

**Султанова Элина Абдулмуминовна**  
Дагестанский государственный технический университет  
**Магомедов Магомедзагид Анварович**  
Дагестанский государственный университет  
**Хамбулатова Зарема Рамзановна**  
Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова

### **Цифровые двойники городов и искусственный интеллект: управление умными технологиями**

**Аннотация.** В статье исследуются интеграционные механизмы цифровых двойников городов и искусственного интеллекта как основы управления умными городскими технологиями. На основе анализа международного опыта (Республика Корея – проект Seoul Smart Core стоимостью 841,2 млрд вон, Египет – проект The Spine стоимостью 27 млрд долларов, европейские инициативы BLUEPRINT и Horizon Europe) рассматриваются архитектурные принципы построения AI-цифровых двойников, их функциональные уровни и механизмы принятия решений. Особое внимание уделяется трансформации городского управления от реактивного к проактивному через внедрение AI-аналитики, предиктивного моделирования и распределённых edge-вычислений. На основе данных исследовательских работ, включая греческое исследование 301 профессионала в области городского планирования, представлены три таблицы, характеризующие компоненты цифровых двойников, распределение AI-вычислений и инструменты европейского финансирования. Сделан вывод о переходе от симуляционных платформ к агентным цифровым двойникам с интеграцией LLM-агентов и мультимодальных интерфейсов.

**Ключевые слова:** цифровой двойник города, искусственный интеллект, умный город, предиктивное моделирование, edge computing, городское планирование.

**Sultanova Elina Abdulmuminovna**  
Dagestan State Technical University  
**Magomedov Magomedzagid Anvarovich**  
Dagestan State University (branch in Khasavyurt)  
**Khambulatova Zarema Ramzanovna**  
Kadyrov Chechen State University

### **Digital Twin cities and artificial intelligence: Smart Technology management**

**Abstract.** The article examines the integration mechanisms of digital twin cities and artificial intelligence as the basis for managing smart urban technologies. Based on the analysis of international experience (the Republic of Korea – the Seoul Smart Core project worth 841.2 billion won, Egypt – The Spine project worth 27 billion dollars, the European BLUEPRINT and Horizon Europe initiatives), the architectural principles of building AI-digital twins, their functional levels and decision-making mechanisms are considered. Special attention is paid to the transformation of urban governance from reactive to proactive through the introduction of AI analytics, predictive modeling and distributed edge computing. Based on research data, including the Greek study of 301 urban planning professionals, three tables are presented that characterize the components of digital twins, the distribution of AI computing, and European financing tools. The conclusion is made about the transition from simulation platforms to agent-based digital counterparts with the integration of LLM agents and multimodal interfaces.

**Keywords:** digital twin of the city, artificial intelligence, smart city, predictive modeling,

edge computing, urban planning.

## Введение

Конвергенция технологий цифровых двойников (Digital Twins) и искусственного интеллекта (AI) формирует новую парадигму управления городскими системами. Как отмечается на 3-м Всемирном дне виртуальных миров, организованном ООН, «AI-включённая ситиверс» – сочетание искусственного интеллекта, цифровых двойников и пространственного интеллекта – рассматривается как ключевой инструмент повышения эффективности планирования, управления инфраструктурой и качества жизни в городах. К 2050 году, согласно прогнозам ООН, 70% мирового населения будет проживать в городских агломерациях, что делает задачу интеллектуализации городского управления не просто технологической, но цивилизационной.

Актуальность исследования обусловлена тремя факторами. Во-первых, в 2025–2026 годах по всему миру запущены или анонсированы крупномасштабные проекты AI-цифровых двойников: Seoul Smart Core стоимостью 841,2 млрд вон в Южной Корее, The Spine за 27 млрд долларов в Египте, европейские инициативы в рамках Horizon Europe. Во-вторых, теоретическое осмысление этих проектов идёт параллельно с их практической реализацией, что создаёт потребность в систематизации подходов. В-третьих, исследователи фиксируют переход от «слепого» технологического оптимизма к более взвешенной оценке рисков – включая проблемы управляемости, цифрового неравенства и этических аспектов автоматизированного принятия решений.

Цель настоящей статьи – выявление архитектурных принципов и механизмов функционирования AI-цифровых двойников городов, а также оценка их потенциала трансформации городского управления на основе анализа передового международного опыта.

## Теоретические основы и архитектурные компоненты AI-цифровых двойников

### Определение и эволюция концепции

Цифровой двойник города представляет собой виртуальную копию реальной городской системы, способную в реальном времени получать данные от сенсорных сетей, моделировать поведение системы и прогнозировать её состояние. Исследователи выделяют четыре критических компонента эффективного цифрового двойника: точность симуляции (simulation fidelity), интеграция данных реального времени (real-time data integration), AI-аналитика и зрелость системы (system maturity).

