufacturing with Unprecedented Efficiency and Innovation // Hyscaler. URL: <https://hyscaler.com/insights/digital-twin-technology-manufacturing/> (дата обращения: 15.08.2025)

⁶ В Сингапуре разработали цифровую модель города // Евразия сегодня. URL: <https://eurasia.today/actual/v-singapore-razrabotali-tsifrovuyu-model-goroda/> (дата обращения: 21.02.2025)

⁷ «Цифровой двойник Москвы»: как 3D-моделирование и искусственный интеллект изменили управление городом // Mos.ru. URL: <https://www.mos.ru/news/item/126225073/?ysclid=m8fy82v1m322274637> (дата обращения: 07.03.2025)

⁸ Цифровые двойники умных городов: эффекты для городского сообщества XXI века // Всероссийский Фестиваль науки. URL: <https://festivalnauki.ru/program/archive/tsifrovyie-dvoyniki-umnykh-gorodov-effekty-dlya-gorodskogo-soobshchestva-xxi-veka-230731233644/> (дата обращения: 25.08.2025)

⁹ Цифровые двойники // РЖД Цифровой. URL: <https://rzdigital.ru/technology/tsifrovyie-dvoyniki/> (дата обращения: 07.03.2025)

¹⁰ The continual progress of Russian Railways' digital transformation // Global Railway Review. URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/126842/russian-railways-digitalisation/> (дата обращения: 07.08.2025).

¹¹ Идеальная копия: какие задачи решают цифровые двойники в разных отраслях // СБЕР Про. URL: <https://sber.pro/publication/idealnaya-kopiya-kakie-zadachi-reshayut-tsifrovie-dvoyniki-v-raznih-otraslyah/> (дата обращения: 10.03.2025)

¹² Digital Twin Market // MarketsandMarkets. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html?gclid=EAlaIcQobChMI-YWa28DR8QIVwp13Ch1_cACBEAAYASAAAEgKrgfD_BwE?&tactic_type=PRB&tactic_detail=MF_industry-4.0-5.0-are-not-independent_TW_EMEA_GB (дата обращения: 10.03.2025)

¹³ Там же

моделей, обработке данных и сценариях технической оптимизации, тогда как экономические, институциональные и управленческие аспекты остаются недостаточно проработанными. Отсутствие унифицированной терминологии и методологических оснований затрудняет интеграцию ЦД в более широкий междисциплинарный и социально-экономический дискурс.

ЦД становятся не только инженерным инструментом, но и элементом стратегического управления. Их можно использовать при проектировании отраслевых цифровых программ, в разработке инновационной политики государства, в корпоративном стратегическом планировании. Для их эффективного применения в этих сферах требуется преодоление барьеров терминологической и методологической неоднородности, а также институциональных ограничений.

Формирование целостного научного представления о ЦД требует систематизации накопленного теоретического материала, анализа практик применения и выявления барьеров интеграции в социально-экономический и управленческий контекст. Это создает основу для трансформации академического дискурса о ЦД и позволяет рассматривать их как стратегический ресурс цифровой экономики, отраслевой цифровизации и инновационной политики.

Материалы и методы

Для оценки состояния и динамики научного дискурса по теме ЦД был проведен библиометрический и содержательный анализ публикаций по международной базе данных ScienceDirect и российской базе eLibrary за период с 2000 по 2024 гг. Временной диапазон охватывает начальный этап становления концепции ЦД и современную фазу ее широкого распространения [9, 7]. Выбор указанных методов анализа обусловлен задачей исследования: они позволяют описать структуру и динамику научного дискурса о ЦД и выявить факторы, ограничивающие их интеграцию в экономику инноваций и определяющие их управленческую значимость.

Сбор данных был проведен в январе 2025 г. Для обеспечения полноты и корректности выборки были применены разные подходы в зависимости от платформ.

На платформе ScienceDirect поиск проводился по англоязычным терминам, наиболее часто встречающимся в научной литературе по теме: Digital Twin, Digital Model, Digital Shadow, Virtual Models, Digital Replicas, Cyber-Physical Systems, Digital Avatars, Data-Driven Models, Virtual Prototypes, Digital Simulation. Поиск по каждому термину осуществлялся отдельно, без объединения с опера-

тором OR. Фильтрация результатов ограничивалась двумя типами публикаций – Research articles и Review articles.

Выбор терминов для библиометрического поиска был основан на результатах систематических библиографических обзоров, демонстрирующих терминологическую вариативность в трактовке ЦД в разных научных школах и дисциплинарных контекстах [6, 7]. В зависимости от уровня технологической зрелости, предметной области и научной традиции, ЦД обозначается в литературе различными близкими по смыслу выражениями: Digital Model, Digital Shadow, Cyber-Physical System и др. Включение данных формулировок было направлено на обеспечение семантической полноты выборки и выявление широкого спектра публикаций, в которых ЦД рассматривается как инструмент моделирования, мониторинга и управления сложными объектами. Терминологический состав отражает прямые упоминания базовой концепции (Digital Twin), ее прикладные, теоретические и технологические эквиваленты в различных отраслях знания.

На платформе eLibrary проведен поиск по русскоязычным эквивалентам вышеуказанных терминов: цифровые двойники, цифровые модели, цифровые тени, виртуальные модели, цифровые реплики, киберфизические системы, цифровые аватары, модели на основе данных, виртуальные прототипы, цифровая симуляция. Условия поиска: статьи в журналах; поиск по названию, аннотации и ключевым словам с учетом морфологии. Поиск по каждому термину производился отдельно и вручную по каждому году. Проверка репрезентативности данных, проведенная в мае 2025 г., показала стабильность результатов: например, по термину «цифровые модели» за 2020 г. ранее было зафиксировано 3154 публикации, а повторный поиск выявил 3202 публикации, что свидетельствует о высокой воспроизводимости.

Важным методологическим ограничением является то, что анализ предметной направленности исследований и построение классификации областей применения цифровых двойников выполнялись на основе данных ScienceDirect. Это обусловлено отсутствием в eLibrary унифицированной системы дисциплинарной классификации, сопоставимой с предметными областями ScienceDirect.

Результаты поиска: ScienceDirect – 126 529, eLibrary – 105311 статей.

Таким образом, для достижения целей исследования был использован комплекс следующих методов, различающихся по логике и функциям.

1. Библиометрический анализ – количественная характеристика публикационной активности

по теме ЦД: определялись динамика числа публикаций по годам, распределение по ключевым терминам, по предметным областям и по типам публикационных источников.

2. Контент-анализ – как инструмент для выявления ключевых тем, концепций и терминов: позволил реконструировать структуру научного знания о ЦД и оценить степень его междисциплинарной интеграции.
3. Сравнительный анализ – сопоставление международного и отечественного научного дискурса: оценка различия в тематической направленности публикаций, прикладных фокусах, терминологии и уровнях междисциплинарной интеграции.
4. Классификация и систематизация – выполнялись на основе тематических и терминологических признаков. Публикации группировались по отраслям применения технологии: инженерия, медицина, энергетика, урбанистика, экономика, управление.
5. Интерпретация данных – синтез количественных и качественных результатов с целью формулировки выводов о структуре, эволюции академического дискурса, терминологических разрывах и направлениях развития исследований. Особое внимание уделено значимости результатов для экономики инноваций: для стратегического планирования, разработки отраслевых цифровых программ и корпоративного управления.

Результаты исследования

Для визуального представления динамики публикационной активности термины были классифицированы по трем уровням частотности – максимальному, среднему и малому количеству статей. Это позволило определить ключевые тенденции в употреблении понятий, связанных с ЦД, а также их распределение по предметным областям (рис. 1).

Наиболее часто в международных исследованиях встречаются термины Digital Model, Virtual Models и Data-Driven Models. Остальные термины занимают промежуточные позиции по частоте использования.

С 2021 г. Digital Twin (DT) демонстрирует опережающий рост по сравнению с более широким понятием Cyber-Physical Systems, что отражает смещение интереса к прикладным аспектам ЦД и их активному внедрению в промышленность и другие отрасли для моделирования, оптимизации и управления сложными системами.

