

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.

Принята к публикации 06.02.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3

Для цитирования: Сукманова Т. В., Белов Н. С. Цифровой двойник как инструмент моделирования и оптимизации сложных природных и технических систем // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канга. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 40–57. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3.

Рассматривается концепция цифрового двойника (далее – ЦД) как сложная киберфизическая система, представляющая собой виртуальную репрезентацию физических объектов, процессов или систем. Осуществлен ретроспективный анализ эволюции данной технологии, начиная с ее зарождения в практике NASA и заканчивая современными концептуальными подходами, такими как модель жизненного цикла изделия, предложенная Майклом Гривзом, и мультифизические модели, разрабатываемые Глассеном. В отличие от простого моделирования, ЦД обеспечивает динамическое соответствие виртуальной и физической сущностей за счет непрерывного обмена данными и обратной связи. Выделены ключевые методологические аспекты создания и эксплуатации ЦД, включая вопросы интеграции гетерогенных данных, выбора адекватных моделей и обеспечения интероперабельности. Проведен критический анализ преимуществ и ограничений данной технологии с учётом ранее высказанных соображений о необходимости валидации и ограничениях, связанных с доступностью и качеством данных. Рассматриваются перспективы дальнейшего развития ЦД, в частности, интеграция с технологиями искусственного интеллекта и анализа больших данных для решения комплексных задач устойчивого развития и минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду, включая обсуждавшиеся аспекты мониторинга загрязнения и управления природными ресурсами. Отдельно подчеркивается, что, в отличие от простой базы данных, ЦД обладает операциональной моделью, обеспечивающей интерпретацию и использование данных для решения конкретных задач.

Ключевые слова: Цифровой двойник, моделирование, индустрия 4.0, геоэкология, устойчивое развитие



Введение

Концепция цифрового двойника (далее — ЦД), представляющего собой виртуальную реплику физического объекта или системы, имеет глубокие корни, уходящие на несколько десятилетий назад. Ее становление тесно связано с бурным развитием информационных технологий и всеобъемлющей цифровой трансформацией различных сфер деятельности человека. ЦД служат незаменимым инструментом для моделирования, анализа и оптимизации сложных процессов и систем. От простых моделей, созданных на ранних этапах развития этой технологии, до современных алгоритмических представлений ЦД значительную эволюцию, расширяя свои возможности и сферы применения.

Одним из наиболее ранних примеров использования концепции ЦД можно считать разработку NASA в 1960-х гг. хотя сам термин еще не был введен. В рамках миссии «Аполлон-13» инженеры создали «живую модель» космического аппарата, которая позволила детально воссоздать аварию, вызванную взрывом кислородного бака, и проанализировать ее последствия. Благодаря этой модели специалисты смогли разработать эффективные меры по спасению экипажа и обеспечению безопасного возвращения космического корабля на Землю [4].

Корни концепции ЦД уходят в 1993 г., когда Дэвид Гелентер, профессор компьютерных наук Йельского университета, представил в своей работе «Mirror Worlds» идею «зеркальных (вычисляемых) миров». Гелентер описал концепцию создания виртуальных копий реальных объектов или систем, которые могли бы служить точными отражениями их физических аналогов. Автор сравнивал такие виртуальные копии с «высокотехнологичными куклами-вуду», подчеркивая возможность взаимодействия с виртуальной моделью для воздействия на реальный объект. Гелентер предвидел революционный потенциал этой технологии, утверждая, что «зеркальные миры» превратят компьютеры из простых инструментов в мощные средства моделирования и прогнозирования, позволяющие глубже проникнуть в сущность реальности.

Идея создания виртуальных аналогов физических объектов для управления их жизненным циклом получила значительное развитие в последние десятилетия. Одним из пионеров в этой области стал Майкл Гривз, который в 2003 г. предложил концепцию ЦД в рамках курса по управлению жизненным циклом продукта в Мичиганском университете [11].

Согласно Гривзсу, ЦД состоит из трех основных компонентов (рис. 1):

- физический продукт: реальный объект, существующий в физическом пространстве;
- виртуальный продукт: цифровая копия физического продукта, представленная в виртуальном пространстве;
- подключенные данные: информационные связи, объединяющие физический и виртуальный продукты, обеспечивая постоянный обмен данными между ними.

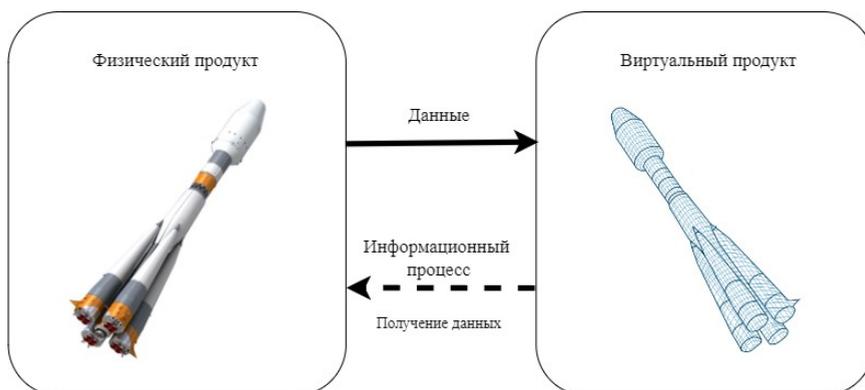


Рис. 1. Информация от «зеркальной модели»

В дальнейшем концепция ЦД претерпела существенные изменения. В 2012 г. Э.Х. Гласген и его коллеги предложили более детальное определение, описав ЦД как интегрированную мультифизическую, многомасштабную вероятностную симуляцию сложного продукта (рис. 2).

