

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
**Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики**

## РЕФЕРАТ

**Концепция цифрового двойника (Digital Twin) для управления  
жизненным циклом общественного пространства: от проектирования до  
эксплуатации**

по дисциплине «Автоматизация научных исследований»

Выполнил

Студент гр. 5040102/50201 <подпись>

Тухватуллина Г.М.

Проверил

проф., д.т.н.

<подпись>

Новиков Ф.А.

«7» января 2026 г.

Санкт-Петербург  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1..... Теоретические основы концепции Digital Twin (Цифровой двойник) .....	4
1.1.    Происхождение и определение термина. Эволюция от 3D-модели к «живому» двойнику. ....	4
1.2.    Ключевые компоненты: физический объект, виртуальная модель, данные, соединяющие их, и аналитические сервисы. ....	5
1.3.    Опыт применения в промышленности (Industry 4.0) и перспективы в градостроительстве (Smart City). ....	6
2....Анализ предметной области: общественное пространство как система .....	7
2.1.    Декомпозиция общественного пространства на подсистемы: инженерная (дорожки, освещение), экологическая (деревья, газон), социальная (потоки людей, события). ....	7
2.2.    Участники жизненного цикла и их интересы: проектировщик, заказчик (администрация), подрядчик, эксплуатирующая служба, горожанин. ....	8
2.3.    Потоки данных на каждом этапе (геоданные, проектная документация, показания датчиков, обратная связь). ....	9
3..... Моделирование архитектуры Digital Twin с использованием UML .....	10
3.1.    Структурная модель (Диаграмма классов UML) .....	10
3.2.    Функциональная модель (Диаграмма вариантов использования UML) .....	11
4. Практическая ценность и вызовы внедрения.....	14
4.1.    Ожидаемые эффекты: предиктивное обслуживание, оптимизация бюджета, основанное на данных проектирование, вовлечение горожан... ..	14

4.2. Технологические и организационные барьеры: необходимость единых стандартов данных, вопросы кибербезопасности, изменение рабочих процессов. ....	14
4.3. Примеры и кейсы (краткий обзор пилотных проектов в мире). ...	15
5. Заключение .....	16
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	18

## **Аннотация**

Исследуется концепция цифрового двойника как инструмент для сквозного управления жизненным циклом общественных пространств. Цель работы — преодоление информационной разобщенности между этапами проектирования, строительства и эксплуатации. Методология включает системный анализ предметной области и ее формализацию с применением UML-моделирования. В результате предложена архитектура двойника, определены ключевые ожидаемые эффекты внедрения: переход к предиктивному обслуживанию, оптимизация бюджета и вовлечение граждан. Сделан вывод о перспективности технологии для создания целостной системы управления, требующей решения задач стандартизации данных и организационных изменений.

## **Abstract**

This study explores the concept of a Digital Twin as a tool for the end-to-end management of the public space lifecycle. The research aims to address data fragmentation between the stages of design, construction, and operation. The methodology involves a systematic analysis of the subject area and its formalization using UML modeling. As a result, an architecture for the Digital Twin is proposed, and the key expected implementation effects are identified: a shift towards predictive maintenance, budget optimization, and citizen engagement. The conclusion highlights the technology's potential for creating an integrated management system, while acknowledging the necessity of solving data standardization and organizational transformation challenges.

## Введение

Актуальность исследования концепции цифрового двойника (Digital Twin) для управления жизненным циклом общественного пространства обусловлена возрастающей сложностью городской среды, требованиями к оптимизации финансовых затрат на всех этапах существования объекта и необходимостью вовлечения граждан в процессы принятия решений. Проблема управления таким циклом часто заключается в разрозненности информации и технологических разрывах между этапами проектирования, строительства и эксплуатации, ведущих к потерям данных, увеличению сроков и стоимости, а также к неэффективному обслуживанию. В этом контексте цифровой двойник, определяемый как виртуальная динамическая модель физического объекта, синхронизированная с ним посредством потоков данных, рассматривается как ключевая технология для преодоления указанных барьеров [1, 2]. Целью данного реферата является исследование концепции Digital Twin в качестве интеграционного инструмента для сквозного управления жизненным циклом общественного пространства. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: изучить структуру и базовые принципы построения цифрового двойника сложного урбанистического объекта; смоделировать его ключевые компоненты и процессы взаимодействия на различных стадиях жизненного цикла; оценить потенциальные эффекты и практическую пользу от внедрения данной технологии для управления общественными пространствами. Теоретической основой работы послужили исследования, охватывающие фундаментальные принципы цифровых двойников в промышленности [1, 2].