Концепция ЦД становится более узконаправленной и специализированной в отличие от более об-

щей концепции КФС, которая охватывает более широкий спектр технологий и подходов. Термин Cyber-Physical Systems активно вошел в научный дискурс после 2010 г., что обусловлено развитием IoT, автоматизации производства и внедрением интеллектуальных систем управления в различных отраслях промышленности.

Устойчивый рост частотности термина Digital Simulation, очевидно, связан с тем, что цифровое моделирование рассматривается в качестве фундаментального инструмента в инженерных и научных исследованиях, находя широкое применение в машиностроении, авиакосмической промышленности и медицине [17].

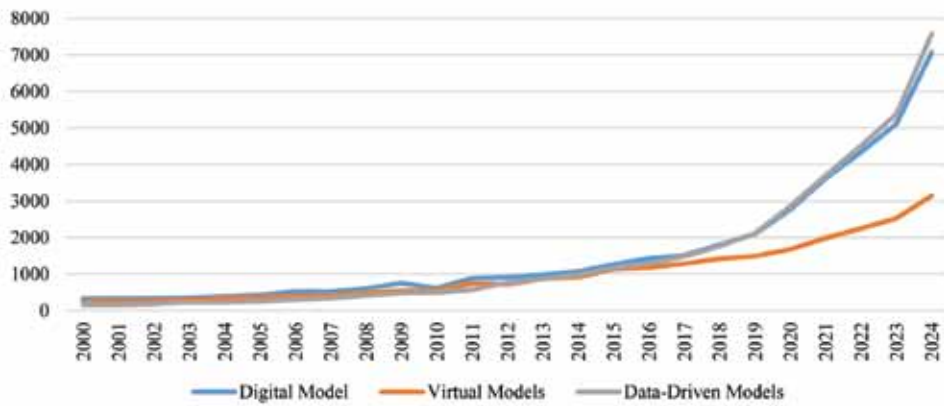
Взрывной рост интереса к ЦД обусловлен следующими факторами:

- 1) расширение применения в промышленности, энергетике, медицине и других сферах [18];
- 2) развитие технологий обработки данных, искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, улучшающих возможности ЦД [19];
- 3) государственные и корпоративные инициативы в рамках концепций «Индустрии 4.0» и «умных городов», стимулирующие исследования [20];
- 4) синергия с другими технологиями (КФС, облачные вычисления, квантовые технологии), расширяющая область применения [21].

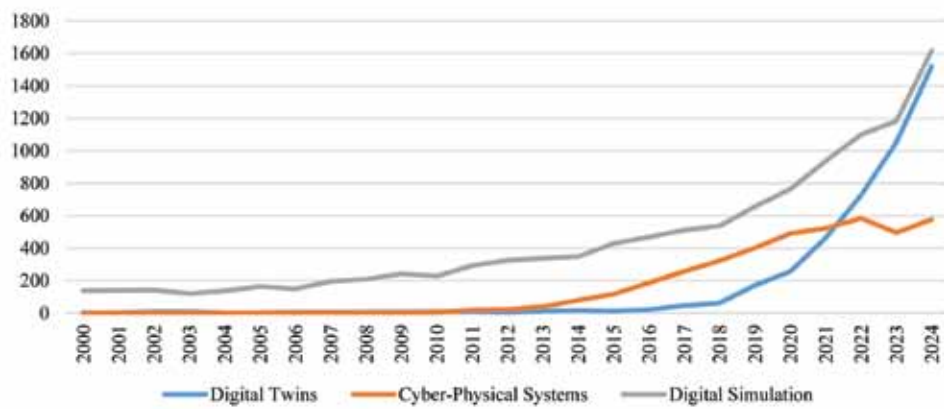
К перечисленным факторам добавляются аспекты «искусственного» повышения внимания к ЦД:

- 1) маркетинговый и медийный эффект: технологические корпорации и правительства стран продвигают концепцию как передовую технологию цифровой трансформации [22], увеличивая число грантов, исследований и публикаций [8];
- 2) академический тренд и междисциплинарность: широкий охват дисциплин (инженерия, экономика, медицина) побуждает исследователей использовать термин для повышения актуальности работ [8, 23];
- 3) государственные и корпоративные стратегии: программы цифровизации (ЕС, Китай, США) включают ЦД в приоритеты, стимулируя заказные исследования и публикации [24];
- 4) размытость определений: широкая интерпретация приводит к тому, что к ЦД относят решения, которые ранее классифицировались как цифровое моделирование или КФС [25].

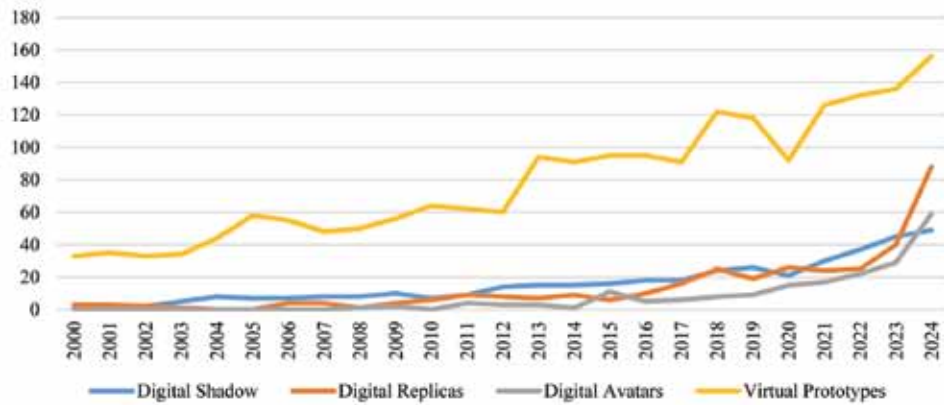
Указанные тенденции приводят к тому, что в исследованиях, не связанных напрямую с ЦД, используется этот термин для повышения значимости и популярности. То есть рост числа публикаций с 2022 г. обусловлен как объективными факторами



а) максимальное количество статей



б) среднее количество статей



в) малое количество статей

Составлено авторами

Рис. 1. Динамика роста количества статей (ScienceDirect)

Compiled by the authors

Fig. 1. Dynamics of growth in the number of articles (ScienceDirect)

(расширение применения, развитие ИИ, государственные инициативы), так и искусственным вниманием к теме (маркетинговые тренды, размытость определений). Это делает ЦД одной из наиболее динамичных научных концепций.

Термины Digital Shadow, Digital Replicas, Digital Avatars и Virtual Prototypes встречаются реже, но также демонстрируют положительную динамику. Так, Virtual Prototypes растут благодаря применению в промышленном моделировании [26], Digital

Avatars – в контексте VR/AR и метавселенных [27]. Это отражает расширение сфер применения ЦД.

Сопоставление данных ScienceDirect и eLibrary позволяет выявить различия между российским и международным дискурсом, определить приоритетные направления и оценить степень интеграции российской науки в глобальные тренды.

Для более наглядной интерпретации динамики публикационной активности в базе eLibrary все термины также были условно сгруппированы по трем уровням частотности (рис. 2).

В отечественных исследованиях преобладают термины «цифровые модели» и «модели на основе данных», тогда как «виртуальные модели» используются заметно реже. Это отражает специфику российской научной школы, где они чаще ассоциируются с VR/AR, тогда как за рубежом обозначают более широкий спектр имитационных моделей.

В России традиционно преобладают математическое и инженерное моделирование, что объясняет популярность «цифровых моделей». В других странах «виртуальные модели» чаще применяются в аэрокосмической промышленности, биомедицине и робототехнике.

Различия связаны с адаптацией и переводом терминов, что отражается на их использовании в отечественных публикациях. Интерес к «виртуальным моделям» демонстрирует стабильный рост, тогда как с 2018 г. термин «цифровые двойники» постепенно вытесняет «киберфизические системы», интерес к которым снижается. Это объясняется тем, что ЦД рассматриваются как более конкретные и измеримые решения [28], и многие исследования, ранее относящиеся к КФС, теперь классифицируются как работы о ЦД.