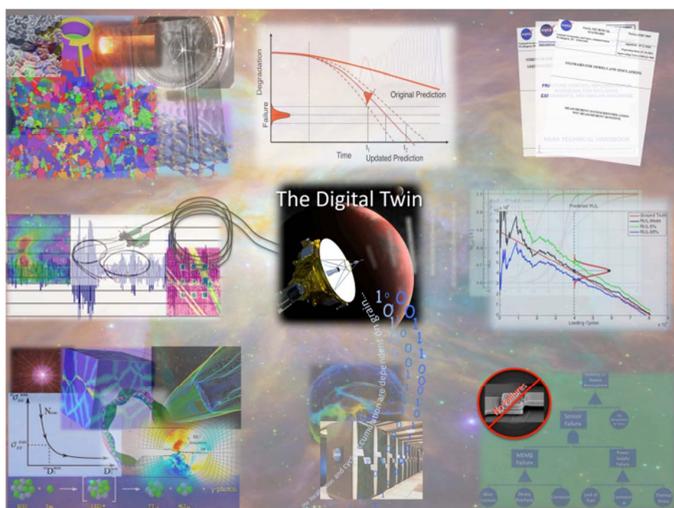


Рис. 2. Графическое представление парадигмы ЦД [10]

Ключевыми особенностями этого подхода являются:

- интеграция физических моделей: использование наиболее точных физических моделей для описания поведения объекта;
- многомасштабность: возможность моделирования процессов на разных масштабных уровнях (от микро до макро);
- вероятностный характер: учет неопределенности и вероятностных факторов, влияющих на поведение системы;
- обновление данных в реальном времени: постоянное обновление модели с использованием данных от датчиков и других источников.



Сопоставление двух концепций представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение концепций Гривза и Гласгена

Характеристика	Концепция Гривза	Концепция Гласгена
Фокус	Управление жизненным циклом продукта	Интегрированная симуляция
Структура	Три основных компонента	Мультифизическая, много-масштабная модель
Динамика	Статичная связь между физическим и виртуальным продуктом	Постоянное обновление модели на основе данных в реальном времени

43

Последние годы свидетельствуют о стремительном росте интереса к технологии ЦД и ее широком внедрении в различные отрасли промышленности. По данным исследований, пик ее популярности пришелся на 2018–2019 гг. [15]. ЦД представляет собой виртуальную копию физического объекта, процесса или системы, которая позволяет проводить детальный анализ и моделирование его поведения в реальном времени. Эта технология, являющаяся неотъемлемой частью концепции Индустрии 4.0, открывает новые возможности для повышения эффективности производства, снижения рисков и улучшения качества продукции.

Преимущества использования цифровых двойников:

- мониторинг и анализ в режиме реального времени;
- виртуальное тестирование и оптимизация;
- прогнозирование отказов;
- повышение качества продукции.

В настоящее время существует ряд международных и российских стандартов, регламентирующих создание и использование ЦД. Эти стандарты определяют требования к разработке, внедрению и эксплуатации ЦД, обеспечивая их совместимость и интеграцию с другими системами предприятия (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение части нормативно-правовой базы в области ЦД

Характеристика	ISO 23247-3:2021 [14]	ГОСТ Р 57700.37-2021 [1]	ГОСТ Р 58301-2018 [2]
Фокус	Динамическая связь между физическим и виртуальными мирами	Жизненный цикл изделия	Информационные наборы, отражающие свойства изделия
Определение цифрового двойника	Цифровая модель, обеспечивающая конвергенцию физического и виртуального состояний	Система, состоящая из цифровой модели и двусторонних информационных связей	Не используется термин «цифровой двойник»



Характеристика	ISO 23247-3:2021 [14]	ГОСТ Р 57700.37-2021 [1]	ГОСТ Р 58301-2018 [2]
Связь с физическим объектом	Постоянная связь и синхронизация	Двусторонняя информационная связь	Неявно выражена
Жизненный цикл	Подчеркивается динамика и эволюция	Охватывает весь жизненный цикл изделия	Фокусируется на определенных этапах жизненного цикла
Составляющие	Цифровая модель, данные	Цифровая модель, информационные связи	Информационные наборы

Все три стандарта рассматривают ЦД как виртуальное представление физического объекта или процесса. ISO 23247-3:2021 [14] акцентирует внимание на динамическом аспекте ЦД, ГОСТ Р 57700.37-2021 [1] подчеркивает его роль в жизненном цикле изделия, а ГОСТ Р 58301-2018 [2] фокусируется на информационных наборах, составляющих электронный макет изделия. Несмотря на некоторые различия в терминологии и акцентах, все три стандарта отражают общую идею ЦД как инструмента для моделирования, анализа и управления физическими объектами и процессами.

ЦД находят все более широкое применение в различных сферах, включая урбанистику и управление инфраструктурой. ЦД города представляет собой детальную виртуальную копию реального городского пространства, постоянно обновляемую и синхронизированную с данными, поступающими от многочисленных датчиков. Эта кибернетическая система позволяет проводить симуляции различных городских сценариев, оптимизировать планирование, повышать эффективность управления городскими ресурсами и снижать риски. Моделирование городских процессов, таких как транспортные потоки или распространение загрязнений, становится возможным благодаря математическим моделям, интегрированным в ЦД. Это позволяет прогнозировать последствия различных решений и выбирать оптимальные стратегии развития города. Ключевым преимуществом ЦД городов является возможность повысить качество жизни. Оптимизация использования городских ресурсов, снижение уровня загрязнения и улучшение транспортной инфраструктуры – лишь некоторые из возможных способов применения этой технологии.

