

Аннотация

В статье дан обзор современного состояния технологий создания цифровых двойников территорий с акцентом на геодезическое обеспечение и методы трёхмерного моделирования по состоянию на 2025–2026 гг. Структурно выделены три взаимосвязанных этапа жизненного цикла цифрового двойника: сбор пространственных данных (GNSS, лазерное сканирование, фотограмметрия, беспилотные авиационные системы), обработка и семантическая сегментация облаков точек (PointMamba, OpenUrban3D) и интеграция данных в единую среду (BIM/GIS, CityGML). Анализируются практические кейсы реализации цифровых двойников территорий: спортивно-туристический комплекс «Шерегеш», река Амур, проект Orbion по созданию глобального цифрового двойника Земли.

Ключевые слова: цифровой двойник территории, геодезическое обеспечение, лазерное сканирование, фотограмметрия, GNSS, облака точек, семантическая сегментация, BIM, GIS, CityGML.

1 Введение

Цифровой двойник территории представляет собой интегрированную динамическую модель, функционирование которой зависит от точности, актуальности и согласованности геодезических и картографических данных. К середине 2020-х годов технологии создания цифровых двойников достигли уровня, при котором стало возможным не только визуализировать рельеф и инфраструктуру, но и встраивать в модель данные с датчиков реального времени, а также выполнять сценарное прогнозирование и оптимизацию управленческих решений.

Цель настоящей работы — систематизировать современные подходы к геодезическому обеспечению цифровых двойников территорий и проанализировать ключевые методы трёхмерного моделирования, нашедшие практическое применение в строительстве, городском планировании, мониторинге окружающей среды и других сферах. В отличие от классического BIM (Building Information Modeling), ориентированного на этапы проектирования и строительства, цифровые двойники отражают текущее состояние инфраструктуры в реальном времени, что делает их востребованными как на этапе строительства, так и в процессе постстроительной эксплуатации и технического обслуживания.

2 Геодезическое обеспечение цифровых двойников территорий

2.1 Методы сбора пространственных данных

Создание цифрового двойника территории начинается с получения точных и актуальных геопро пространственных данных. Традиционные подходы к выполнению геодезических и картографических работ имеют ряд ограничений, связанных со статичностью результатов, фрагментарностью данных и недостаточной интеграцией с цифровыми управленческими платформами. На смену им приходят комплексы дистанционных методов, которые условно можно разделить на три категории (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнение основных методов геодезического обеспечения цифровых двойников территорий

Метод	Погрешность	Плотность данных	Преимущества	Ограничения
Наземное лазерное сканирование (TLS)	3–5 см	Высокая (млн точек/м²)	Фотореалистичность, точность под кронами	Медленное, высокая стоимость

Воздушное лазерное сканирование (ALS) 5–10 см Средняя–высокая Быстрый охват
больших территорий Ограниченная информация в плотной застройке

GNSS-съёмка (RTK/PPK) 1–5 см Точечная Высокая точность опорных пунктов Низкая
плотность, открытая местность

Цифровая аэрофотосъёмка 5–10 см Средняя Цветная текстура, малая стоимость
Зависимость от освещения, погоды

Мобильное лазерное сканирование (MLS) 1–10 см Высокая Обследование дорог и улиц, до
100 км/день Ограниченная дальность, необходимость опор

БПЛА-съёмка (фото/лидар) 5–15 см Высокая Гибкость, доступность, повторяемость
Зависимость от погоды, время полёта

Источники: данные обобщены по результатам работы.

Фотограмметрия обеспечивает получение цифровой модели объекта с погрешностью
порядка 5–10 см, а лазерное сканирование — около 3–5 см, что недостижимо при ручных
измерениях. Однако каждый метод имеет свои сильные стороны: лазерное сканирование
достовернее воспроизводит рельеф местности, в то время как фотограмметрия даёт
цветную текстурированную модель.

2.2 Системы глобального позиционирования и опорные сети

Фундаментом геодезического обеспечения служат высокоточные GNSS-приёмники и
дифференциальные поправочные сети. Исследования, проведённые в рамках подготовки к
FIG Congress 2026, показали, что аэрофотосъёмка с использованием DGNS-управляемых
беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) обеспечивает горизонтальную точность 5–10
см и вертикальную 10–30 см, что достаточно для создания фундаментального цифрового

двойника территории. Такой подход особенно эффективен в регионах, где традиционная опорная сеть отсутствует или устарела.