Термины «цифровые тени», «цифровые реплики», «цифровые аватары», «виртуальные прототипы» и «цифровая симуляция» используются реже из-за ограниченного внедрения в научный дискурс и узкой специализации, главным образом, в области виртуальной реальности, инжиниринге, кибербезопасности и биомедицине. В отличие от них, концепция ЦД, благодаря универсальности, получает более широкое распространение.

В международной научной среде концепция цифровых технологий начала формироваться раньше и развивалась более равномерно, тогда как в отечественных публикациях интерес проявился позднее, но с более высокой интенсивностью. Это связано с адаптацией глобальных трендов в российской науке и промышленности.

Полученные данные указывают, что рост публикаций по теме ЦД сопровождается слабой представленностью исследований в области управления и

экономики (что будет проиллюстрировано далее). Это свидетельствует о том, что технологическое развитие и инженерные апробации опережают институциональные и управленческие направления, что ограничивает возможности масштабного применения ЦД в отраслевых программах и корпоративном планировании.

Диаграмма распределения статей в ScienceDirect (рис. 3) показывает концентрацию международных исследований на концепциях Digital Model и Data-Driven Models. Существенная доля термина Virtual Models указывает на его востребованность в цифровом проектировании и предиктивном анализе.

При этом термин DT, несмотря на широкое применение в промышленности, занимает меньшую долю в научных публикациях, что связано с его ориентацией на прикладные разработки, а не на фундаментальные исследования.

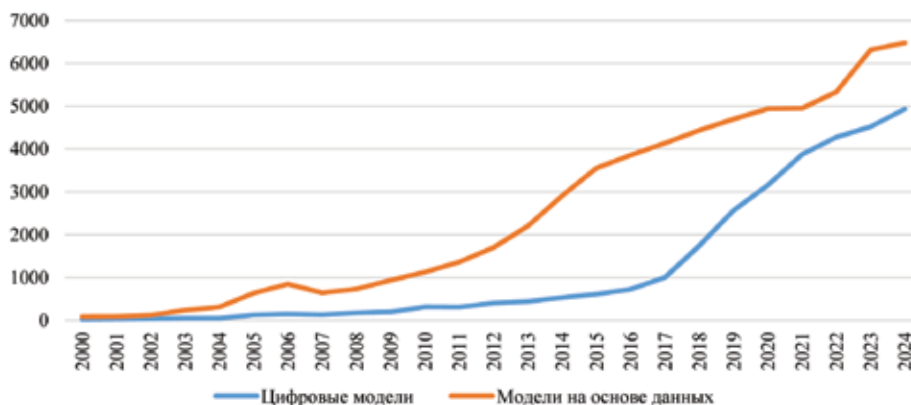
Большая часть статей, индексируемых в eLibrary, посвящена «моделям на основе данных» и «цифровым моделям», в то время как на «цифровые двойники» приходится лишь 3,54% (рис. 4).

Преобладание инженерных концептов (цифровые модели, модели на основе данных) при сравнительно небольшой доле публикаций о ЦД в управленческих дисциплинах показывает, что потенциал технологии в настоящее время реализуется преимущественно в технической сфере. При этом ее значение для управленческих практик, экономической политики и разработки отраслевых цифровых программ остается недооцененным.

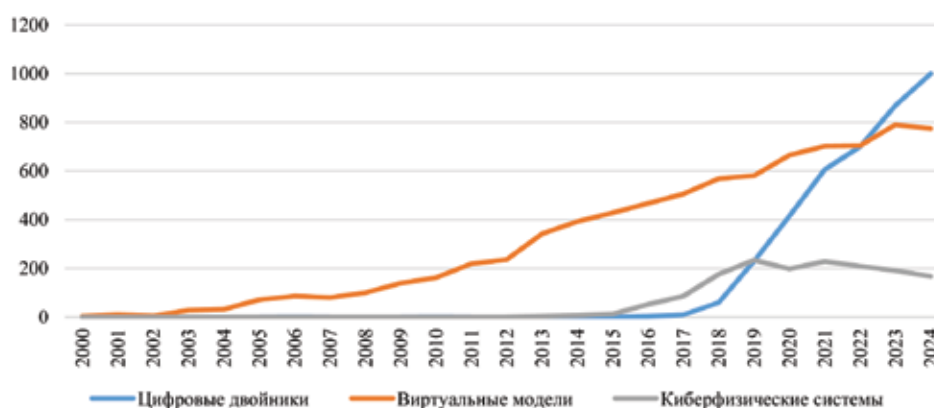
Как уже было отмечено ранее, последующий анализ дисциплинарной принадлежности исследований и распределения терминов по предметным областям (рис. 5, рис. 6) основан на данных ScienceDirect ввиду ограничений, связанных с системой классификации в eLibrary.

Анализ показал доминирование инженерных наук (29,21%). Значительный вклад вносят также компьютерные науки (15,15%) и медико-биологическое направление (8,7%), что отражает технологическую ориентацию исследований.

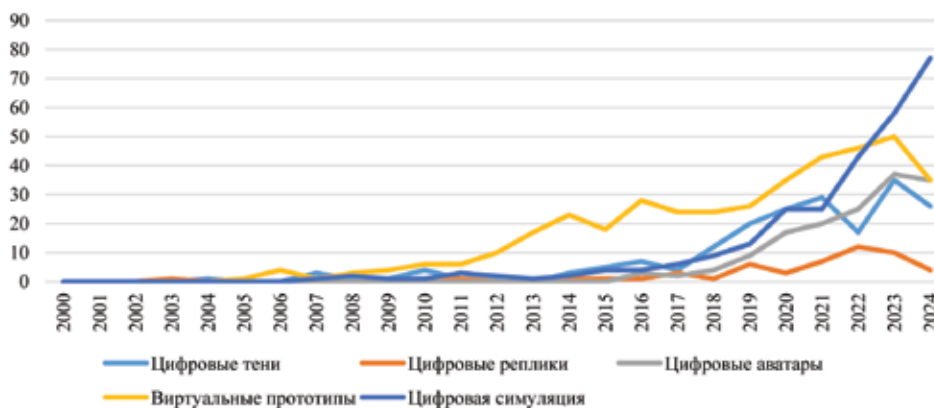
Значительная доля компьютерных наук (CS) подчеркивает ключевую роль цифровых технологий в разработке алгоритмов машинного обучения, анализа данных, интернета вещей и КФС. Медицина и стоматология (MD) также демонстрируют устойчивый интерес к цифровым технологиям, что связано с развитием моделирования анатомических структур. Существенная доля публикаций в энергетике (Energy) и экологии (Environmental Science) указывает на широкое применение цифровых моделей для прогнозирования энергопотребления, оптимизации энергосистем и мониторинга климатических изменений.



а) максимальное количество статей



б) среднее количество статей



в) малое количество статей

Составлено авторами

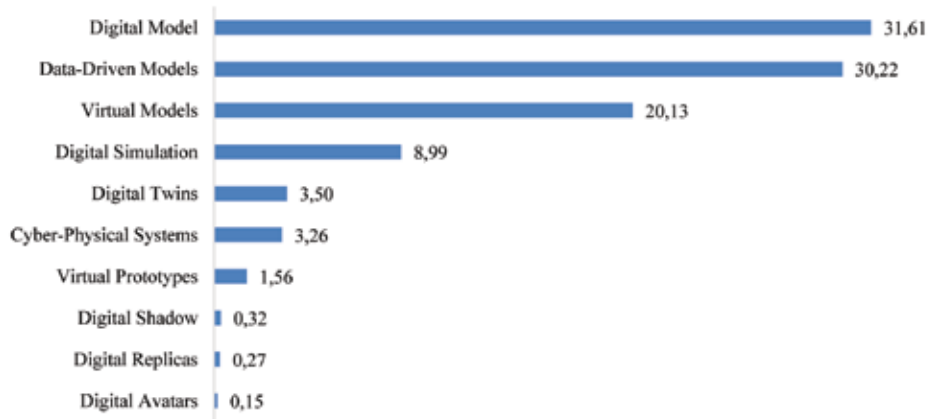
Рис. 2. Динамика роста количества статей (eLibrary)

Compiled by the authors

Fig. 2. Dynamics of growth in the number of articles (eLibrary)

Несмотря на активное внедрение цифровых технологий в технических науках, их использование в сфере управления, бизнеса и принятия решений остается ограниченным. Это подтвержда-

ется низкой долей публикаций в таких областях, как науки о принятии решений (DS – 2,84%) и бизнес, менеджмент и бухгалтерский учет (BMA – 1,64%).