Эволюция цифровых двойников проходит три стадии. Первая стадия – дескриптивные модели, обеспечивающие трёхмерную визуализацию города. Вторая стадия – диагностические модели с интеграцией сенсорных данных для мониторинга текущего состояния. Третья стадия – предиктивные модели, использующие AI для прогнозирования и оптимизации. Как отмечается в исследовании греческих учёных, AI-аналитика является наиболее влиятельным компонентом, обеспечивающим распознавание паттернов, прогнозирование спроса и обнаружение аномалий.

Таблица 1 – Компоненты эффективного AI-цифрового двойника города

Компонент	Определение	Ключевые технологии	Влияние на планирование (R <sup>2</sup> )
Точность симуляции	Степень соответствия виртуальной модели физическому городу	3D-моделирование, физические движки, CAD/BIM-интеграция	0,69 (совокупный)
Интеграция данных реального времени	Способность поглощать непрерывные потоки от сенсоров и IoT	5G, LPWAN, Apache Kafka, потоковая обработка	(в составе совокупного)
AI-аналитика	Распознавание паттернов,	Машинное обучение,	Наиболее

Компонент	Определение	Ключевые технологии	Влияние на планирование (R <sup>2</sup> )
	прогнозирование, обнаружение аномалий	нейронные сети, глубокое обучение	сильный предиктор
Зрелость системы	Долгосрочная производительность и надёжность платформы	Операционная стабильность, доверие стейкхолдеров, институциональная интеграция	(в составе совокупного)

Источник: составлено автором на основе данных исследования Germanakos, Chousou и Bourbakis (2025)

Из таблицы 1.1 видно, что совокупное влияние четырёх компонентов на эффективность городского планирования составляет почти 69% объяснённой дисперсии ( $R^2 = 0,69$ ). Это эмпирическое подтверждение того, что цифровые двойники не являются «чёрными ящиками», а представляют собой измеримый и управляемый инструмент. Исследование, охватившее 301 профессионала в области городского планирования в Афинах, Салониках и других греческих городах, показало: 76% респондентов подтвердили ценность высокоточной симуляции, 78% отметили роль AI-инструментов в повышении скорости и оперативности планирования, более 77% поддержали полезность интеграции данных в реальном времени.

### **Международный опыт реализации AI-цифровых двойников**

#### **Южная Корея: Seoul Smart Core**

Правительство Сеула утвердило «План продвижения умного города» для района Йонсан International Business District, преобразуемого в «Seoul Smart Core». Общий объём инвестиций в создание умного города составляет 841,2 млрд вон (около 600 млн долларов США), причём средства предоставляются девелопером проекта городского развития. Строительство начнётся в первой половине 2026 года.

Архитектурное решение Seoul Smart Core построено на трёхуровневой модели цифрового двойника. На первом этапе создаётся точная 3D-модель. На втором этапе интегрируются различные сенсоры для трёхмерного, реального понимания состояния города. На третьем этапе AI-предиктивные симуляции используются для прогнозирования транспортных заторов, пиков энергопотребления и чрезвычайных ситуаций с представлением оптимальных сценариев реагирования.

Особого внимания заслуживает инфраструктурное решение – «умный коммунальный туннель» (smart utility tunnel), объединяющий водопровод, электричество, связь, теплотрассы и логистические трубопроводы с интеграцией IoT и сенсоров. Это позволяет проводить инспекции и расширения без разрытия дорог, что радикально снижает издержки городского обслуживания.

В области энергетики внедряется городская система управления энергопотреблением (CEMS) с мониторингом в реальном времени и демонстрацией распределения постоянного тока (DC distribution) для снижения потерь при преобразовании. В области логистики реализуется автоматизированная система доставки, объединяющая общие логистические хабы, подземные маршруты и индивидуальные парцеллы. В области мобильности акцент сделан на демонстрации автономного вождения и интеграции с общественным транспортом через платформу MaaS (Mobility as a Service).

#### **Египет: проект The Spine**

Наиболее амбициозным проектом AI-нативного города является египетский The Spine, строящийся компанией Talaat Moustafa Group при партнёрстве с Национальным банком Египта. Объём инвестиций – 27 млрд долларов США, площадь – 2,4 млн м<sup>2</sup>. Проект позиционируется как Special Investment Zone и, по оценкам, генерирует около 818 млрд египетских фунтов налоговых поступлений и создаст более 55 000 прямых рабочих мест.