Кроме того, ЦД играют важную роль в управлении рисками. Моделируя различные угрозы, такие как природные катаклизмы или техногенные аварии, можно разрабатывать эффективные планы реагирования и минимизировать потенциальные потери. ЦД города представляет собой сложную систему, включающую в себя базы данных, математические модели, алгоритмы и интерфейс пользователя. Благодаря постоянному со-

вершенствованию технологий искусственного интеллекта (далее — ИИ), возможности ЦД постоянно расширяются, открывая новые перспективы для развития городов (рис. 3).

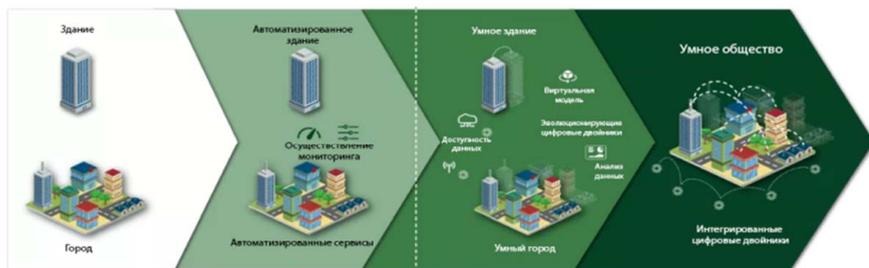


Рис. 3. Концепция «Умных городов» (ЦД городов) в настоящее время [6]

Сегодня наблюдается глобальная тенденция к созданию ЦД городов. Это виртуальные модели реальных городских пространств, позволяющие проводить комплексный мониторинг и моделирование различных городских процессов. Такие модели находят широкое применение в планировании и управлении городским развитием, позволяя эффективно решать задачи, связанные со строительством, транспортом, энергетикой, экологией и безопасностью.

Мировой опыт. Среди наиболее известных примеров городов, активно использующих ЦД, можно назвать Сингапур, Шанхай и Хельсинки. Эти мегаполисы создали детальные виртуальные копии своих территорий, которые позволяют эффективно управлять городскими ресурсами, оптимизировать транспортные потоки и повышать качество жизни населения.

Российская практика. В России также активно развивается технология ЦД городов. В 2019 г. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ утвердило национальный стандарт «Умный город», который определяет основные принципы и требования к созданию и развитию цифровых платформ для управления городским хозяйством.

Такие города, как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и Казань, уже активно внедряют ЦД в свою практику. В частности, Москва занимает лидирующую позицию в России по уровню развития систем «Умный город». В рамках городской стратегии «Умный город 2030» столица России активно развивает цифровые технологии для решения широкого спектра задач, включая оптимизацию транспортной системы, повышение энергоэффективности зданий, развитие цифровой экономики и улучшение экологической обстановки.

Ключевые направления развития ЦД городов (рис. 4):

- человеческий и социальный капитал: развитие систем здравоохранения, образования, социальной поддержки населения;
- городская среда: оптимизация использования городского пространства, создание комфортной и безопасной среды для жизни;

- цифровая мобильность: развитие интеллектуальных транспортных систем, оптимизация маршрутов, снижение транспортной нагрузки;
- экономика города: развитие цифровых технологий в промышленности, торговле, сфере услуг;
- цифровое правительство: оптимизация государственных услуг, повышение прозрачности и эффективности управления;
- безопасность и экология: обеспечение безопасности граждан, мониторинг экологической обстановки, снижение негативного воздействия на окружающую среду.

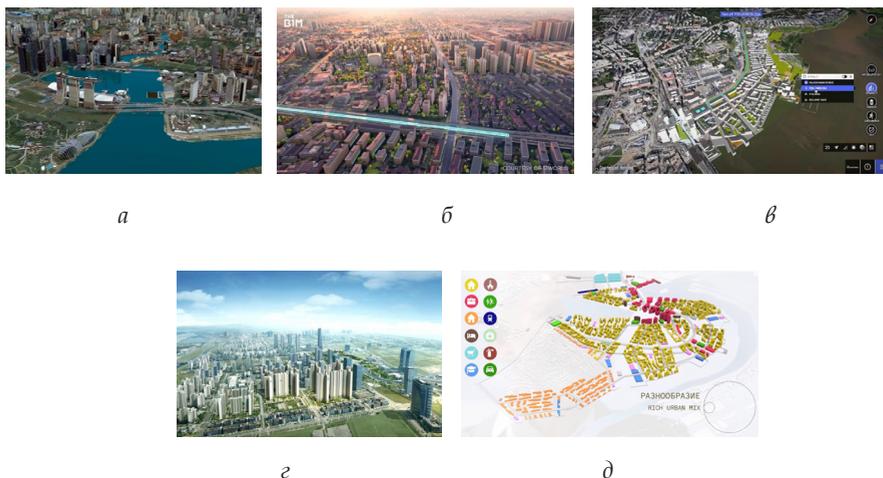


Рис. 4. Цифровые двойники городов: *а* – ЦД города «Сингапур»; *б* – ЦД города «Шанхай»; *в* – ЦД города «Хельсинки»; *г* – ЦД городов «Казань»; *д* – ЦД одного из районов Москвы [3; 8; 9; 13; 18; 20]