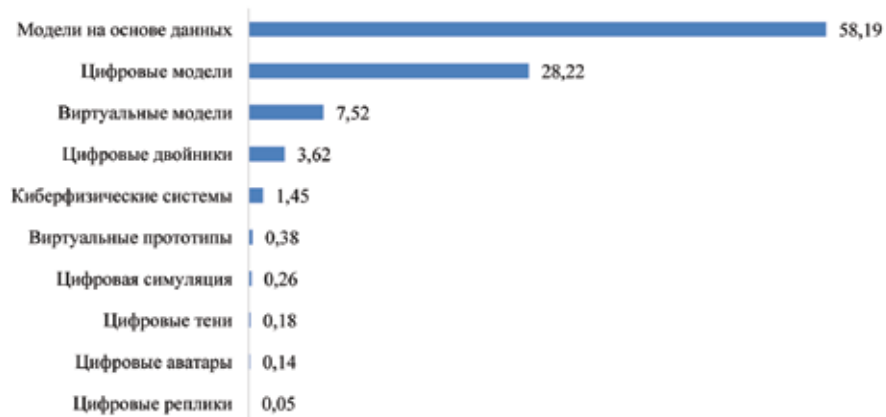


Составлено авторами

Рис. 3. Доминирующие исследовательские концепции в выборке ScienceDirect: ранжирование по частоте упоминаний, %

Compiled by the authors

Fig. 3. Dominant research concepts in ScienceDirect sample: ranking by occurrence frequency, %



Составлено авторами

Рис. 4. Доминирующие исследовательские концепции в выборке eLibrary: ранжирование по частоте упоминаний, %

Compiled by the authors

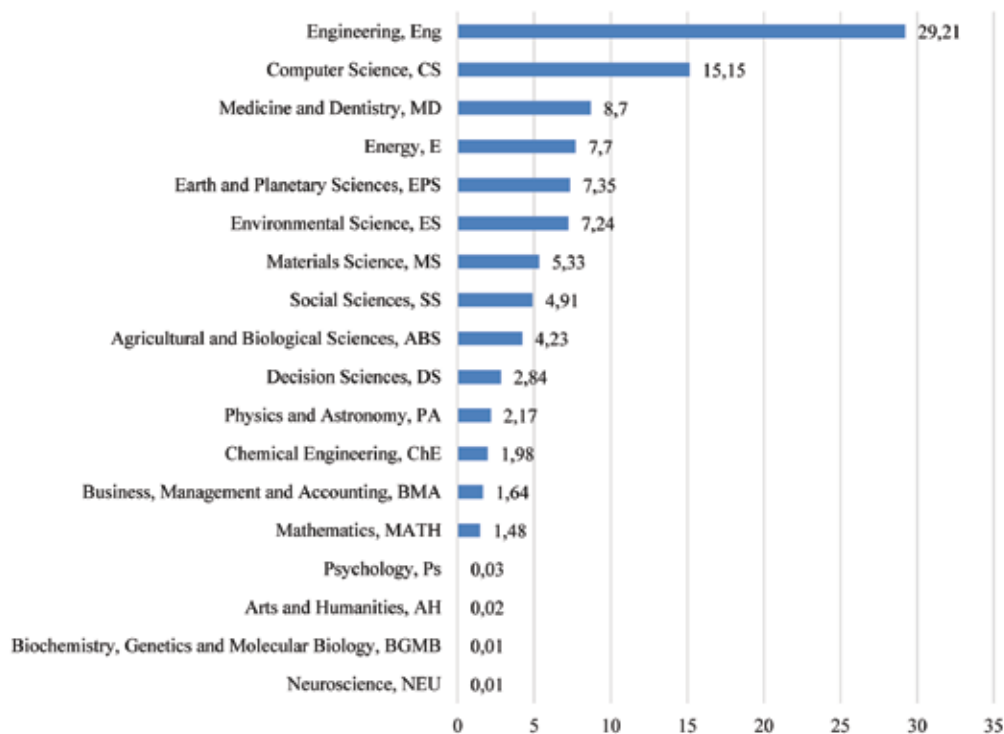
Fig. 4. Dominant research concepts in eLibrary sample: ranking by occurrence frequency, %

На фоне опережающего роста DT в инженерных областях эти показатели указывают на существенный неосвоенный управленческий потенциал технологии. Это соответствует ранней стадии организационно-экономической интеграции ЦД и определяет основную точку роста – развитие управленческих сценариев применения. В гуманитарных дисциплинах DT представлены эпизодически, что отражает слабую интеграцию в эти области.

Анализ терминологической локализации по отраслям знаний (см. рис. 6) демонстрирует выраженную специализацию исследовательских практик.

Сфера применения большинства анализируемых терминов ограничена. Наиболее активно они используются в инженерных и компьютерных науках и медицине. В науках о Земле и окружающей среде основное внимание уделяется Digital Shadow и Data-Driven Models.

В экономических и управленческих науках DT встречаются редко, 5% публикаций относится к предметной области VMA, DS – всего 9%. Это указывает на ограниченное освоение их организационно-экономического потенциала.