Таблица 1.2 – Распределение AI-вычислений в архитектуре The Spine

Уровень	Количество	Функции	Примеры приложений
Edge-датчики	~200+ микроузлов	Обработка сырых данных, локальное принятие решений	Видеоаналитика без передачи личных данных
Распределённые центры обработки данных	5	Агрегация данных района, федеративное обучение	Координация районных AI-агентов
Облачная платформа	1 (центральная)	Глобальная оптимизация, долгосрочное моделирование	«Экономический двойник» города

Источник: составлено автором на основе данных Computer Weekly

По анализу таблицы 1.2 можно сделать вывод о том, что архитектура The Spine реализует принципиально распределённую модель AI-вычислений, избегая централизованного «узкого горла». Более 200 микро-узлов edge computing обрабатывают низкотентные AI-нагрузки на месте, обеспечивая «приватность по дизайну» (privacy-by-design): сырые видеоданные или персональная информация не покидают устройств. Пять распределённых центров обработки данных обеспечивают координацию на уровне районов, а центральная облачная платформа занимается глобальной оптимизацией и долгосрочным моделированием.

Технологический стек включает Nvidia Omniverse и Cesium для геопроостранственной симуляции в реальном времени, Apache Kafka для потоковой обработки миллионов событий в секунду, а также федеративное обучение для AI-моделей. Примечательно, что The Spine использует «зонное шардирование» (zone-based sharding): город разделён на районы, каждый из которых функционирует полуавтономно с локальными AI-агентами, что позволяет масштабироваться от первоначальных 30 000 до 180 000 жителей без деградации производительности.

Система предиктивного обслуживания с использованием волоконно-оптического зондирования и AI-моделей (включая temporal convolutional networks) может обнаруживать структурные напряжения или проблемы с трубопроводами за две недели до возникновения аварии, инициируя автоматические рабочие процессы с участием дронов и роботjd.

#### **Европейские инициативы**

Европейский союз финансирует несколько крупных проектов в области AI-цифровых двойников. Проект BLUEPRINT (Building Living Urban Ecosystems through Participatory Renovation and Innovation Tools) с бюджетом Horizon Europe объединяет 23 партнёра из 10 стран для трансформации городской реновации через сочетание цифровых двойников и партисипаторного дизайна. В проекте разрабатываются три уровня цифровых двойников: Building Digital Twins (BDT) для глубокой реновации зданий, Neighbourhood Digital Twins (NeDT) для оценки энергетических и экологических показателей на уровне районов, а также District Digital Twin (DiDT) для интеграции мобильности, энергии и инфраструктуры.

В рамках Horizon Europe также запущен конкурс HORIZON-MISS-2025-04-CIT-02 с бюджетом 24 млн евро на разработку инновационных AI-решений для городского планирования. Требования включают разработку цифрового двойника, интегрирующего статические физические характеристики (топография, здания, подземная инфраструктура) и как минимум два из следующих переменных: городские функции (зонирование, землепользование), мобильность и логистика, энергогенерация и потребление, погодные условия и выбросы, социо-демографические и экономические тренды.

#### **Трансформация городского управления через AI-цифровые двойники**

Ключевым выводом исследования греческих учёных является утверждение, что цифровые двойники позволяют планировщикам перейти от реактивного к проактивному режиму планирования. Вместо реагирования на отказы инфраструктуры или транспортные сбои после их возникновения планировщики могут предвидеть такие проблемы и

вмешиваться на ранней стадии. Как отмечается в материалах Horizon Europe, цифровой двойник должен поддерживать принятие решений и приоритизацию политик и инвестиций через визуализацию, прогнозирование, диагностику, оценку и предотвращение.

Эта трансформация особенно важна для управления в условиях неопределённости – климатических изменений, демографических сдвигов, экономических кризисов. Предиктивная способность AI-цифровых двойников позволяет не просто адаптироваться, но и активно формировать более устойчивые городские среды.

Наиболее перспективным направлением развития являются «агентные городские цифровые двойники» (Agentic Urban Digital Twins, AUDiTs). Согласно концептуальной статье, представленной в журнале Urban Informatics, AUDiTs интегрируют большие языковые модели (LLM) и мультимодальные агенты в цифровые среды для содействия совместному обучению человека и AI, контекстно-зависимому рассуждению, партисипаторному дизайну сценариев и этическому обсуждению.