Поскольку ЦД городов представляют собой детальные виртуальные реплики реальных городских пространств, создаваемые на основе многочисленных данных, полученных с помощью современных технологий дистанционного зондирования (лазерного сканирования, аэрофото съемки, мобильной фотограмметрии и других), то и обработка и анализ этой информации с применением алгоритмов машинного обучения и ИИ позволяют создавать высокоточные и актуальные цифровые модели городских территорий. Одним из ключевых преимуществ ЦД является возможность комплексного анализа городской среды и принятия на основе полученных сведений взвешенных управленческих решений. Анализ пространственных данных позволяет идентифицировать наиболее перспективные локации для развития городской экономики, оптимизировать транспортные потоки, повысить энергоэффективность городской инфраструктуры и улучшить экологическую обстановку. Таким образом, ЦД городов служат основой для разработки и реализации стратегий устойчивого развития, позволяя прогнозировать последствия различных планировочных решений и оптимизировать использование городских ресурсов. Благодаря возможности детального моделирования городской среды, ЦД позволяют идентифицировать проблемные зоны,



связанные с загрязнением окружающей среды, и разрабатывать эффективные меры по их устранению. Кроме того, анализ данных мобильности населения позволяет оптимизировать расположение общественных пространств и транспортной инфраструктуры, повышая качество жизни горожан.

В современном градостроительстве все большую роль играет технология информационного моделирования зданий (далее — BIM). BIM-модель представляет собой детальную цифровую копию здания или сооружения, которая не только визуализирует его геометрию, но и содержит исчерпывающую информацию о всех его компонентах: от конструктивных элементов до инженерных систем. Эта технология позволяет интегрировать данные о проектировании, строительстве и эксплуатации объекта в единую информационную среду, что существенно повышает эффективность всех этапов жизненного цикла здания и способствует оптимизации процессов взаимодействия между различными участниками строительства. BIM-моделирование позволяет создавать точные виртуальные прототипы зданий, что дает возможность проводить всесторонний анализ проектных решений, выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях и оптимизировать строительные процессы (рис. 5).

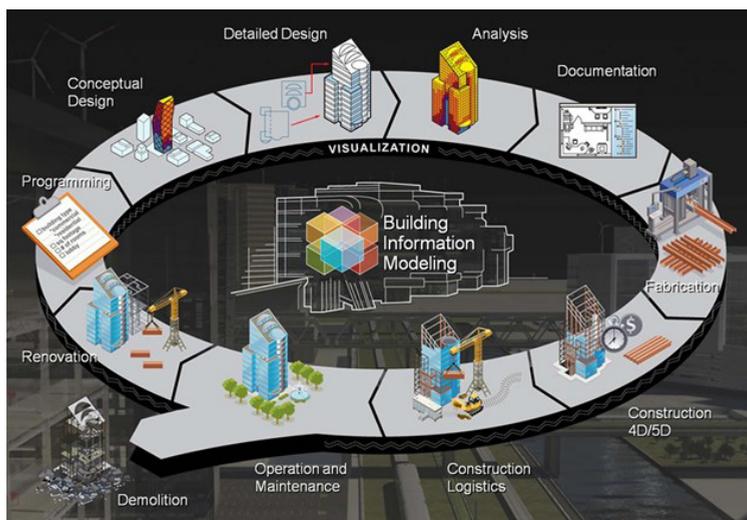


Рис. 5. Этапы создания BIM-модели [5]

ЦД человека открывают новые горизонты в персонализированной медицине, позволяя создавать детальные виртуальные модели пациентов. Они основаны на обширных данных, включающих генетическую информацию, физиологические показатели, анамнез и образ жизни, и дают возможность проводить глубокий анализ состояния здоровья, моделировать различные заболевания и разрабатывать индивидуальные планы лечения. Концепция «цифрового человека» предполагает создание комплексной виртуальной модели организма, включающей не только анатомические особенности, но и физиологические процес-

сы, генетическую информацию и сведения об образе жизни пациента. Такая модель позволяет прогнозировать развитие заболеваний, разрабатывать персонализированные планы лечения и оценивать эффективность различных терапевтических подходов в виртуальной среде. Особую актуальность цифровые двойники приобрели в условиях пандемии COVID-19. Виртуальные модели пациентов, созданные на основе данных, собираемых с помощью смартфонов, позволили отслеживать динамику распространения инфекции, прогнозировать ее течение и разрабатывать эффективные стратегии борьбы с заболеванием. Для реализации концепции цифровых двойников в здравоохранении необходима надежная информационная инфраструктура, обеспечивающая сбор, хранение и анализ больших объемов данных. Блокчейн-технологии могут быть использованы для создания безопасных и прозрачных платформ для обмена медицинскими данными между различными участниками системы здравоохранения (рис. 6).