Составлено авторами

Рис. 5. Приоритетные области исследований (ScienceDirect), %

Compiled by the authors

Fig. 5. Priority research domains (ScienceDirect), %

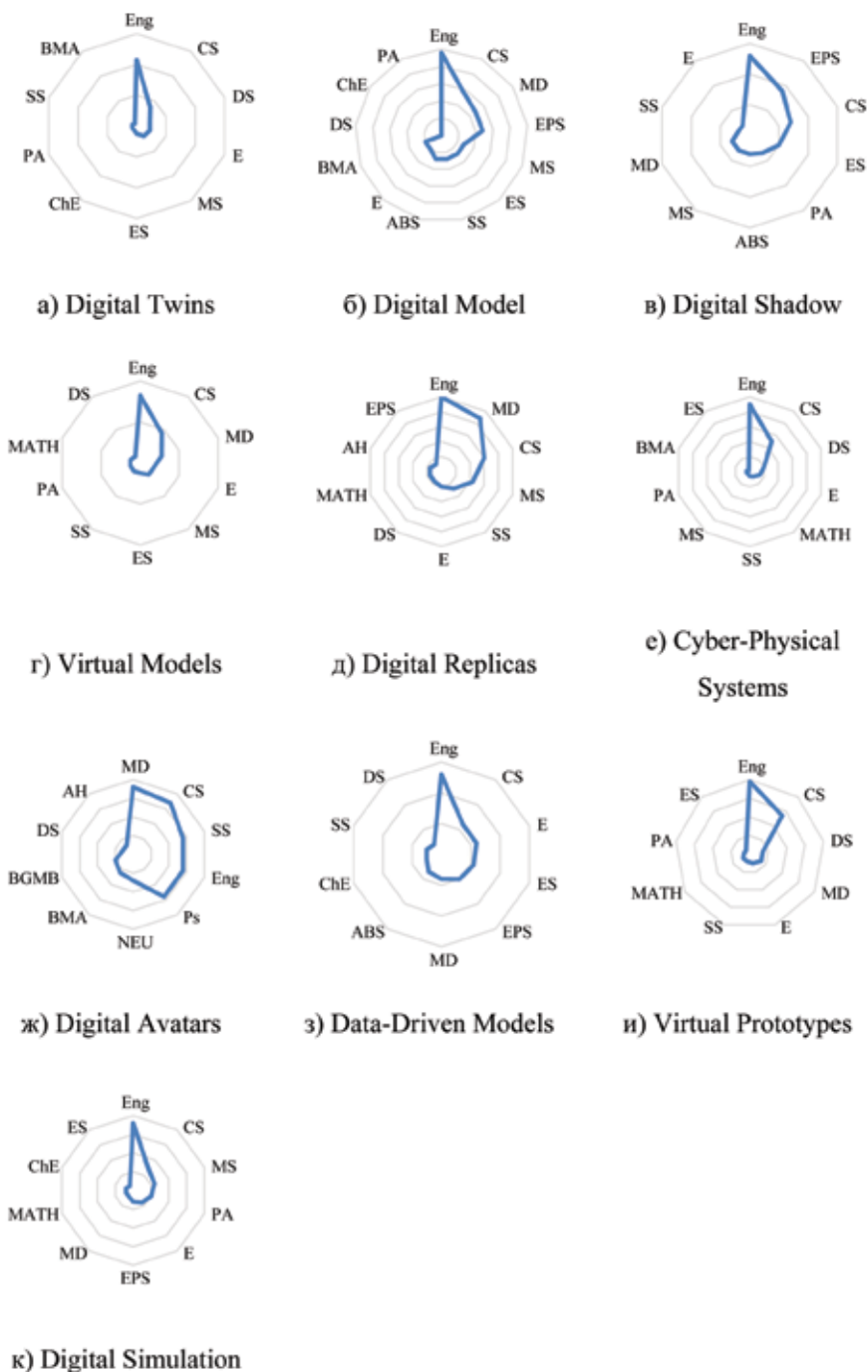
Анализ показал, что распространение ЦД в экономике инноваций сдерживают терминологическая неоднородность [6–8], дисбаланс дисциплинарной структуры (при доминировании инженерных исследований управленческая проблематика представлена минимально), недостаток компетенций на стыке анализа данных и управленческого моделирования, а также институциональные ограничения (доступ к данным, их стандартизация и совместимость) [29, 30]. Для преодоления этих барьеров необходимы унификация терминологии и показателей эффективности, повышение качества данных, развитие управленческих пилотов (логистика, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), энергоэффективность), подготовка специалистов, сочетающих инженерные и управленческие навыки. Несмотря на наличие успешных пилотных проектов, их масштабирование сдерживается высокими издержками внедрения, отсутствием стандартов обмена данными и совместимости, сложностью интеграции с устаревшими ИТ-системами, а также дефицитом специалистов, сочетающих инженерные и управленческие компетенции.

Ограниченное количество исследований по применению DT в бизнесе и управлении свидетельствует о начальной стадии их практической реали-

зации. Это может быть связано с тем, что цифровые двойники рассматриваются преимущественно как техническое решение [29], без должного внимания к их организационно-экономическим аспектам [30]. Это может указывать на слабую междисциплинарную интеграцию и необходимость расширения применения ЦД за пределы инженерии.

Тем не менее, низкая публикационная активность в области управления и бизнеса подчеркивает значительный потенциал для дальнейших исследований. ЦД могут стать ключевым инструментом для оптимизации операционной деятельности, стратегического планирования и повышения экономической эффективности компаний. Это делает углубление исследований в этой предметной области актуальным для раскрытия потенциала технологии в сфере управления.

Стоит отметить, что низкая доля публикаций в областях DS и BMA при высокой исследовательской активности в инженерии указывает на наличие разрыва между доступностью технологий и их организационно-экономическим внедрением. Подобный разрыв характерен для переходного этапа, когда практическая реализация ограничивается пилотными проектами и не достигает масштабного эффекта для экономики инноваций.



Составлено авторами

Рис. 6. Распределение терминов по предметным областям (ScienceDirect), %

Compiled by the authors

Fig. 6. Distribution of terms by subject areas (ScienceDirect), %

Анализ публикационной активности, распределения терминов по предметным областям и интерпретация содержательного наполнения ключевых публикаций позволили обобщить направления применения ЦД. Контент-анализ дал возможность систематизировать и классифицировать ЦД по областям применения (табл. 1), а также, на основе

выявленных функциональных паттернов, разработать таксономию методов их реализации (рис. 7). Эти результаты являются логическим продолжением библиометрического и сравнительного анализа и отражают предметное и технологическое разнообразие научного дискурса о ЦД.

Таблица 1

Классификация цифровых двойников по областям применения (ScienceDirect)

Table 1

Classification of digital twins by application areas (ScienceDirect)

Область	Применение	Примеры
1	2	3
Инженерные науки (Eng)	Создание точных цифровых моделей для мониторинга, анализа, оптимизации и прогнозирования работы систем	Моделирование авиадвигателя для прогнозирования износа деталей; создание ЦД здания
Компьютерные науки (CS)	Разработка алгоритмов машинного обучения, анализа данных, IoT и КФС	Система прогнозирования отказов оборудования с использованием данных с датчиков через IoT; моделирование взаимодействия роботов в производственной линии
Медицина и стоматология (MD)	Персонализированная медицина, моделирование анатомических структур и визуализация	ЦД пациента для подбора индивидуальной терапии; 3D-моделирование зубов для планирования ортодонтического лечения
Энергетика (E)	Прогнозирование энергопотребления, оптимизация работы энергосистем	Моделирование работы электросети города для предотвращения перегрузок; анализ влияния погодных условий на работу ветроэлектростанций
Экология и науки о Земле (EPS)	Мониторинг климатических изменений, анализ данных о состоянии окружающей среды	Создание ЦД реки для прогнозирования наводнений; моделирование распространения загрязнителей в атмосфере
Материаловедение (MS)	Моделирование, оптимизация и прогнозирование свойств материалов на всех этапах их жизненного цикла	Исследование свойств новых композитных материалов; моделирование процесса изготовления изделий; моделирование поведения сплавов в ДВС
Управление и бизнес (BMA)	Рационализация операционной деятельности, повышение управленческой результативности	Создание цифровой модели склада на базе IoT-архитектуры для инвентарного мониторинга и анализа; виртуальное тестирование логистических сценариев для выбора оптимальных схем доставки
Социальные науки (SS)	Анализ социальных процессов, моделирование социальных систем	Анализ миграционных потоков; моделирование влияния социальных сетей на общественное мнение с использованием данных аналитики
Гуманитарные науки (AH)	Цифровое моделирование исторических, художественных процессов, анализ культурных явлений	Воссоздание облика древних городов с помощью 3D-моделирования; анализ эволюции художественных стилей на основе коллекции картин
Психология и нейронауки (Ps, NEU)	Моделирование когнитивных процессов, анализ данных в нейронауках	Моделирование работы мозга при обучении новым навыкам; анализ данных ЭЭГ для диагностики психических расстройств
Сельское хозяйство и биологические науки (ABS)	Оптимизация сельскохозяйственных процессов, моделирование биологических систем	Моделирование роста урожая в зависимости от различных сценариев; исследование биоразнообразия
Химическая инженерия (ChE)	Моделирование и оптимизация химических процессов	Оптимизации процесса очистки воды; моделирование производства пластика
Физика и астрономия (PA)	Симуляция и теоретическое изучение физических и космических процессов	Симуляция взаимодействия галактических объектов с применением астрономических наблюдений
Принятие решений (DS)	Информационная аналитика для обоснования управленческих решений	Система поддержки принятия решений для выбора оптимальной стратегии маркетинговой кампании; моделирование и прогноз финансовых рисков
Робототехника и автоматизация (Robotics and Automation)	Моделирование и оптимизация работы роботов и автоматизированных систем	ЦД робота-манипулятора для отработки сложных движений; моделирование работы автономного склада
Авиакосмическая промышленность (Aerospace)	Прогнозирование состояния летательных аппаратов, повышение эксплуатационной надежности	ЦД авиадвигателя для прогнозирования неисправностей; анализ аэродинамики крыла
Нефтегазовая отрасль (Oil and Gas Industry)	Оптимизация процессов в нефтегазовой отрасли	Моделирование процесса бурения скважины; прогнозирование дебита нефтяной скважины; прогнозирование износа насосов и компрессоров; моделирование работы установки каталитического крекинга
Транспорт (Transportation)	Оптимизация транспортных систем, прогнозирование работы транспортных средств	ЦД метрополитена для оптимизации графика движения поездов; система предсказания поломок автомобилей

Окончание таблицы 1

End of Table 1

1	2	3
Биохимия и молекулярная биология (BGMБ)	Моделирование молекулярных механизмов биологических систем, обработка биомедицинских данных и синтез терапевтических агентов	Создание моделей взаимодействий молекул при исследовании новых лекарственных соединений; анализ геномных мутаций; исследование фармакокинетических параметров и динамики метаболизма препаратов

Составлено авторами
Compiled by the authors

Таксономия методов реализации ЦД охватывает такие направления как моделирование, интеграция данных, прогнозирование и оптимизация (рис. 7).