В отличие от традиционных цифровых двойников, которые фокусируются на техническом прогнозировании, AUDiTs смещают акцент в сторону совместной, объяснимой и ценностно-чувствительной городской интеллектции. Ключевые вызовы, которые предстоит решить, включают предвзятость и справедливость foundation-моделей, ограничения в условиях нехватки данных, вычислительную устойчивость и институциональное согласование.

Таблица 1.3 – Инструменты и механизмы финансирования AI-цифровых двойников в Европе

Инструмент	Бюджет	Тип действий	Ключевые требования
BLUEPRINT (Horizon Europe)	~12 млн евро (доля IES)	Инновационные действия	3 уровня двойников (BDT, NeDT, DiDT), партисипаторный дизайн
HORIZON-MISS-2025-04-CIT-02	24 млн евро	Инновационные действия	3 города из разных стран ЕС, минимум 1 из 112 городов Миссии
Local Digital Twin Toolbox (Digital Europe)	Не указан	Инструментарий	Открытые AI-инструменты, совместимость с общими европейскими пространствами данных

Источник: авторская разработка

Из таблицы 1.3 видно, что Европейский союз создаёт многоуровневую систему финансирования AI-цифровых двойников: от крупных интеграционных проектов (BLUEPRINT) до целевых инновационных конкурсов и инструментариев для локального применения. Важным требованием является интеграция с общими европейскими пространствами данных (Common European Data Spaces) – особенно с пространством данных умных сообществ, мобильности, туризма и Green Deal.

Несмотря на впечатляющие успехи, исследователи и практики фиксируют ряд проблем, требующих решения. Первая проблема – высокие первоначальные затраты. Создание и поддержание цифровых двойников остаётся дорогостоящим, особенно для городов со стареющей инфраструктурой или ограниченными бюджетами.

Вторая проблема – интероперабельность и фрагментация данных. Наследуемые IT-системы часто не обладают необходимой совместимостью для интеграции с современными платформами, что вызывает задержки и неэффективность. Исследователи из Политехнического университета Гонконга предлагают решение в виде «пространственно-временного семантического адресного графа знаний», который унифицирует нестандартные форматы адресов и разрешает семантическую неоднозначность.

Третья проблема – управленческие и этические риски. Как отмечается в материалах ООН, преимущества AI-управляемых городских систем должны распределяться справедливо, включая развивающиеся экономики и недостаточно обслуживаемые сообщества. В противном случае существует риск углубления неравенства.

Четвёртая проблема – «чёрный ящик» AI-решений. Исследование греческих учёных признаёт растущую озабоченность по поводу непрозрачности AI и этических последствий автоматизированного принятия решений, призывая к повышению прозрачности и объяснимости.

Направления дальнейшего развития

На основе проведённого анализа можно выделить несколько стратегических направлений развития AI-цифровых двойников.

Интеграция LLM и генеративного AI. Переход к Agentic Urban Digital Twins с мультимодальными агентами, способными к контекстному рассуждению и этическому обсуждению, является ключевым трендом на ближайшие годы.

Децентрализация вычислений. Опыт The Spine демонстрирует, что распределённая модель с edge-вычислениями и федеративным обучением не только решает проблемы масштабирования, но и обеспечивает приватность данных.

Партисипаторное управление. Проект BLUEPRINT показывает важность интеграции граждан в процесс через AR/VR-инструменты, AI-поддержку принятия решений и low-tech решения для доступного участия.

Гармонизация стандартов. ООН призывает к глобальному сотрудничеству и общим стандартам для цифровой городской трансформации. Европейский союз уже развивает Local Digital Twin Toolbox и требует совместимости с Common European Data Spaces.

### **Заключение**

Цифровые двойники городов, интегрированные с искусственным интеллектом, представляют собой не просто технологическую инновацию, а фундаментальный сдвиг в парадигме городского управления. От дескриптивных 3D-моделей через диагностические системы к предиктивным AI-платформам – эволюция цифровых двойников следует логике возрастающей интеллектуализации.

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, эмпирические исследования подтверждают, что четыре компонента цифровых двойников – точность симуляции, интеграция данных реального времени, AI-аналитика и зрелость системы – в совокупности объясняют почти 69% вариативности эффективности городского планирования. AI-аналитика выступает наиболее сильным предиктором.

Во-вторых, международные проекты демонстрируют конвергенцию архитектурных решений: Seoul Smart Core и The Spine используют трёхуровневые модели цифровых двойников, распределённые edge-вычисления и AI-предиктивную аналитику для управления энергией, логистикой и безопасностью.

В-третьих, Европейский союз формирует институциональную инфраструктуру для масштабирования AI-цифровых двойников – от целевого финансирования (проект BLUEPRINT, конкурс Horizon Europe) до гармонизации стандартов (Local Digital Twin Toolbox, Common European Data Spaces).