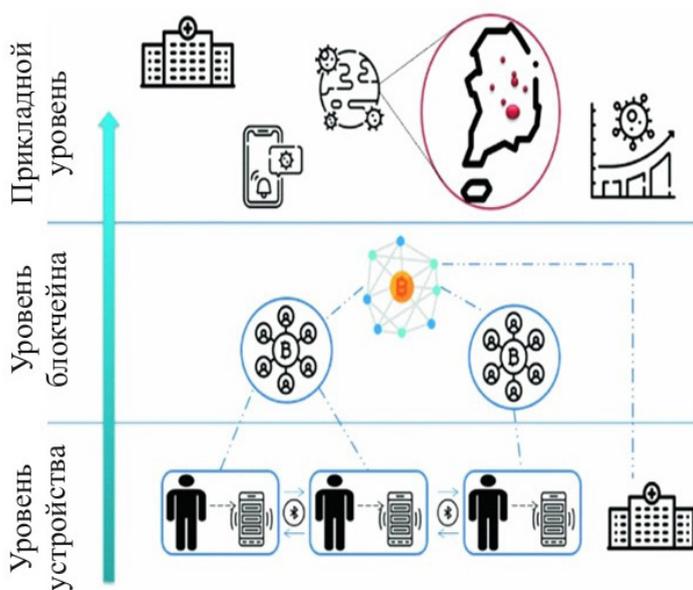


Рис. 6. Схема, основанная на блокчейн системе ЦД для «умного здорового города»

ЦД представляет собой многоаспектную киберфизическую систему, служащую для имитационного моделирования, углубленного анализа и оптимизации сложных объектов и процессов в разнообразных предметных областях. Данный термин, обладая высокой степенью концептуальной гибкости, находит применение в широком спектре научных и прикладных дисциплин, охватывая естественные (химия, биология, медицина), технические (инженерное дело, производство, строительство), социальные (социология, психология, история) и гуманитарные (урбанистика, культурология) области знания, адаптируясь к их специфическим эпистемологическим и методологическим требованиям (рис. 7).



Сфера применения	Иные специализированные названия	Определение
Химия	Цифровой двойник химических процессов Химия в облаке	компьютерное моделирование атомной или молекулярной структуры вещества, которое позволяет исследовать и предсказывать их свойства, реакции и поведение в различных условиях. Метод обеспечивает понимание и визуализацию химических процессов.
Инженерия	Цифровой двойник детали	виртуальная копия детали, созданная при помощи компьютерного моделирования. Двойник может быть использован для тестирования, анализа и оптимизации детали без необходимости физического изготовления. Данный подход позволяет сократить время затраты на разработку детали, а также минимизировать возможные ошибки при её создании и эксплуатации.
Производство	Цифровой двойник производства	виртуальная копия реального предприятия, создания на основе данных и информации, собранных с помощью различных технологий и систем. Он позволяет анализировать и оптимизировать бизнес-процессы, прогнозировать результаты и принимать управленческие решения на основе данных.
Строительство и проектирование	BIM модели	это 3D модель какого-либо объекта (здания), в которой объединены все жизненные циклы от строительства до сноса. BIM модель представляет собой полный информационный ресурс, посредством которого можно управлять документами, моделированием и координацией на протяжении любого периода работы с объектом.
Урбанистика/ Градостроительство	Цифровой двойник города "Умный город"	копия реального прототип будущего города, на базе которого можно анализировать жизненные циклы объекта, его реакцию на возможные изменения и внешние воздействия. Это точное отображение реального города в цифровой реальности, информация к которому поступает с различного рода датчиков, систем мониторинга и датчиков ресурсов.
Биология	Цифровой двойник Биомоделирование	компьютерная модель биологического объекта (организм, клетка, биомолекула), созданную с использованием методов компьютерного моделирования. Цифровой двойник обеспечивает возможность изучения структуры объекта, функций и взаимодействий. Копии могут использоваться для проведения различных экспериментов, анализа воздействия изменений и прогнозирования поведения биологических систем.
Медицина	Цифровой двойник человек Цифровой атлас человек	прототип виртуальной модели человеческого организма, которая содержит информацию о различных аспектах здоровья, анатомии, физиологии, биологических процессах и ментальных данных конкретного человека. Используются следующие данные: рентгеновские снимки, магнитно-резонансная томография, анализ биопараметров и т.д.
История	Цифровая история Цифровые гуманитарные науки	это виртуальная копия исторического объекта, здания, места или события, созданная с помощью современных технологий (3D-сканирование, фотограмметрия, компьютерное моделирование и визуализация). Он позволяет сохранить исторические объекты/события в виртуальном пространстве, что дает возможность изучать их без физического доступа к ним. Копия также используется для восстановления утраченных объектов и анализа исторических данных.
Психология/ социология философия	Цифровой след человек Цифровой аватар Цифровая философия	прототип виртуальной модели социального и цифрового следа, который содержит информацию о различных психологических характеристиках, личностных особенностях, поведенческих паттернах и эмоциональных реакциях конкретного человека, а также социальный цифровой след в сети Интернет. Двойник может быть применен для продолжения "деятельности" человека и для генерирования "новой деятельности и знаний".

Рис. 7. Терминологическая вариабельность ЦД от сферы применения



Формирование ЦД базируется на интеграции методов вычислительного моделирования, включая математические модели, численные методы и алгоритмы, с эмпирическими данными, получаемыми посредством разветвленной сети сенсорных устройств и систем мониторинга. Эта синергия позволяет создавать виртуальные репрезентации, адекватно отображающие свойства, динамику и интеракции моделируемых сущностей. Применение ЦД обеспечивает возможность проведения *in silico* исследований, направленных на изучение поведения сложных систем в различных условиях, прогнозирование вероятных исходов, верификацию гипотез и оптимизацию технологических и социальных процессов без необходимости осуществления дорогостоящих и потенциально опасных экспериментов в реальном мире.