Таксономия подчеркивает универсальность и адаптивность цифровых двойников для различных отраслей и задач:

- 1) многообразие методов моделирования: ЦД могут использовать физическое, математическое и цифровое моделирование, что позволяет точно отражать поведение объектов и прогнозировать их состояние;
- 2) интеграция данных: сбор и обработка данных в реальном времени, включая исторические данные, являются основой для создания точных ЦД, особенно в производстве, энергетике и транспорте;
- 3) ИИ и машинное обучение: эти технологии играют ключевую роль в прогнозировании, оптимизации и автономном принятии решений, повышая эффективность систем;
- 4) визуализация и интерфейсы: 3D-моделирование и интерактивные интерфейсы упрощают взаимодействие с ЦД, улучшая интерпретацию сложных процессов;
- 5) интеграция IoT и КФС: позволяет создавать автономные системы, что открывает новые возможности для умных фабрик и транспорта;
- 6) управление жизненным циклом: ЦД обеспечивают мониторинг, прогнозирование сбоев и планирование обслуживания, повышая надежность систем;
- 7) междисциплинарные подходы: синергия с дополненной реальностью, облачными вычислениями и квантовыми технологиями расширяет возможности ЦД;
- 8) стандартизация и унификация: разработка единых стандартов упрощает интеграцию ЦД в различные отрасли, снижая барьеры для внедрения.

Результаты анализа академической активности, терминологического разнообразия и предметной направленности публикаций демонстрируют

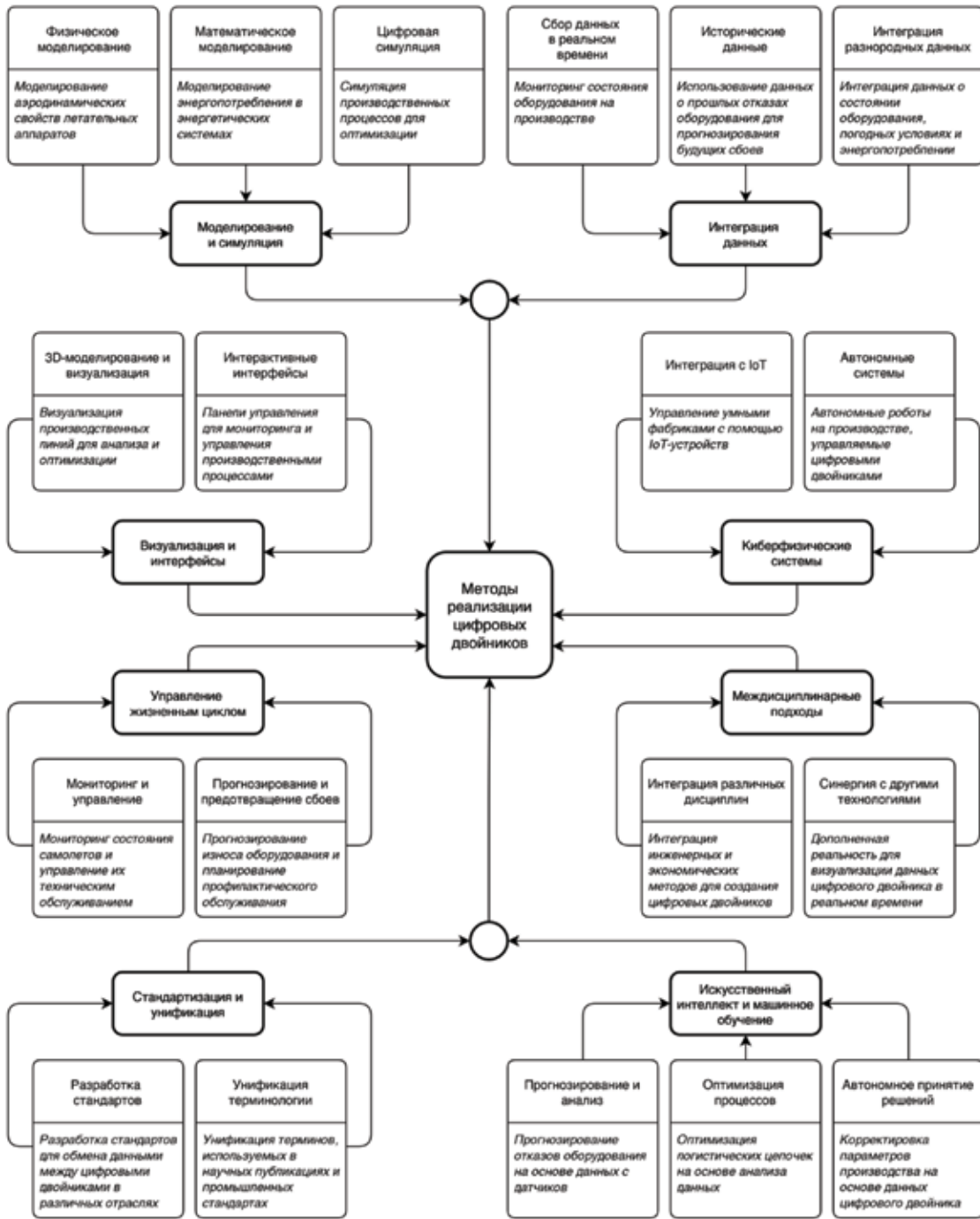
высокий уровень интереса к ЦД как к междисциплинарной технологии, находящейся на стадии активного научного и прикладного освоения. Публикационные тренды подтверждают растущую востребованность данной концепции в инженерии, энергетике, медицине, экологии и ряде других отраслей, где ЦД используются как средство моделирования, мониторинга и прогнозирования.

Несмотря на преобладание технических дисциплин в структуре научных публикаций, выявлен ряд исследований, в которых ЦД рассматриваются в прикладном контексте логистики, моделирования бизнес-процессов, автоматизации управления и поддержки принятия решений. Эти наблюдения позволяют рассматривать управленческую сферу как одно из перспективных направлений расширения функциональности технологии, хотя на данный момент ее применимость в экономике и управлении остается на ранней стадии и требует дальнейшей научной проработки.

Потенциал ЦД для интеграции в управленческие и организационно-экономические процессы обусловлен следующими предпосылками:

- возможность адаптации инженерных методов моделирования, прогнозирования и оптимизации для бизнес-процессов и экономических систем;
- преимущества использования ЦД для анализа больших массивов данных и обоснования управленческих решений;
- роль виртуального тестирования сценариев в снижении операционных рисков и затрат;
- междисциплинарная природа технологии, позволяющая объединять инженерные, ИТ- и управленческие подходы.

Динамичное развитие и междисциплинарность ЦД создают основу для их применения в цифровой трансформации социально-экономических систем. Однако выявленный разрыв между технологическим развитием и управленческим освоением указывает на необходимость их стандартизации, пилотных внедрений в управленческих сценариях и интеграции в корпоративное стратегическое планирование.