# 1. Теоретические основы концепции Digital Twin (Цифровой двойник)

## 1.1. Происхождение и определение термина. Эволюция от 3D-модели к «живому» двойнику.

Концепция цифрового двойника (Digital Twin) зародилась в рамках космической и авиационной промышленности, где требовалось создание высокоточных наземных моделей для мониторинга и диагностики удаленных объектов. Первоначально основу составляли трехмерные геометрические модели, создаваемые в системах автоматизированного проектирования (CAD). Однако эволюция от статической 3D-модели к динамической и «живой» цифровой сущности стала возможной благодаря параллельному развитию нескольких технологических трендов: распространению интернета вещей (IoT), обеспечивающего непрерывный поток данных с датчиков, появлению облачных вычислений для обработки больших данных и развитию методов машинного обучения для сложной аналитики. Современное определение, согласно которому цифровой двойник представляет собой комплексную виртуальную модель физического объекта или системы, отражающую его состояние, поведение и контекст в реальном времени через интеграцию данных, подчеркивает эту динамическую природу [2]. Принципиальное отличие от простой BIM-модели или симуляции заключается в установлении двусторонней связи: цифровой двойник не только получает данные от физического актива, но и может использоваться для моделирования различных сценариев, результаты которых применяются для оптимизации реального объекта. Таким образом, эволюция заключается в переходе от цифрового «слепка», фиксирующего состояние на определенный момент, к активному, постоянно обновляемому

и способному к прогнозированию виртуальному партнеру, сопровождающему объект на всех этапах его существования.

## 1.2. Ключевые компоненты: физический объект, виртуальная модель, данные, соединяющие их, и аналитические сервисы.

Архитектура цифрового двойника базируется на четырех взаимосвязанных и критически важных компонентах, образующих целостную систему. Первым компонентом является физический объект или система в реальном мире, будь то станок, здание или целое общественное пространство, оснащенные сетью датчиков, исполнительных механизмов и других источников данных. Второй компонент — это его виртуальная (цифровая) модель, которая может иметь различную степень детализации: от геометрического и информационного представления до сложных математических моделей, описывающих физические процессы, протекающие в объекте. Третий ключевой элемент — это данные и каналы связи, обеспечивающие постоянную синхронизацию между физической и виртуальной сущностями. Этот двусторонний поток включает в себя оперативные данные с сенсоров (данные состояния), исторические данные эксплуатации, а также управляющие команды и результаты моделирования, передаваемые от виртуальной модели к физическому объекту. Четвертым компонентом выступают аналитические сервисы и приложения, которые интерпретируют поступающие данные, запускают симуляции, выявляют аномалии и генерируют insights для поддержки принятия решений [2]. Именно аналитика, часто основанная на алгоритмах искусственного интеллекта, превращает сырье данные в практическую ценность, позволяя, например, прогнозировать износ элементов инфраструктуры или оптимизировать энергопотребление. Взаимодействие этих компонентов создает замкнутый цикл «анализ-моделирование-воздействие», что и составляет суть управления через цифрового двойника.