Развитие инфраструктуры ЦД в различных областях порождает существенную методологическую проблему, связанную с демаркацией границ их концептуального содержания, элементного состава и структурной организации. В частности, возникает необходимость в четком определении компонентов, находящихся за пределами понятия ЦД, особенно в контексте экологии и природопользования, где сложность и многофакторность систем требуют особого внимания к точности моделирования.

Рассмотрим некоторые заблуждения, связанные с ЦД. Первое из них касается ЦД и производных технологий ИИ, включая машинное обучение (далее — МО). Несмотря на то, что ЦД часто интегрируют алгоритмы МО и методы ИИ для обработки и анализа больших массивов данных, поступающих в режиме реального времени, редукция концепции ЦД исключительно к алгоритмам ИИ представляется методологически некорректной. ЦД в своей основе предполагает не только статистическую обработку данных, но и построение моделей, основанных на механистическом понимании функционирования моделируемых систем, учитывая причинно-следственные связи и фундаментальные законы, действующие в рассматриваемой предметной области. Иными словами, ЦД стремится к созданию не просто корреляционной, а каузальной модели, отражающей внутреннюю структуру и динамику объекта или процесса.

Следовательно, для достижения адекватного и содержательного понимания сущности ЦД, особенно в сложных областях, таких как экология и природопользование, критически необходимо наличие глубоких знаний в соответствующей предметной области. Без фундаментального понимания физических, химических, биологических и других процессов, определяющих функционирование экосистем, создание валидных и репрезентативных ЦД становится невозможным. Применение методов ИИ и МО в данном случае выступает как вспомогательный инструмент для обработки информации и выявления закономерностей, но не заменяет собой необходимость в глубоком предметном знании и построении моделей, основанных на фундаментальных научных принципах. Таким образом, ЦД представляет собой сложную киберфизическую систему, объединяющую методы вычислительного моделирования, анализ данных и обширные предметные знания, а не является простым приложением методов ИИ к наборам данных [12; 16].



Второе заблуждение заключается в том, что ЦД не сводится к простой агрегации обширных массивов интегрированных или взаимосвязанных данных, представляя собой качественно иное явление. Хотя ЦД и оперируют значительными объемами эмпирической информации, их существенная характеристика заключается в способности к контекстуализации данных, наделению их смыслом в рамках определенной предметной области посредством сопряжения с методами моделирования и имитации. Эта особенность обеспечивает возможность интеграции гетерогенных источников информации, включая данные, полученные из различных сенсорных сетей, баз данных, экспертных оценок и результатов моделирования, что, в свою очередь, обуславливает возможность проведения более глубокого и многоаспектного анализа моделируемых систем. Критический анализ этого аспекта позволяет выявить ряд важных моментов. Во-первых, простое накопление информации, даже структурированных и взаимосвязанных, не гарантирует возникновения ЦД. Необходимым условием является наличие модели, описывающей закономерности функционирования системы и позволяющей интерпретировать данные в рамках этой модели. Во-вторых, контекстуализация данных подразумевает не только установление связей между отдельными элементами информации, но и учет внешних факторов, влияющих на систему, а также целей и задач моделирования. В-третьих, сопряжение данных с моделированием и имитацией позволяет не только анализировать текущее состояние системы, но и прогнозировать ее поведение в различных условиях, а также оптимизировать ее параметры. Отличие ЦД от простой базы данных заключается в наличии операциональной модели, обеспечивающей интерпретацию и использование данных для решения конкретных задач анализа, прогнозирования и управления [7; 19].

Третье распространенное заблуждение заключается в отождествлении ЦД с понятием «модель». В научной литературе выделяется обширная типология моделей, включающая статические, динамические, объяснительные, описательные, статистические, имитационные и другие виды, каждая из которых обладает специфическими характеристиками и методологическими основаниями. ЦД, в свою очередь, могут использовать разнообразные модельные подходы, адаптированные к конкретным системным сущностям и целевым установкам. Однако ключевым дифференцирующим признаком ЦД является их динамическая природа, обусловленная непрерывным обновлением на основе актуальных данных, что обеспечивает адекватное отражение текущего состояния моделируемых объектов или процессов. Такая характеристика принципиально отличает ЦД от статических моделей, представляющих собой фиксированный во времени срез реальности.

Интерактивность, обеспечиваемая ЦД, предоставляет пользователям возможность исследования динамики развития различных сценариев, позволяя оперативно реагировать на поступающие данные и использовать их для принятия обоснованных решений в режиме реального времени. Это свойство ЦД имеет особое значение в контексте управления сложными системами, где оперативное реагирование на изменяющиеся условия чрезвычайно важно. Критический анализ этого аспекта требует уточнения ряда значимых моментов. Во-первых, необходимо подчер-



кнуть, что ЦД не претендует на создание исчерпывающей репрезентации всех аспектов реальности. Как и любая модель, ЦД представляет собой упрощенную абстракцию, фокусирующуюся на определенных свойствах и отношениях, существенных для решения конкретных задач. Стремление к созданию всеобъемлющих ЦД для глобальных систем, хотя и возможно теоретически, не всегда является необходимым условием для достижения практической пользы. Эффективность ЦД определяется не масштабом модели, а ее адекватностью поставленным целям и задачам. Во-вторых, границы ЦД, определяющие область его применимости, устанавливаются заранее, исходя из целей моделирования и доступных ресурсов. Они могут быть скорректированы в процессе эксплуатации ЦД по мере получения новой информации и изменения требований. В-третьих, динамическая природа ЦД требует постоянного мониторинга и валидации, обеспечивающих соответствие модели реальному состоянию системы. Отсутствие адекватной валидации может привести к накоплению ошибок и, как следствие, к принятию неверных решений на основе данных ЦД. Таким образом, ЦД следует рассматривать не как синоним модели вообще, а как особый класс динамических моделей, характеризующихся непрерывным обновлением данных, интерактивностью и ориентацией на решение конкретных практических задач в рамках четко определенных границ [17].