Составлено авторами

Рис. 7. Таксономия методов реализации цифровых двойников

Compiled by the authors

Fig. 7. Taxonomy of methods for implementing digital twins

Выводы

Результаты библиометрического и содержательного анализа подтвердили гипотезу о фрагментарности и терминологической неоднородности академического освоения технологии ЦД. Несмотря на широкое распространение концепции в инженерно-технических дисциплинах, ее интеграция

в управленческие и организационно-экономические контексты инновационной экономики остается ограниченной. Это проявляется в дисбалансе публикационной активности и терминологической вариативности, что формирует барьеры для масштабирования технологии в стратегическое планирование и отраслевые программы.

Сравнительный анализ публикаций в международной и российской базах позволил выявить общую тенденцию роста интереса к теме ЦД, а также отметить различия в терминологической базе и доминирующих научных подходах. Выявленные различия указывают на асинхронность развития международного и отечественного академического дискурса, что ограничивает трансфер инженерных решений в социально-экономические практики.

Предложенная классификация направлений применения ЦД и таксономия методов их реализации отражают предметное и функциональное многообразие исследований, демонстрируя потенциал технологии не только в инженерном и отраслевом секторе (энергетика, транспорт), но и в управленческих сценариях – от логистики и ТОиР до стратегического планирования и цифровых отраслевых программ.

Проведенное исследование обладает теоретической значимостью для развития понятийного и методологического аппарата, связанного с изучением ЦД как междисциплинарного феномена. Практическая значимость полученных результатов заключается в формировании обоснованной базы знаний о направлениях применения ЦД, которую можно использовать для экономической политики, стратегического планирования и реализации цифровой трансформации в экономике. Выявленные закономерности развития технологии и предложенные типологии обеспечивают опору для построения методологических подходов, адаптации международного опыта и разработки стратегий

внедрения ЦД в практику цифровой трансформации социально-экономических систем в условиях экономики инноваций.

К ограничениям настоящего исследования относятся временные рамки анализа (2000–2024 гг.), фокус на двух библиографических базах, различающихся по охвату и структуре данных, а также возможная неполнота терминологического охвата в силу разнообразия используемой понятийной базы. Отдельного внимания требует проблема семантического перекрытия и неоднозначности в трактовке смежных терминов, что может влиять на количественные оценки и характер тематической кластеризации. Дополнительные ограничения связаны с отсутствием функционала eLibrary для анализа дисциплинарной принадлежности отечественных публикаций.

Вектор дальнейших научных разработок целесообразно направить на:

- уточнение понятийного аппарата и согласование терминологических подходов в разных дисциплинарных школах;
- разработку междисциплинарных моделей, объединяющих инженерные, экономические и управленческие аспекты ЦД;
- анализ условий институционализации и трансфера ЦД в практики цифровой трансформации экономики;
- эмпирическое исследование кейсов внедрения технологии в прикладных социально-экономических сценариях.

Список источников

1. Дудин М.Н., Шкодинский С.В. Тенденции, возможности и угрозы цифровизации национальной экономики в современных условиях // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. № 3. С. 689–714. EDN: <https://elibrary.ru/nsoqak>. <https://doi.org/10.18334/epp.11.3.111785>
2. Черкасова В.А., Слепушенко Г.А. Влияние цифровизации бизнеса на финансовые показатели российских компаний // Финансы: теория и практика. 2021. Т. 25. № 2. С. 128–142. EDN: <https://elibrary.ru/dfhriy>. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2021-25-2-128-142>
3. Земляк С.В., Гусарова О.М., Прохоренков П.А. Исследование влияния цифровых технологий на деятельность бизнес-компаний в условиях трансформации экономики // Фундаментальные исследования. 2021. № 7. С. 21–26. EDN: <https://elibrary.ru/xpobeu>. <https://doi.org/10.17513/fr.43067>
4. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
5. Куприяновский В.П., Климов А.А., Воропаев Ю.Н., Покусаев О.Н., Добрынин А.П., Понкин И.В., Лысогорский А.А. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8. № 3. С. 55–74. EDN: <https://elibrary.ru/cavplb>
6. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 11. P. 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

7. *Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C.* Digital Twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison // *Engineering*. 2019. Vol. 5. Iss. 4. P. 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
8. *Сосфенов Д.А., Шахова М.С.* Применение технологии цифровых двойников в России: возможности развития и сдерживающие факторы // *Экономика и управление*. 2023. Т. 29. № 11. С. 1325–1332. EDN: <https://elibrary.ru/qtriti>. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-11-1325-1332>
9. *Grieves M., Vickers J.* Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Eds. *Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A.* Springer, Cham, 2017. P. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
10. *Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H.* Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment // *Manufacturing Letters*. 2013. Vol. 1. Iss. 1. P. 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
11. *Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L.* Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. NASA, 2010. 32 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap (дата обращения: 19.02.2025)
12. *Kuhn T.* Digitaler zwilling // *Informatik Spektrum*. 2017. Vol. 40. P. 440–444. <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2>
13. *Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D.* About the importance of autonomy and Digital Twins for the future of manufacturing // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. Iss. 3. P. 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
14. *Полянин А.В., Головина Т.А.* Концепция управления инновационной деятельностью промышленных систем на основе технологии цифрового двойника // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки*. 2021. Т. 14. № 5. С. 7–23. EDN: <https://elibrary.ru/iggqdz>. <https://doi.org/10.18721/JE.14501>
15. *Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Т. 7. № 5. С. 105–115. EDN: <https://elibrary.ru/ylcqwi>
16. *Быкова В.Н., Ким Е., Гаджалиев М.Р., Мусиенко В.О., Оруджев А.О., Туровская Е.А.* Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2020. № 1(28). С. 8–19. EDN: <https://elibrary.ru/zhgxam>. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8>
17. *He B., Bai K.-J.* Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Advances in Manufacturing*. 2020. Vol. 9. P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>
18. *Park S., Maliphol S., Woo J., Fan L.* Digital Twins in Industry 4.0 // *Electronics*. 2024. Vol. 13. Iss. 12. P. 2258. <https://doi.org/10.3390/electronics13122258>
19. *Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J.* Artificial intelligence in digital twins – a systematic literature review // *Data and Knowledge Engineering*. 2024. Vol. 151. P. 102304. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>
20. *Malini A., Rajasekaran U., Sriram G.K., Ramyavarshini P.* Industry 4.0: survey of digital twin in smart manufacturing and smart cities // In: *Digital Twin for Smart Manufacturing*. 2023. P. 89–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99205-3.00013-4>
21. *Sai S., Sharma P., Gaur A., Chamola V.* Pivotal role of digital twins in the metaverse: a review // *Digital Communications and Networks*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.12.003>
22. *Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.* Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
23. *Kim T., Ahn B., Lee W., Kang H.* Analysis of metaverse trends using news big data // *Journal of Digital Contents Society*. 2022. Vol. 23. Iss. 2. P. 203–216. <https://doi.org/10.9728/dcs.2022.23.2.203>
24. *Garske B., Holz W., Ekardt F.* Digital twins in sustainable transition: exploring the role of EU data governance // *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2024. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/frma.2024.1303024>
25. *Somers R.J., Douthwaite J.A., Wagg D.J., Walkinshaw N., Hierons R.M.* Digital-twin-based testing for cyber–physical systems: a systematic literature review // *Information and Software Technology*. 2023. Vol. 156. P. 107145. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107145>

26. *Aromaa S.* Virtual prototyping in design reviews of industrial systems // In: Proceedings of the 21st International Academic Mindtrek Conference. AcademicMindtrek '17, Tampere Finland, September 20-21, 2017. P. 110–119. <https://doi.org/10.1145/3131085.3131087>
27. *Alcantara J.C., Tasic I., Cano M.-D.* Enhancing digital identity: evaluating avatar creation tools and privacy challenges for the metaverse // Information. 2024. Vol. 15. Iss. 10. P. 624. <https://doi.org/10.3390/info15100624>
28. *Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F.* Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. P. 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
29. *Attaran M., Celik B.G.* Digital Twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities // Decision Analytics Journal. 2023. Vol. 6. P. 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
30. *Perno M., Hvam L., Haug A.* Enablers and barriers to the implementation of Digital Twins in the process industry: a systematic literature review // In: 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, 2020. P. 959–964. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309745>

Статья поступила в редакцию 22.06.2025; одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 05.12.2025

Об авторах:

Михненко Павел Александрович, доктор экономических наук, доцент; профессор кафедры «Бизнес информатика», факультет «Инженерный бизнес и менеджмент»; SPIN-код: 4822-7986, Researcher ID: JXY-2079-2024, Scopus ID: 57204476891

Копачевский Максим Михайлович, аспирант кафедры «Бизнес информатика»; факультет «Инженерный бизнес и менеджмент»; SPIN-код: 4684-4728

Вклад авторов:

Михненко П. А. – научное руководство, развитие методологии исследования, проведение критического анализа материалов, классификация цифровых двойников по областям применения, проведение контент-анализа, разработка таксономии методов реализации, формирование выводов, редактирование текста статьи, интерпретация данных, систематизация и классификация.

Копачевский М. М. – подготовка начального варианта текста, сбор и систематизация материалов, проведение библиометрического и сравнительного анализа, анализ публикационной активности по международной базе данных ScienceDirect и российской базе eLibrary за период с 2000 по 2024 гг., перевод элементов статьи на английский язык.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- Dudin M.N., Shkodinsky S.V. Trends, opportunities and threats of digitalization of the national economy in modern conditions. *Journal of economics, entrepreneurship and law*. 2021; 11(3):689–714. EDN: <https://elibrary.ru/nsoqak>. <https://doi.org/10.18334/epp.11.3.111785> (In Russ.)
- Cherkasova V.A., Slepshenko G.A. The impact of digitalization on the financial performance of Russian companies. *Finance: theory and practice*. 2021; 25(2):128–142. EDN: <https://elibrary.ru/dfhriy>. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2021-25-2-128-142> (In Russ.)
- Zemlyak S.V., Gusarova O.M., Prohorenkov P.A. Study of the impact of digital technologies on the activities of business companies in the context of economic transformation. *Fundamental research*. 2021; (7):21–26. EDN: <https://elibrary.ru/xpobeu>. <https://doi.org/10.17513/fr.43067> (In Russ.)
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 2017; 11:939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198> (In Eng.)
- Kupriyanovsky V.P., Klimov A.A., Voropaev Yu.N., Pokusaev O.N., Dobrynin A.P., Ponkin I.V., Lysogorsky A.A. Digital Twins based on the development of BIM technologies, related ontologies, 5G, IoT, and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020; 8(3):55–74. EDN: <https://elibrary.ru/cavplb> (In Russ.)
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(11):1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474> (In Eng.)

7. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital Twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: correlation and comparison. *Engineering*. 2019; 5(4):653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014> (In Eng.)
8. Sosfenov D.A., Shahova M.S. Application of Digital Twin technology in Russia: development opportunities and constraints. *Economics and management*. 2023; 29(11):1325–1332. EDN: <https://elibrary.ru/qriti>. <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-11-1325-1332> (In Russ.)
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Eds. Kahlen J., Flumerfelt S., Alves A. Springer, Cham, 2017. P. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (In Eng.)
10. Lee J., Lapira E., Bagheri B., Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*. 2013; 1(1):38–41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005> (In Eng.)
11. Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. NASA, 2010. 32 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap (accessed: 19.02.2025) (In Eng.)
12. Kuhn T. Digitaler zwilling. *Informatik Spektrum*. 2017; 40:440–444. <https://doi.org/10.1007/s00287-017-1061-2> (In Eng.)
13. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and Digital Twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*. 2015; 48(3):567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141> (In Eng.)
14. Polyanin A.V., Golovina T.A. The concept of innovation management of industrial systems based on digital twin technology. *St. Petersburg State Polytechnical University journal. Economics*. 2021; 14(5):7–23. EDN: <https://elibrary.ru/iggqdz>. <https://doi.org/10.18721/JE.14501> (In Russ.)
15. Kurganova N.V., Filin M.A., Cherniaev D.S., Shaklein A.G., Namiot D.E. Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(5):105–115. EDN: <https://elibrary.ru/ylcqw> (In Russ.)
16. Bykova V.N., Kim E., Gadzhialiev M.R., Musienko V.O., Orudzhev A.O., Turovskaya E.A. Application of a digital twin in the oil and gas industry. *Actual problems of oil and gas*. 2020; (1(28)):8–19. EDN: <https://elibrary.ru/zhgxam>. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-28.art8> (In Russ.)
17. He B., Bai K.-J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Advances in Manufacturing*. 2020; 9:1–21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5> (In Eng.)
18. Park S., Maliphol S., Woo J., Fan L. Digital Twins in Industry 4.0. *Electronics*. 2024; 13(12):2258. <https://doi.org/10.3390/electronics13122258> (In Eng.)
19. Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J. Artificial intelligence in digital twins – a systematic literature review. *Data and Knowledge Engineering*. 2024; 151:102304. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304> (In Eng.)
20. Malini A., Rajasekaran U., Sriram G.K., Ramyavarshini P. Industry 4.0: survey of digital twin in smart manufacturing and smart cities. In: *Digital Twin for Smart Manufacturing*. 2023. P. 89–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99205-3.00013-4> (In Eng.)
21. Sai S., Sharma P., Gaur A., Chamola V. Pivotal role of digital twins in the metaverse: a review. *Digital Communications and Networks*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dcam.2024.12.003> (In Eng.)
22. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020; 8:108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358> (In Eng.)
23. Kim T., Ahn B., Lee W., Kang H. Analysis of metaverse trends using news big data. *Journal of Digital Contents Society*. 2022; 23(2):203–216. <https://doi.org/10.9728/dcs.2022.23.2.203> (In Eng.)
24. Garske B., Holz W., Ekardt F. Digital twins in sustainable transition: exploring the role of EU data governance. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2024; 9. <https://doi.org/10.3389/frma.2024.1303024> (In Eng.)
25. Somers R.J., Douthwaite J.A., Wagg D.J., Walkinshaw N., Hierons R.M. Digital-twin-based testing for cyber–physical systems: a systematic literature review. *Information and Software Technology*. 2023; 156:107145. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107145> (In Eng.)

26. Aromaa S. Virtual prototyping in design reviews of industrial systems. In: *Proceedings of the 21st International Academic Mindtrek Conference. AcademicMindtrek '17. Tampere Finland, September 20-21, 2017*. P. 110–119. <https://doi.org/10.1145/3131085.3131087> (In Eng.)
27. Alcantara J.C., Tasic I., Cano M.-D. Enhancing digital identity: evaluating avatar creation tools and privacy challenges for the metaverse. *Information*. 2024; 15(10):624. <https://doi.org/10.3390/info15100624> (In Eng.)
28. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 94:3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1> (In Eng.)
29. Attaran M., Celik B.G. Digital Twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*. 2023; 6:100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165> (In Eng.)
30. Perno M., Hvam L., Haug A. Enablers and barriers to the implementation of digital twins in the process industry. In: *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. Singapore, 2020. P. 959–964. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309745> (In Eng.)

The article was submitted 22.06.2025; approved after reviewing 16.09.2025; accepted for publication 05.12.2025

About the authors:

Pavel A. Mikhnenko, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor; Professor of the Department of Business Informatics, Faculty of Engineering Business and Management; SPIN: 4822-7986, Researcher ID: JXY-2079-2024, Scopus ID: 57204476891

Maxim M. Kopachevsky, Postgraduate student, Department of Business Informatics, Faculty of Engineering Business and Management; SPIN: 4684-4728

Contribution of the Authors:

Mikhnenko P. A. – scientific supervision, development of research methodology, critical analysis of materials, classification of digital twins by application areas, content analysis, development of taxonomy for implementation methods, formulation of conclusions, article text editing, data interpretation, systematization and classification.

Kopachevsky M. M. – preparation of the initial draft, collection and systematization of materials, conducting bibliometric and comparative analyses, analysis of publication activity indexed in the international database ScienceDirect and the Russian database eLibrary for the period 2000–2024, translation of the article elements into English.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.