2.3 Комплексные технологии сбора данных

Наиболее перспективным направлением становится комбинирование различных методов съёмки в рамках единого проекта. Разработаны подходы к построению цифровых моделей на основе объединения данных аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования, что позволяет достичь намного более высокой плотности точек по сравнению с традиционными наземными предпроектными изысканиями. Появляются также гибридные решения на стыке SLAM-сканирования, мобильного сканирования и воздушной фотограмметрии, обеспечивающие полноту, точность и экономическую эффективность.

3 Обработка облаков точек и семантическая сегментация

3.1 От облака точек к семантической модели

Исходное облако точек, полученное в результате лазерного сканирования или фотограмметрической обработки, представляет собой неструктурированный массив координат и интенсивностей. Для интеграции в цифровой двойник это облако необходимо преобразовать в семантически аннотированную 3D-модель — процесс, включающий сегментацию, классификацию и извлечение объектов.

Семантическая сегментация облаков точек является критически важной задачей для автономного вождения и приложений цифровых двойников. В 2025 году появились новые архитектуры глубокого обучения, специально предназначенные для работы с крупномасштабными городскими облаками точек. Сеть PointMamba, интегрирующая

модель пространства состояний с сериализацией облаков точек и методами извлечения признаков, продемонстрировала общую точность 93,94% и средний IoU 66,03% на наборе данных Toronto3D, превзойдя такие базовые методы, как PointNet++ и PointNet.

Ещё более радикальным шагом вперёд стала разработка OpenUrban3D — первой платформы для открытой семантической сегментации крупномасштабных городских облаков точек без необходимости вручную аннотировать обучающие данные. OpenUrban3D использует предварительно обученные модели визуально-языкового представления и позволяет распознавать ранее не встречавшиеся категории объектов, описываемые на естественном языке.

3.2 Извлечение транспортной инфраструктуры

Особое внимание уделяется автоматическому выделению дорожной сети из облаков точек мобильного лазерного сканирования. Разработанная методология, основанная на данных MLS и стандарте CityGML 3.0, позволяет сегментировать дорожное пространство на нескольких уровнях детализации: участки дорог, перекрёстки, тротуары, парковочные зоны и отдельные полосы движения. Валидация метода на двух городских сетях (Сантьяго-де-Компостела и Мадрид) длиной 2 км каждая дала средние значения IoU 0,85 и 0,83 для дорожных объектов, а для парковочных зон — 0,9 IoU.

3.3 Обнаружение изменений и обновление моделей

Цифровой двойник территории должен оставаться актуальным во времени, что требует автоматического обнаружения изменений. Подходы, основанные на семантической сегментации облаков точек LiDAR, позволяют эффективно выявлять трёхмерные изменения в городских и железнодорожных средах, обновлять цифровые двойники и интегрировать обновлённые данные в 3D-географические информационные системы.

Повышение уровня детализации (LoD) моделей также автоматизируется: разработан автоматизированный workflow для обогащения существующих моделей LoD2 до LoD3 путём интеграции аэрофотосъёмки LiDAR, данных мобильного картографирования и моделей «нулевого обучения» на основе визуально-языковых сетей.

4 Интеграция BIM и GIS в единую среду цифрового двойника

4.1 Геометрическая и семантическая интеграция

Одной из фундаментальных проблем создания городских цифровых двойников является совмещение детализированной геометрии зданий из BIM с широкомасштабными пространственными данными из GIS. Общий подход заключается в использовании информации о зданиях внутри GIS-платформ.

В 2025 году предложен масштабируемый метод всесторонней BIM/GIS-интеграции, решающий как геометрические, так и семантические задачи. Геометрическая часть workflow преобразует твёрдотельные BIM-модели в валидные упрощённые представления CityGML путём поэлементного обнаружения строительных компонентов и экстракции внешних поверхностей. Для сохранения семантического богатства все сущности, атрибуты и взаимосвязи — включая неявные связи — автоматически извлекаются и сохраняются в графовой базе данных Labeled Property Graph. Метод дополняется новым расширением предметной области CityGML (ADE), поддерживающим многоуровневые представления LoD4 и позволяющим селективную визуализацию интерьеров при сохранении эффективности рендеринга.