Анализ существующих определений ЦД в экологии и природопользовании (далее — ЦД ЭП) демонстрирует отсутствие унифицированного, консенсусного определения. Этот обусловлен междисциплинарным характером области и разнообразием прикладных задач. Тем не менее можно выделить системообразующий признак ЦД ЭП, заключающийся в отображении сложной сети взаимосвязей между природными, антропогенными и природно-антропогенными факторами, формирующими экологические системы.

Интеграция гетерогенных данных, полученных из различных источников, включая данные дистанционного зондирования Земли, результаты натурных наблюдений, статистические данные, геоинформационные системы и др., в сочетании с применением адекватных математических, физических, химических, биологических и других моделей, позволяет ЦД ЭП осуществлять виртуальные эксперименты, направленные на оценку последствий реализации различных сценариев развития территорий и антропогенного воздействия на окружающую среду. Такой подход предоставляет возможность моделирования изменений в экосистемах без непосредственного вмешательства в реальную природную среду, что является его существенным преимуществом.

Критический анализ данной концепции выявляет ряд важных аспектов. Во-первых, сложность и многофакторность экологических систем обуславливают необходимость разработки специализированных моделей, учитывающих специфические особенности конкретных геосистем и процессов. Универсализация моделей в рассматриваемой области представляется затруднительной и может привести к снижению точности и адекватности результатов. Во-вторых, валидация ЦД ЭП представляет собой сложную задачу, требующую сопоставления результатов виртуальных экспериментов с данными натурных наблюдений



и экспертных оценок. Недостаточная валидация может привести к недостоверным прогнозам и, как следствие, к принятию неэффективных управленческих решений. В-третьих, необходимо учитывать ограничения, связанные с доступностью и качеством данных, используемых для построения ЦД ЭП. Неполнота или недостоверность исходных данных может существенно повлиять на точность и достоверность результатов моделирования.

Тем не менее ЦД ЭП предоставляет уникальную возможность для комплексного анализа и прогнозирования состояния окружающей среды, позволяя разрабатывать научно обоснованные стратегии управления природными ресурсами и минимизации негативного антропогенного воздействия. Возможность проведения виртуальных экспериментов позволяет оценить потенциальные риски и последствия различных управленческих решений, что способствует повышению эффективности природоохранной деятельности и устойчивому развитию территорий.

ЦД ЭП представляет собой динамическую, многомерную виртуальную репрезентацию реальной природной системы или экологического процесса, конструируемую на основе интеграции данных, получаемых из разнообразных источников. К ним относятся данные дистанционного зондирования Земли (например, спутниковые снимки), данные, поступающие с различных сенсорных устройств (датчиков), результаты вычислительного моделирования, а также информация из иных релевантных источников. В отличие от статических моделей, ЦД ЭП обладает способностью к непрерывной актуализации, отражая динамические изменения в моделируемой системе. Попытка визуализировать термин посредством существующих нейронных сетей (Kandinsky, Шедеврум и др.) представлено на рисунке 8.



Рис. 8. Восприятие термина «ЦД ЭП» нейронной сетью *Kandinsky by Sber AI*

Использование ЦД ЭП предоставляет возможность проведения имитационного моделирования различных сценариев развития экологической ситуации, прогнозирования изменений в экосистемах под воздей-



ствием различных факторов, включая антропогенные, и, как следствие, принятия более обоснованных и научно фундированных решений в области управления природными ресурсами и охраны окружающей среды. Этот подход позволяет перейти от реактивного управления к проактивному, основанному на прогнозировании и превентивных мерах.

Критический анализ данного определения требует учета ряда важных методологических аспектов, которые уже были частично сформулированы в статье и приводит нас к следующим выводам.

1. ЦД ЭП представляет собой сложную киберфизическую систему, а не простое собрание данных. Ключевым отличием ЦД ЭП является контекстуализация данных и их интерпретация в рамках определенной модели.

2. ЦД ЭП — упрощенная модель реальности с ограниченной областью применения. Стремление к созданию универсального ЦД ЭП для всех возможных ситуаций нецелесообразно. Границы и степень детализации ЦД ЭП должны определяться исходя из конкретных целей и задач моделирования.

3. Валидация ЦД ЭП — критический этап для обеспечения достоверности результатов. Сопоставление результатов моделирования с данными натурных наблюдений и экспертными оценками необходимо для верификации и калибровки модели. В контексте экологии и природопользования, где системы характеризуются высокой степенью сложности и нелинейности, эта задача приобретает особую актуальность.

4. Успешное применение ЦД ЭП требует междисциплинарного подхода. Необходимо учитывать, что успешное функционирование ЦД ЭП требует не только наличия данных и вычислительных ресурсов, но и глубоких предметных знаний в области экологии, природопользования, математического моделирования и информационных технологий. Междисциплинарный подход является необходимым условием для эффективного использования ЦД ЭП в управлении природными ресурсами.

В самом первом приближении дорожная карта создания ЦД выглядит следующим образом: формализация целей исследования — сбор и обработка данных — разработка концептуальной модели — математическое моделирование — валидация модели ЦД — калибровка модели ЦД — анализ чувствительности — использование модели ЦД.