### 1.3. Опыт применения в промышленности (Industry 4.0) и перспективы в градостроительстве (Smart City).

Наиболее продвинутый опыт внедрения цифровых двойников накоплен в высокотехнологичных отраслях промышленности в рамках концепции «Индустря 4.0». Здесь они применяются для всего жизненного цикла продукции — от виртуального проектирования и испытаний прототипов до мониторинга работающих производственных линий и предиктивного обслуживания оборудования. Например, на заводе цифровой двойник может в реальном времени отображать статус каждой единицы техники, прогнозировать вероятность сбоя на основе анализа вибрации и температурных режимов, что позволяет минимизировать простои и планировать ремонты [2]. Этот промышленный опыт служит важным фундаментом для адаптации концепции к более сложным и открытым системам, таким как городская среда. В градостроительстве и управлении общественными пространствами цифровой двойник трансформируется в инструмент для интеграции чрезвычайно разнородных данных: о транспортных потоках, состоянии зеленых насаждений, коммунальных сетях, энергопотреблении, социальной активности и даже микроклимате. Как отмечается в исследованиях, городской цифровой двойник становится платформой для симуляции и оценки последствий планируемых изменений — от последствий новой застройки для инсоляции и ветровых потоков до моделирования пешеходных маршрутов при реорганизации площади [3]. Таким образом, перспектива заключается в переходе от управления отдельными активами к системному управлению динамической городской экосистемой, где общественные пространства выступают одним из ключевых объектов, а цифровой двойник обеспечивает необходимую прозрачность, аналитическую мощь и основу для участия граждан в соуправлении.

## 2. Анализ предметной области: общественное пространство как система

2.1. Декомпозиция общественного пространства на подсистемы: инженерная (дорожки, освещение), экологическая (деревья, газон), социальная (потоки людей, события).

Общественное пространство представляет собой сложную социотехническую систему, эффективное управление которой требует ее декомпозиции на ключевые взаимодействующие подсистемы. Инженерно-техническая подсистема включает в себя всю физическую инфраструктуру: дорожные покрытия, системы освещения, дренажа, орошения, малые архитектурные формы и элементы благоустройства. Мониторинг их состояния и целостности является критически важным для безопасности и бесперебойного функционирования [6]. Параллельно существует экологическая подсистема, объединяющая биологические компоненты: деревья, кустарники, газоны, цветники, а также связанные с ними параметры почвы и микроклимата. Ее устойчивость напрямую влияет на качество городской среды и комфорт пользователей. Наконец, социальная подсистема является наиболее динамичной и включает в себя паттерны поведения людей, потоки посетителей, проводимые мероприятия и формируемое общественное восприятие пространства. Именно социальный слой трансформирует технико-экологический каркас в наполненное смыслами место, а его учет позволяет проектировать и управлять пространством, ориентированным на человека [4]. Взаимовлияние этих подсистем — например, как проведение массового события (социальный аспект) влияет на нагрузку на покрытия (инженерный) и состояние зеленых насаждений (экологический) — и делает необходимым целостный, системный подход к управлению.

## 2.2. Участники жизненного цикла и их интересы: проектировщик, заказчик (администрация), подрядчик, эксплуатирующая служба, горожанин.

Жизненный цикл общественного пространства вовлекает разнообразных участников, чьи цели и интересы часто не совпадают, что создает вызовы для преемственности управления. Проектировщик (архитектор, инженер) заинтересован в реализации творческого замысла и соблюдении нормативов, оперируя в основном проектными данными и моделями. Заказчик в лице городской администрации фокусируется на соблюдении бюджета, сроков, достижении запланированных социально-экономических эффектов и минимизации будущих эксплуатационных расходов. Подрядчик, ответственный за строительство, нацелен на оптимизацию строительных процессов, логистики и себестоимости работ, что может вступать в противоречие с проектными деталями. Эксплуатирующая служба (или управляющая компания) заинтересована в долговечности, ремонтопригодности активов и низких операционных затратах, нуждаясь в полной и точной информации о введенном объекте. Ключевым, но часто пассивным на ранних этапах участником является конечный пользователь — горожанин, чьи интересы лежат в сферах безопасности, комфорта, функциональности и эстетики пространства [4]. Традиционная разрозненность информации между этими группами ведет к эффекту «потерь данных» при переходе от этапа к этапу, когда критически важные для эксплуатации сведения, заложенные в проекте, не доходят до служб, обслуживающих объект [5]. Цифровой двойник выступает инструментом для согласования этих интересов, предоставляя единую среду для взаимодействия.