4.2 Технологии визуализации и анализа

Наиболее зрелые реализации BIM/GIS-интеграции используют платформы типа Cesium для объединения микроуровня зданий и макроуровня пространственной динамики всего города. Библиотека Cesium JS и фреймворк 3D Tiles разбивают BIM-данные на слои, которые загружаются быстро и только по мере необходимости, обеспечивая высокую производительность даже для городских датасетов.

Исследования также демонстрируют создание динамических BIM/GIS-интеграций, обеспечивающих двунаправленный обмен данными между средами для геотехнического проектирования инфраструктуры.

5 Моделирование и практическая реализация

5.1 Моделирование «Что, если?» и сценарный анализ

Цифровой двойник становится полноценным инструментом поддержки принятия решений только тогда, когда в него встроены вычислительные модели, позволяющие анализировать сценарии развития территории. Модели и симуляции лежат в основе этой задачи: они позволяют выполнять сценарное моделирование «Что, если?», выявлять взаимосвязи между потоками данных и генерировать представления о сложных городских системах.

В 2025 году развёрнут проект EDiT-Cities, в котором высококачественная информация о климате и качестве воздуха привязывается к городскому цифровому двойнику. Проект направлен на усиление потенциала цифровых двойников в городском планировании, контроле загрязнения воздуха, связанного с транспортом, и управлении качеством воздуха и здоровьем населения.

В практике российских разработок платформа Центра геопространственных решений Университета Иннополис позволяет автоматизировать управление жилой и коммерческой недвижимостью, транспортом, освещением и озеленением, а также моделировать нагрузку на городскую инфраструктуру. В цифровой двойник интегрируются данные из различных городских систем — кадастра, ЖКХ, датчиков инженерных сетей, экологического мониторинга.

5.2 Практические примеры реализации

Кейс 1. Спортивно-туристический комплекс «Шерегеш». Построение цифрового двойника территории планируемого развития спортивно-туристического комплекса «Шерегеш» показало, что на основе комбинирования аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования достигается более высокая плотность точек и достоверность рельефа, что позволяет принимать оптимальные проектные решения и исключать конфликты между участниками строительства.

Кейс 2. Цифровой двойник реки Амур. Команда Тихоокеанского государственного университета при поддержке гранта РНФ создаёт высокоточную виртуальную модель реки Амур, объединяющую данные аэрофотосъёмки с БПЛА «Геоскан-401» (2024–2025), съёмки лидаром, строящим трёхмерное облако точек, мультиспектральной камеры для анализа почвы и растительности, а также подводной съёмки с помощью надводного аппарата (санабота) в 2026 году. Разработаны нейросетевые модели для распознавания водной поверхности и прибрежных объектов, созданы алгоритмы прогнозирования смещения береговой линии. Применение цифрового двойника позволит улучшить прогнозирование паводков и минимизировать угрозы деградации окружающей среды.

Кейс 3. Городской цифровой двойник Казани. К 2025 году завершилось создание цифрового двойника Казани, 3D-модель города создавалась на протяжении предшествующих лет с привлечением данных аэрофотосъёмки, лазерного сканирования и наземных изысканий.

Кейс 4. Global digital twin — проект Orbion. Совместный проект компаний Aechelon, Niantic Spatial, ICEYE, BlackSky и Distance Technologies по созданию глобального цифрового двойника Земли в реальном времени на основе спутниковых снимков, радиолокационных данных, видеограмметрии и синтетических данных, генерируемых ИИ.

5.3 Перспективные направления

Систематический обзор 548 исследований 2025 года выявил два основных направления развития цифровых двойников городов: модели, фреймворки и инструменты для разработки, а также стратегии управления данными для эффективной реализации. Исследование указывает на сохраняющиеся пробелы в области стандартизации, управления, интероперабельности и двунаправленного потока данных между цифровой копией и физическим объектом, а также на необходимость дальнейших эмпирических исследований в развивающихся странах.

Ещё одно перспективное направление — создание открытых городских модельных платформ, которые могут функционировать как публичный технологический фундамент для моделирования и симуляции в городских цифровых двойниках и как социально-техническая рамка для коллаборативного и множественного представления городских процессов.

6 Заключение

Цифровые двойники территорий — это не просто трёхмерные карты, а интегрированные динамические информационные системы, объединяющие геодезические измерения, спутниковую съёмку, данные интернета вещей и вычислительные модели. Ключевым

фактором их успеха остаётся качество и актуальность исходных геопространственных данных. Развитие технологий лазерного сканирования, фотограмметрии, GNSS и семантической сегментации облаков точек привело к тому, что создание высокоточных моделей территорий перестало быть исключительной прерогативой крупных геодезических компаний и стало доступным для широкого круга проектов.

Однако остаются серьёзные вызовы: стандартизация форматов данных (CityGML, CityJSON), обеспечение интероперабельности между BIM и GIS, создание механизмов автоматического обновления моделей при изменениях на местности, а также разработка открытых платформ, позволяющих подключать внешние сервисы и модели. Решение этих задач будет определять темпы внедрения цифровых двойников в практику территориального управления, градостроительства и мониторинга окружающей среды в ближайшие годы. Цифровой двойник из технологической инновации превращается в необходимый инструмент управления территориальным развитием, однако его полноценное использование требует не только технологических решений, но и управленческой трансформации с участием всех заинтересованных сторон на всех этапах жизненного цикла модели.

Список литературы

1. Радзінська Ю. Б., Нестеренко С. Г., Доброходова О. В. Геодезичне і картографічне забезпечення цифрових двійників територій // Вісник Харківського національного університету міського господарства. — 2026. — № 1(196). — С. 232–241. DOI: 10.33042/3083-6727-2026-1-196-232-241
2. Abrams M., Heimann C., Stephanus M. Data Curation and Data Sovereignty for Global Digital Twins: A Methodological Framework for Accuracy Validation Using National DGNSS-Enabled Drone Programmes // FIG Congress 2026, Cape Town, South Africa. — 2026.
3. Создание цифровых моделей для комплексного развития территорий на основе комбинирования разных видов съемки (на примере спортивно-туристического комплекса

«Шереш»). — Геоскан, 2025.

4. Цифровой двойник Амура появится в Хабаровском крае в 2026 году. — News.mail.ru, 2026.

5. Современные методы сканирования зданий и сооружений в РФ. — Наука.ру, 2025. DOI: 10.0000/CP0015

6. Tsiranidou E., González-Cabaleiro P., Fernández A., Díaz-Vilariño L. A framework for road space extraction from point clouds and integration into 3D city models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. — 2025. — Vol. 144. — P. 104956. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104956

7. Urban-Scale Semantic Segmentation Using PointMamba and Mobile Laser Scanning Point Clouds // ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2025. — Vol. 7. — P. 16. DOI: 10.5194/ica-proc-7-16-2025

8. An Effective Approach to Geometric and Semantic BIM/GIS Data Integration for Urban Digital Twin // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2025. — Vol. 14(12). — P. 478. DOI: 10.3390/ijgi14120478

9. Exploring the Methodologies for Developing City Digital Twin for Sustainable Smart Cities: A Thematic Analysis // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2025. — Vol. X-5/W2-2025. — P. 235–243. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-5-W2-2025-235-2025

10. Herzog R. H., et al. The Urban Model Platform: A Public Backbone for Modeling and Simulation in Urban Digital Twins. — arXiv:2506.10964, 2025.

11. Иннополис разработал платформу для создания цифровых двойников городов // Компьютерра. — 2026.

12. Balaska V., Papapetros I. T., Oikonomou K. M., Bampis L., Gasteratos A. UAV Object Detection and Positioning in a Mining Industrial Metaverse with Custom Geo-Referenced Data. — arXiv:2506.13505, 2025.

13. Ward-Foxton S. Project Aims To Make Real-Time Digital Twin Of The World // EE Times. — 2025.

14. Aerial Solutions for Construction Monitoring: Drones, Digital Twins, and the Future of Smart Building Oversight // GNSS.AE, 2025.

15. Digital Twin for Advanced and Continuous Monitoring of Infrastructure Assets Using Remote Sensing and Non-Destructive Testing. — SciProfiles, 2025.