Список источников

1. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. Введ. 01.01.2022. М., 2021.

2. ГОСТ Р 58301-2018. Управление данными об изделии. Электронный макет изделия. Общие требования. Введ. 05.12.2018. М., 2019.

3. 51World creates digital twin of the entire city of Shanghai // Unreal Engine. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/51world-creates-digital-twin-of-the-entire-city-of-shanghai> (дата обращения: 12.12.2024).

4. Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE access. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.



5. BIM là gì? Những lợi ích của việc sử dụng Revit Mep là gì? // Mayercamnoi. URL: <https://mayercamnoi.com/BIM-la-gi-Nhung-loi-ich-cua-viec-su-dung-Revit-Mep-la-gi-1657944874/> (дата обращения: 12.12.2024).

6. Digital Twin a dynamic real-time model of what's happening in the physical world // Sensative.com. URL: <https://sensative.com/iot-use-cases-by-sensative/digital-twin/> (дата обращения: 14.12.2024).

7. Durão L. F. C. S., Haag S., Anderl R. et al. Digital twin requirements in the context of industry 4.0 // Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2–4, 2018, Proceedings 15. Springer International Publishing, 2018. P. 204–214. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2_19.

8. El Azzaoui A., Kim T.W., Loia V., Park J.H. Blockchain-based secure digital twin framework for smart healthy city // Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: MUE-FutureTech 2020. Springer Singapore, 2021. P. 107–113. doi: 10.1007/978-981-15-9309-3_15.

9. Future Moscow – Rublyovo Arkhangelskoye the Smart City by Zaha Hadid Architects // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=t9PWVPxVRxk> (дата обращения: 14.12.2024).

10. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA. 2012. P. 1818. doi: 10.2514/6.2012-1818.

11. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Vol. 1, №2014. P. 1–7.

12. Groshev M., Guimaraes C., Martin-Perez J., de la Oliva A. Toward intelligent cyber-physical systems: Digital twin meets artificial intelligence // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59, №8. P. 14–20. doi: 10.1109/MCOM.001.2001237.

13. Infrastructure Digital Twins // Bentley. URL: <https://www.bentley.com/software/infrastructure-digital-twins/> (дата обращения: 14.12.2024).

14. ISO 23247-3-2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 3: Digital representation of manufacturing elements. 01.01.2021. Geneva, 2021.

15. Jones D., Snider S., Nassehi A. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020. Vol. 29. P. 36–52. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

16. Lv Z., Xie S. Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics // Digital Twin. 2022. Vol. 1. P. 12. doi: 10.12688/digitaltwin.17524.2.

17. Platenius-Mohr M., Malakuti S., Grüner S. et al. File-and API-based interoperability of digital twins by model transformation: An IIoT case study using asset administration shell // Future generation computer systems. 2020. Vol. 113. P. 94–105. doi: 10.1016/j.future.2020.07.004.

18. Singapore Land Authority 3D Smart Nation Map; Credit: Esri Singapore // GIS Resources. URL: <https://gisresources.com/singapore-land-authority-3d-smart-nation-map-debuts-on-the-world-stage> (дата обращения: 08.12.2024).

19. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C. et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 9. P. 113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043Get rights and content.



20. Zakirova T. Application of innovative standards of “green” construction in Tatarstan on the example of Kazan // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 274. P. 01001.

Об авторах

Татьяна Викторовна Сукманова — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

ORCID: 0009-0007-3402-6400

SPIN-код: 3907-8766

Николай Сергеевич Белов — канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: belovns@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2350-3690

SPIN-код: 6141-3843

T. V. Sukmanova, N. S. Belov

DIGITAL TWIN AS A TOOL FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPLEX NATURAL AND TECHNICAL SYSTEMS

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

Received 26 December 2024

Accepted 06 February 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3

To cite this article: Sukmanova T. V., Belov N. S., 2025, Digital twin as a tool for modeling and optimization of complex natural and technical system, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 40–57. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-3.

The concept of a digital twin (hereafter referred to as DT) is discussed as a complex cyber-physical system that represents a virtual representation of physical objects, processes, or systems. A retrospective analysis of the evolution of this technology is conducted, starting from its origins in NASA’s practice and culminating in contemporary conceptual approaches, such as the product life cycle model proposed by Michael Grieves and the multi-physics models developed by Glassgen. Unlike simple modeling, a DT ensures dynamic correspondence between the virtual and physical entities through continuous data exchange and feedback. Key methodological aspects of creating and operating a DT are identified, including issues related to the integration of heterogeneous data, the selection of appropriate models, and ensuring interoperability. A critical analysis of the advantages and limitations of this technology is provided, taking into account considerations regarding the need for validation and the limitations associated with the availability and quality of data. The prospects for further development of DT are discussed, particularly the integration with artificial intelligence technologies and big data analytics to address complex tasks related to sustainable development and the minimization of



anthropogenic impact on the environment, including aspects of pollution monitoring and natural resource management. It is specifically emphasized that, unlike a simple database, a DT possesses an operational model that enables the interpretation and use of data to solve specific tasks.

Keywords: Digital twin, modeling, Industry 4.0, geoecology, sustainable development

The authors

Tatiana V. Sukmanova, PhD student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: tanja.sukmanova@yandex.ru

ORCID: 0009-0007-3402-6400

SPIN-код: 3907-8766

Dr Nikolai S. Belov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: belovns@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2350-3690

SPIN-код: 6141-3843