### 2.3. Потоки данных на каждом этапе (геоданные, проектная документация, показания датчиков, обратная связь).

На каждом этапе жизненного цикла общественного пространства генерируются и потребляются специфические потоки данных, изолированность которых снижает эффективность управления в целом. На этапе проектирования ключевыми являются геопространственные данные местности, нормативные требования, цифровые проектные модели (BIM), содержащие геометрию, материалы и спецификации будущих объектов [5]. В фазе строительства к ним добавляются данные о ходе работ, поставках материалов, результатах лабораторных испытаний и исполнительной документации, фиксирующей отклонения от проекта. На этапе эксплуатации формируются наиболее интенсивные и динамичные потоки данных: показания датчиков IoT, отслеживающих нагрузку, износ, освещенность, влажность почвы, параметры микроклимата; данные систем видеонаблюдения для анализа посещаемости и потоков людей; а также структурированная и неструктурированная обратная связь от горожан через мобильные приложения и социальные сети [4]. Исторически эти потоки существуют в изолированных «силосах»: проектные модели редко используются эксплуатантами, а данные датчиков не интегрируются обратно в цифровую модель для семантического анализа. Концепция цифрового двойника предлагает подход к созданию единого информационного континуума, где данные каждого этапа не теряются, а накапливаются и обогащают виртуальную модель, превращая ее в централизованный и авторитетный источник информации об объекте на всем протяжении его существования [6]. Это позволяет, например, связать данные о деформации покрытия (эксплуатация) с конкретными узлами проектной модели и условиями строительства.

### 3. Моделирование архитектуры Digital Twin с использованием UML

Для формального описания сложной киберфизической системы, такой как цифровой двойник общественного пространства, необходим строгий и наглядный язык моделирования. UML (Unified Modeling Language) является отраслевым стандартом для визуализации, специфирования и документирования архитектуры программных систем. Его применение позволяет абстрагироваться от конкретных технологий реализации и сосредоточиться на логической структуре, ключевых компонентах, их взаимосвязях и функциональных возможностях системы. Моделирование с помощью UML обеспечивает однозначное понимание архитектуры цифрового двойника всеми участниками жизненного цикла — от системных архитекторов и разработчиков до конечных пользователей-менеджеров, что является критически важным для успешной интеграции такого решения в практику управления [5].

#### 3.1. Структурная модель (Диаграмма классов UML)

Структурная модель, представленная в виде диаграммы классов, определяет статический состав цифрового двойника. Ее ядром является класс PublicSpace, представляющий сам объект управления и обладающий атрибутами идентификатора, названия и площади. Этот класс агрегирует в себе компоненты двух основных типов: инженерные активы (EngineeringAsset) и экологические активы (GreenAsset), что отражает декомпозицию физического пространства на подсистемы. Классы Path (дорожка) и LightingFixture (светильник) наследуют от EngineeringAsset, а Tree (дерево) и Lawn (газон) — от GreenAsset, демонстрируя принцип наследования для спецификации общих свойств. Отдельно выделены классы данных: SensorData (для потоковых показаний датчиков),

MaintenanceLog (для журналов обслуживания) и UserFeedback (для обратной связи граждан). Функциональность системы инкапсулирована в классы-сервисы, такие как SimulationService (для выполнения прогнозных симуляций) и AlertService (для генерации уведомлений об аномалиях). Ассоциации между классами показывают, например, что PublicSpace связан с множеством объектов SensorData, а EngineeringAsset — с историей MaintenanceLog. Такая структура наглядно отображена на Рисунке 1 и представляет собой информационную модель двойника, являющуюся семантическим ядром, которое обеспечивает контекст для всех данных и операций [6].

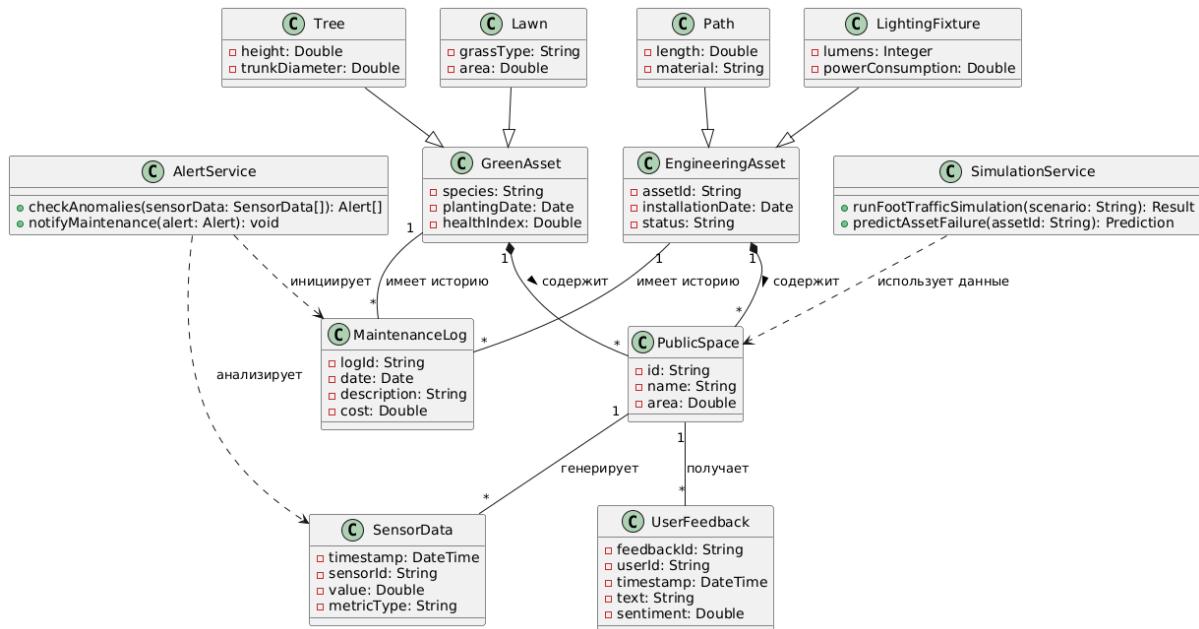


Рисунок 1. Диаграмма классов структурной модели Digital Twin общественного пространства

### 3.2. Функциональная модель (Диаграмма вариантов использования UML)

Функциональная модель, описываемая диаграммой вариантов использования, определяет, как различные категории пользователей (акторы) взаимодействуют с системой цифрового двойника для достижения своих целей. Ключевыми акторами являются MunicipalitySpecialist

(специалист муниципалитета, ответственный за планирование и развитие), MaintenanceService (эксплуатационная служба) и Citizen (гражданин). Специалист муниципалитета использует систему для моделирования пешеходных потоков (SimulateFootTraffic), прогнозирования отказов активов (PredictAssetFailure) и визуализации эволюции пространства в долгосрочной перспективе (VisualizeSpaceEvolution). Эксплуатационная служба применяет двойник для планирования технического обслуживания на основе данных прогнозов (PlanMaintenance). Гражданин взаимодействует с системой через интерфейс обратной связи, чтобы сообщить о проблеме (SubmitIssue). Взаимодействие акторов с системой показано на Рисунке 2. Данная диаграмма наглядно специфицирует внешние требования к системе и демонстрирует, как цифровой двойник служит единой платформой для поддержки решений на всех уровнях управления, реализуя принцип data-driven governance [4].

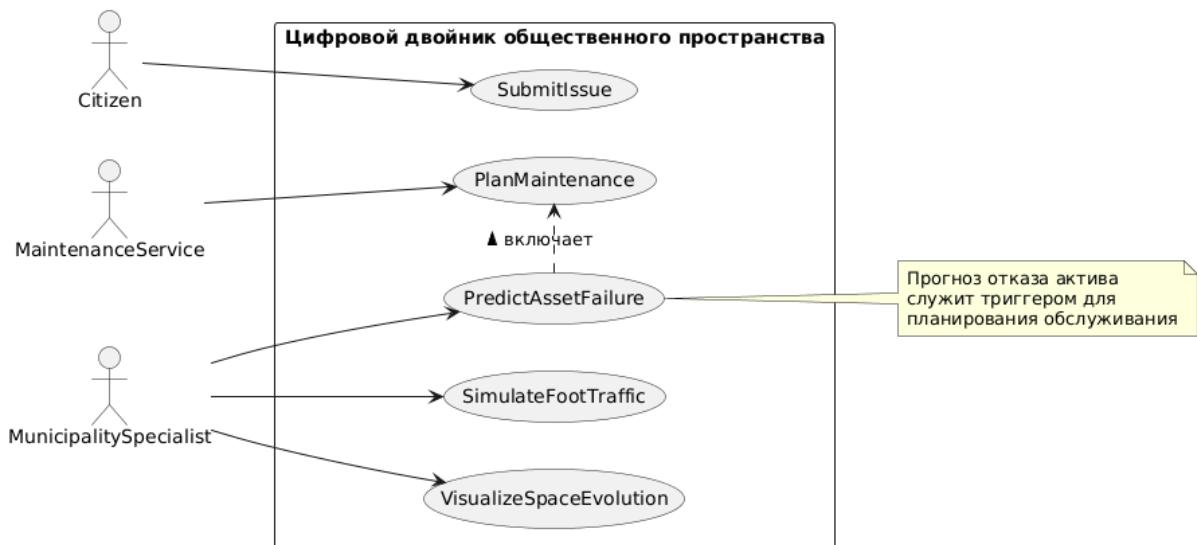


Рисунок 2. Диаграмма вариантов использования функциональной модели Digital Twin

Таким образом, предложенные UML-модели, представленные на Рисунках 1 и 2, формируют целостное и формализованное представление архитектуры цифрового двойника. Структурная диаграмма классов детализирует его информационную основу, а функциональная диаграмма

вариантов использования — интерфейс для взаимодействия с пользователями. В совокупности они служат чертежом для последующей разработки и внедрения системы, обеспечивая управление всем жизненным циклом общественного пространства на основе данных.

## 4. Практическая ценность и вызовы внедрения

4.1. Ожидаемые эффекты: предиктивное обслуживание, оптимизация бюджета, основанное на данных проектирование, вовлечение горожан.

Внедрение цифрового двойника сулит значительные практические эффекты на всех этапах жизненного цикла. Ключевым преимуществом является переход к предиктивному обслуживанию инженерных активов, когда аналитические сервисы на основе непрерывного мониторинга и исторических данных прогнозируют потенциальные отказы, позволяя планировать ремонты до наступления критических инцидентов, что снижает операционные риски и затраты [8]. Это напрямую ведет к оптимизации долгосрочного бюджета, так как расходы становятся планируемыми, а срок службы инфраструктуры — максимальным. На этапе проектирования и реконструкции цифровой двойник обеспечивает методологию *data-driven design*, позволяя тестировать различные сценарии в виртуальной среде и оценивать их последствия для всех подсистем до реализации, минимизируя ошибки [9]. Кроме того, платформа двойника может стать инструментом вовлечения горожан, предоставляя им наглядную информацию и каналы для обратной связи, что повышает легитимность управленческих решений и качество городской среды, как демонстрируют пилотные проекты [7].

4.2. Технологические и организационные барьеры: необходимость единых стандартов данных, вопросы кибербезопасности, изменение рабочих процессов.

Реализация концепции сопряжена с существенными барьерами. Технологическим фундаментом является необходимость создания единых семантических стандартов и открытых протоколов для интеграции разнородных данных от сенсоров, BIM-моделей и геоинформационных

систем, без чего невозможно построить целостную цифровую модель [9]. Одновременно остро встают вопросы кибербезопасности и защиты приватности, поскольку система аккумулирует огромные массивы данных о критической инфраструктуре и поведении людей, становясь потенциальной целью для атак [7]. Наиболее сложными зачастую оказываются организационные барьеры: внедрение требует преодоления ведомственной разобщенности, изменения устоявшихся рабочих процессов и развития новых компетенций у сотрудников муниципалитетов и эксплуатирующих организаций, что является длительным и сложным процессом трансформации [8].

#### 4.3. Примеры и кейсы (краткий обзор пилотных проектов в мире).

Мировой опыт демонстрирует разнообразие подходов к созданию цифровых двойников для городских территорий. Пилотный проект в Херренберге (Германия) был сфокусирован на вовлечении граждан: на основе 3D-модели города жители могли вносить предложения по планировке и визуализировать их последствия, что повысило прозрачность планировочных решений [7]. В Цюрихе цифровой двойник активно используется для задач градостроительного анализа, симуляции инсоляции и ветровых потоков, обеспечивая научную основу для оценки новых строительных проектов [9]. С точки зрения эксплуатации перспективным направлением являются специализированные двойники для мониторинга состояния конкретной инфраструктуры, где алгоритмы на основе данных с датчиков в реальном времени выявляют аномалии, предсказывая, например, необходимость ремонта дорожного покрытия или элементов мостов [8]. Эти примеры иллюстрируют путь от концепции к конкретным прикладным решениям.

## 5. Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать, что концепция цифрового двойника (Digital Twin) представляет собой логичный и необходимый следующий этап цифровизации городского хозяйства. Она обеспечивает переход от разрозненного управления отдельными объектами к целостному управлению сложными социотехническими системами, каковыми являются современные общественные пространства. Цифровой двойник выступает в роли интеграционной платформы, которая связывает в единый информационный континуум все этапы жизненного цикла — от проектирования и строительства до эксплуатации и модернизации, устранив проблему потерю данных и обеспечивая сквозную аналитику.

Критически важным первым шагом на пути практической реализации такой системы является ее формальное проектирование с использованием языков визуального моделирования, таких как UML. Разработанные в ходе работы структурная (Рисунок 1) и функциональная (Рисунок 2) модели наглядно демонстрируют состав, взаимосвязи компонентов и сценарии использования цифрового двойника. Это моделирование служит необходимым инструментом для достижения консенсуса между всеми участниками процесса — архитекторами, ИТ-специалистами, муниципальными управленцами и эксплуатантами, — закладывая четкий и однозначный фундамент для дальнейшей разработки.

Перспективы развития концепции лежат в области углубленной интеграции с технологиями интернета вещей (IoT) для сбора данных в реальном времени и методами искусственного интеллекта для сложного прогнозного моделирования. Это позволит эволюционировать от «цифровых отражений» к «когнитивным» городским пространствам, способным к адаптации, самооптимизации и проактивному взаимодействию с жителями. Преодоление технологических и

организационных барьеров, таких как стандартизация данных и кибербезопасность, открывает путь к созданию эффективных, устойчивых и ориентированных на человека общественных пространств будущего.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тао Ф., Чжан Х., Лю А., Ни А.Ю.С. Цифровой двойник в промышленности: современное состояние // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Т. 15, № 4. С. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8472816> (дата обращения: 07.01.2026).
2. Лю М., Фан С., Дун Х., Сюй Ц. Обзор концепций, технологий и промышленных применений цифровых двойников // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Т. 58. С. 346–361. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301181> (дата обращения: 07.01.2026).
3. Батти М. Цифровые двойники // Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 2018. Т. 45, № 5. С. 817–820. DOI: 10.1177/2399808318796416. [Электронный ресурс]. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/2399808318796416> (дата обращения: 07.01.2026).
4. Шахат Э., Хён Ч.Т., Ём Ч. Потенциал цифрового двойника города: обзор и повестка исследований // Sustainability. 2021. Т. 13, № 6. Ст. № 3386. DOI: 10.3390/su13063386. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3386> (дата обращения: 07.01.2026).
5. Боже К., Герреро А., Кубицки С., Резгуи Я. К семантическому цифровому двойнику в строительстве: направления будущих исследований // Automation in Construction. 2020. Т. 114. Ст. № 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179. [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519305726>

(дата обращения: 07.01.2026).

6. Пренолато М., Ганнер С., Воягаки Э. и др. Навстречу гражданскому строительству 4.0: концепция, рабочий процесс и применение цифровых двойников для существующей инфраструктуры // Automation in Construction. 2022. Т. 141. Ст. № 104421. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104421. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522002048> (дата обращения: 07.01.2026).
7. Дембски Ф., Весснер У., Летцгус М., Руддат М., Яму К. Городские цифровые двойники для умных городов и граждан: пример Херренберга, Германия // Sustainability. 2020. Т. 12, № 6. Ст. № 2307. DOI: 10.3390/su12062307. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/6/2307> (дата обращения: 07.01.2026).
8. Лу К., Се К., Парликад А.К., Скулинг Дж.М. Обнаружение аномалий на основе цифрового двойника для мониторинга строительных активов в эксплуатации и техническом обслуживании // Automation in Construction. 2020. Т. 118. Ст. № 103277. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103277. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519313170> (дата обращения: 07.01.2026).
9. Шроттер Г., Хюрцелер К. Цифровой двойник города Цюриха для городского планирования // PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2020. Т. 88, № 1. С. 99–112. DOI: 10.1007/s41064-020-00092-2. [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41064-020-00092-2> (дата обращения: 07.01.2026).