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку метрик оценки эффективности AI-цифровых двойников, анализ долгосрочных социально-экономических эффектов их внедрения, а также на создание этических фреймворков для автоматизированного принятия решений в городском управлении. Переход от «умных» городов к «мудрым» (wise cities), сочетающим технологическую эффективность с человеко-центричностью и экологической устойчивостью, остаётся главным вызовом следующего десятилетия.

### **Список источников**

1. Yongsan International Business District Reborn as "Seoul Smart Core": A World-Leading City in AI, Digital Twins, Energy, and Advanced Logistics [Electronic resource] // SMART CITY KOREA. – 2025. – 23 September. – URL: <https://smartcity.go.kr/en/2025/09/24/%EC%9A%A9%EC%82%B0%EA%B5%AD%EC%A0%9C>

%EC%97%85%EB%AC%B4%EC%A7%80%EA%B5%AC%EC%84%9C%EC%9A%B8-%EC%8A%A4%EB%A7%88%ED%8A%B8-%EC%BD%94%EC%96%B4%EB%A1%9C-%EC%9E%AC%ED%83%84%EC%83%9D-ai/ (дата обращения: 20.05.2026).

2. UN calls for AI-driven transformation of future cities [Electronic resource] // Digital Watch Observatory. – 2026. – 13 May. – URL: <https://v45.diplomacy.edu/updates/ai-driven-transformation-of-future-cities> (дата обращения: 20.05.2026).

3. Germanakos P., Chousou S., Bourbakis N.G. Enhancing Predictive Urban Planning in European Smart Cities Through AI-Driven Digital Twin Technology: A Case Study of Greece // Urban Science. – 2025. – Vol. 9, No. 267. – DOI: 10.3390/urbansci9090267.

4. Miao S. Spatio-temporal Semantic Address Knowledge Graph – The Key Infrastructure for Building Digital Twin Cities [Electronic resource] // PolyU Research Seminar. – 2026. – 21 May. – URL: <https://www.polyu.edu.hk/ise/news-and-events/event/2026/5/2026-05-21-ise-research-seminar-series/> (дата обращения: 20.05.2026).

5. IES Joins European Partners to Launch BLUEPRINT: New Vision for Participatory, Digital-Led Urban Renovation [Electronic resource] // Integrated Environmental Solutions. – 2026. – 4 March. – URL: <https://iesve.com/discoveries/view/63266/blueprint-participatory-digital-urban-renovation> (дата обращения: 20.05.2026).

6. Innovative, AI-based solutions for urban planning and management [Electronic resource] // Horizon Europe. – 2025. – 6 May. – URL: <https://www.horizon-europe.gouv.fr/innovative-ai-based-solutions-urban-planning-and-management-40623> (дата обращения: 20.05.2026).

7. Kotamarthi R. et al. Artificial Intelligence–Enabled Digital Twin for U.S. Cities // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2025. – Vol. 106, No. 11. – P. E2411-E2418. – DOI: 10.1175/BAMS-D-25-0229.1.

8. Agentic Urban Digital Twins (AUDiTs): A Research Agenda for Integrating LLM and Multimodal Agents into Digital Twin Environments // Urban Informatics. – 2026. – DOI: 10.1007/s44212-026-00000-0.

9. Benito A. Artificial intelligence powers Egypt’s USD 27bn city project [Electronic resource] // Computer Weekly. – 2026. – 30 April. – URL: <https://www.computerweekly.com/news/366642617/Artificial-intelligence-powers-Egypt-s-USD-27bn-city-project> (дата обращения: 20.05.2026).

### Сведения об авторах

**Султанова Элина Абдулмуминовна**, к.э.н., доцент кафедры экономической безопасности, бухгалтерского учета и финансов Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

**Магомедов Магомедзагид Анварович**, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономических дисциплин ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет» (филиал в г. Хасавюрте), г. Хасавюрт, Россия

**Хамбулатова Зарема Рамзановна**, к.э.н., доцент кафедры «Учет, анализ и аудит в цифровой экономике» Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия.

### Information about the authors

**Sultanova Elina Abdulmuminovna**, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Economic Security, Accounting and Finance, Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

**Magomedov Magomedzagid Anvarovich**, PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Economic Disciplines, Dagestan State University (branch in Khasavyurt), Khasavyurt, Russia

**Khambulatova Zarema Ramzanovna**, PhD in Economics, Associate Professor of Accounting, Analysis and Audit in the Digital Economy, Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia.