

А. К. Ямилова^{1✉}, М. А. Губанищева¹, Е. И. Аврунев², Б. Г. Иргит¹

Цифровой двойник местности как инструмент управления зонами с особыми условиями использования территорий: развитие и перспективы внедрения

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: aliyakonstantinovna@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу перспектив внедрения цифровых двойников в сфере управления зонами с особыми условиями использования территорий. Рассмотрены теоретические основы понятия «цифровой двойник», его эволюция от первичных концепций до современного этапа. Представлены три уровня цифрового представления физических объектов: цифровая модель, цифровая тень и цифровой двойник. Проведен сравнительный анализ цифровых моделей местности, цифровых моделей рельефа и цифровых двойников, раскрывающий различия между статичными и динамическими моделями с обратной связью.

Ключевые слова. цифровой двойник, цифровая тень, цифровая модель местности, цифровая модель рельефа, зоны с особо охраняемым режимом использования

A. K. Yamilova^{1✉}, M. A. Gubanishcheva¹, E. I. Avrunev², B. G. Irgit¹

Digital twin of the area as a tool for managing territories with special use conditions: development and implementation prospects

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: aliyakonstantinovna@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the analysis of the prospects for implementing digital twin technology in the management of territories with special use conditions. The theoretical foundations of the "digital twin" concept are examined, tracing its evolution from the initial concepts by Professor Michael Grieves to the modern stage. Three levels of digital representation of physical objects are presented: the digital model (DM), the digital shadow, and the digital twin. A comparative analysis of Digital Terrain Models (DTM), Digital Elevation Models (DEM), and digital twins is conducted, revealing the fundamental differences between static models and dynamic systems with feedback.

Ключевые слова: digital twin, digital shadow, digital terrain model, digital elevation model, specially protected areas with restricted use regime

Введение

Концепция «цифрового двойника» в настоящее время находится на стадии активного развития и внедрения в различные сферы деятельности, что сопровождается множественностью трактовок данного термина.

Зарождение концепции принято связывать с научной деятельностью профессора Майкла Гривза. В 2002 году в ходе презентации для промышленного сообщества, организованной Мичиганским университетом, Гривз впервые сформулировал базовую идею создания виртуального информационного пространства, предназначенного для двустороннего обмена данными с физическими объектами. Хотя сам термин «цифровой двойник» вошел в широкое употребление позднее, именно тогда была заложена его концептуальная основа, включающая три ключевых компонента: физический объект, его виртуальное отображение и канал для их синхронизации посредством обмена данными [1].

Эволюцию концепции цифрового двойника можно представить в виде последовательных этапов (рис. 1). Значительный рост интереса к «цифровым двойникам» наблюдается в последнее десятилетие, что обусловлено стремительным развитием смежных информационных технологий, таких как интернет вещей (IoT), большие данные и искусственный интеллект. Рост заинтересованности исследователей в данной теме можно проследить с 2015 г.

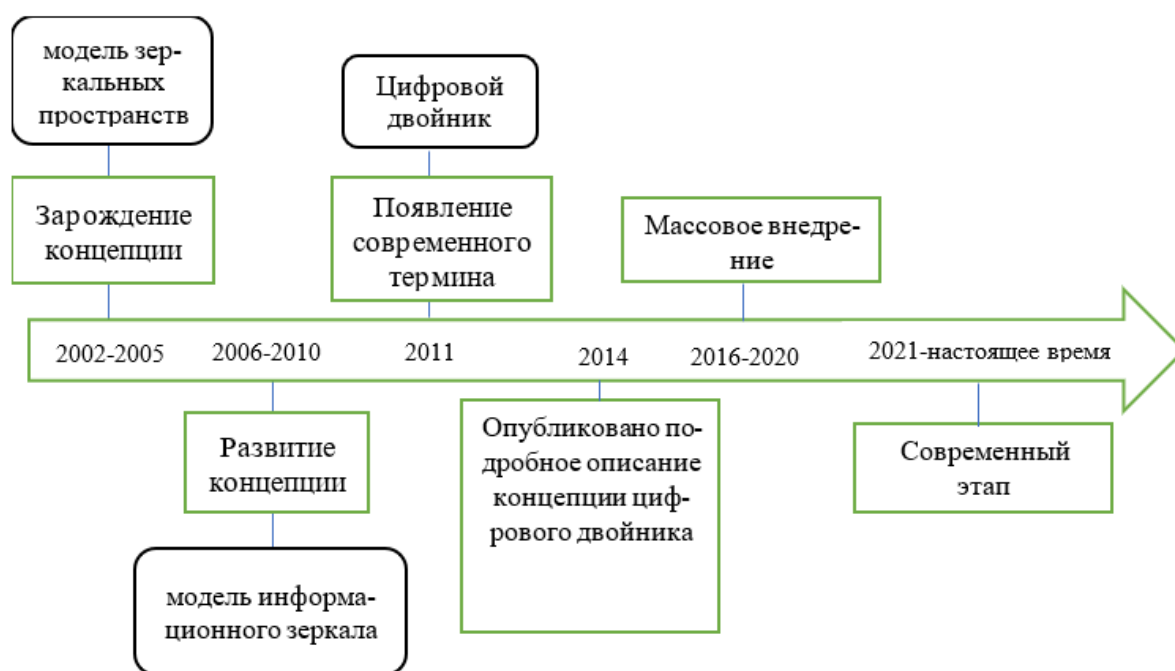


Рис. 1. Основные этапы развития концепции цифровых двойников

Согласно определению Майкла Гривза, цифровой двойник представляет собой комплексную систему информационных моделей, описывающих характеристики и поведение физического объекта – как существующего, так и находящегося на стадии проектирования [1].

В процессе эволюции концепций цифрового представления физических объектов можно выделить три последовательных уровня. Первичным этапом является создание цифровой модели – статичного виртуального образа, отражающего базовые

свойства и характеристики объекта. Следующей ступенью развития становится цифровая тень, которая организует односторонний поток данных от физического объекта к его виртуальному представлению, обеспечивая актуальное отражение текущего состояния в режиме реального времени. Высшей формой реализации является цифровой двойник – комплексная система, где на основе анализа данных, аккумулированных цифровой тенью, становится возможным не только мониторинг, но и активное воздействие на параметры физического объекта через механизмы прогнозного моделирования и адаптивного управления (рис. 2) [2].

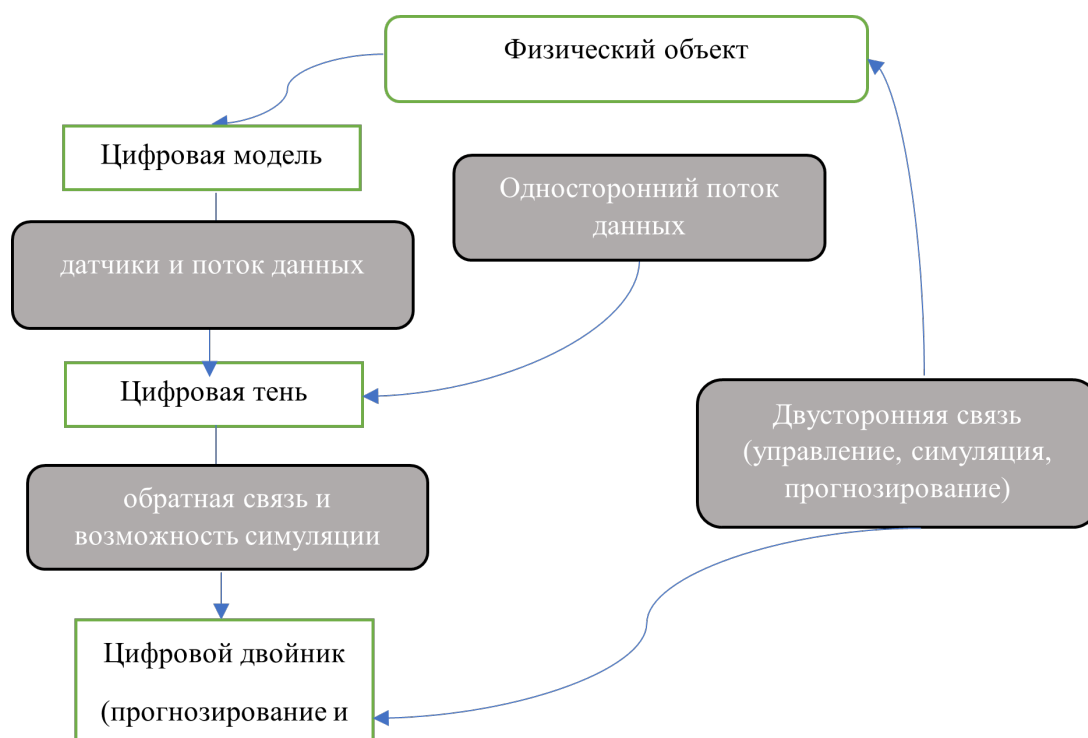


Рис. 2. Уровни цифрового представления о физическом объекте

Методы и материалы

Помимо цифровых двойников, активно используются понятия цифровая модель местности (ЦММ), цифровая модель рельефа (ЦМР). Несмотря на схожесть терминологии, эти понятия имеют принципиальные различия. Проведем сравнительный анализ этих понятий, выделив их ключевые характеристики (табл. 1).

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод о фундаментальном различии в функциональных возможностях рассматриваемых цифровых представлений. Если ЦММ и ЦМР фиксируют статическое состояние территории на момент проведения съемочных работ, то цифровые двойники постоянно получают данные, которые позволяют не просто оценить ситуацию на данный момент времени, но и анализировать, моделировать, прогнозировать и активно управлять объектом или территорией.

Таблица 1

Сравнительная характеристика цифровых моделей и двойников

Параметр	Цифровая модель рельефа (ЦМР)	Цифровая модель местности (ЦММ)	Цифровой двойник объекта капитального строительства (ЦД ОКС)	Цифровой двойник местности (ЦДМ)
Понятие	Набор данных, содержащий пространственные координаты множества точек земной поверхности в определенной системе отсчета, отображающих земную поверхность с определенной точностью и детальностью	Набор данных, содержащий цифровую модель рельефа и цифровые модели объектов местности с определенной точностью и детальностью	Динамическая виртуальная копия конкретного объекта, связанная с ним данными на всем жизненном цикле	Динамическая виртуальная копия территории, объединяющая все объекты, инфраструктуру и процессы в единой системе
Ключевые данные	Высотные отметки (координаты X, Y, Z)	ЦМР + контуры и расположение объектов местности	ВМ-модель (геометрия, материалы) + данные с датчиков	ЦММ + данные
Связь с реальным миром	Отсутствует. Создается на определенный момент и обновляется вручную	Отсутствует. Создается на определенный момент и обновляется вручную	Двусторонняя динамическая связь. Данные с датчиков объекта постоянно обновляют двойник, а решения на его основе влияют на управление объектом	Двусторонняя динамическая связь. Данные с датчиков и систем постоянно обновляют двойник, который используется для управления территорией
Основное назначение	Инженерные расчеты: проектирование вертикальной планировки, расчет объемов земляных работ, гидрологическое моделирование и пр.	Создание геоподосновы для проектирования, кадастровый учет, визуализация территории и пр.	Управление жизненным циклом объекта: прогнозное обслуживание, оптимизация энергозатрат, удаленный мониторинг состояния и пр.	Системное управление территорией: стратегическое планирование, оптимизация городских систем и пр.
Масштаб	Участок, территория	Участок, территория	Отдельный объект	Район, город, регион

Цифровой двойник представляет собой комплексную интегрированную виртуально-информационную модель, которая служит динамическим аналогом физического объекта, системы или процесса. Его ключевой особенностью является

синхронизация с реальным временем, обеспечиваемая за счет непрерывного потока данных и работы симуляционных моделей. Это позволяет решать широкий спектр задач, в результате чего цифровой двойник находит применение во многих сферах (рис. 3) [3].

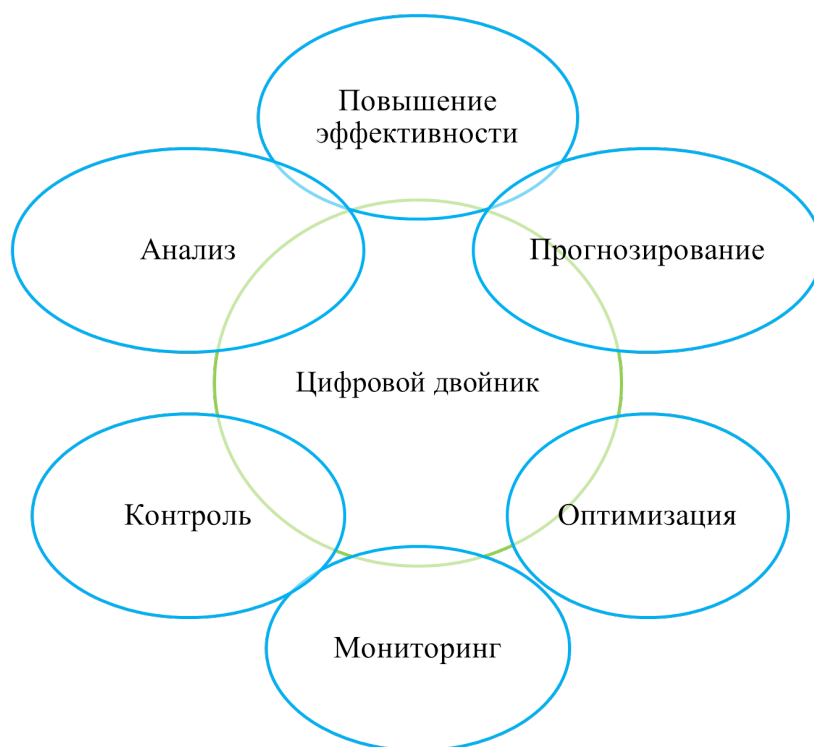


Рис. 3. Спектр задач, решаемых с помощью цифирного двойника

Результаты

Как было сказано выше, цифровой двойник внедряется во многие сферы деятельности. Рассмотрим цифровой двойник местности как инструмент управления зонами с особыми условиями использования территорий (ЗОУИТ). ЗОУИТ – это территории, на которых вводится специальный правовой режим. Земельный кодекс Российской Федерации устанавливает следующие виды зон (рис. 4) [4].

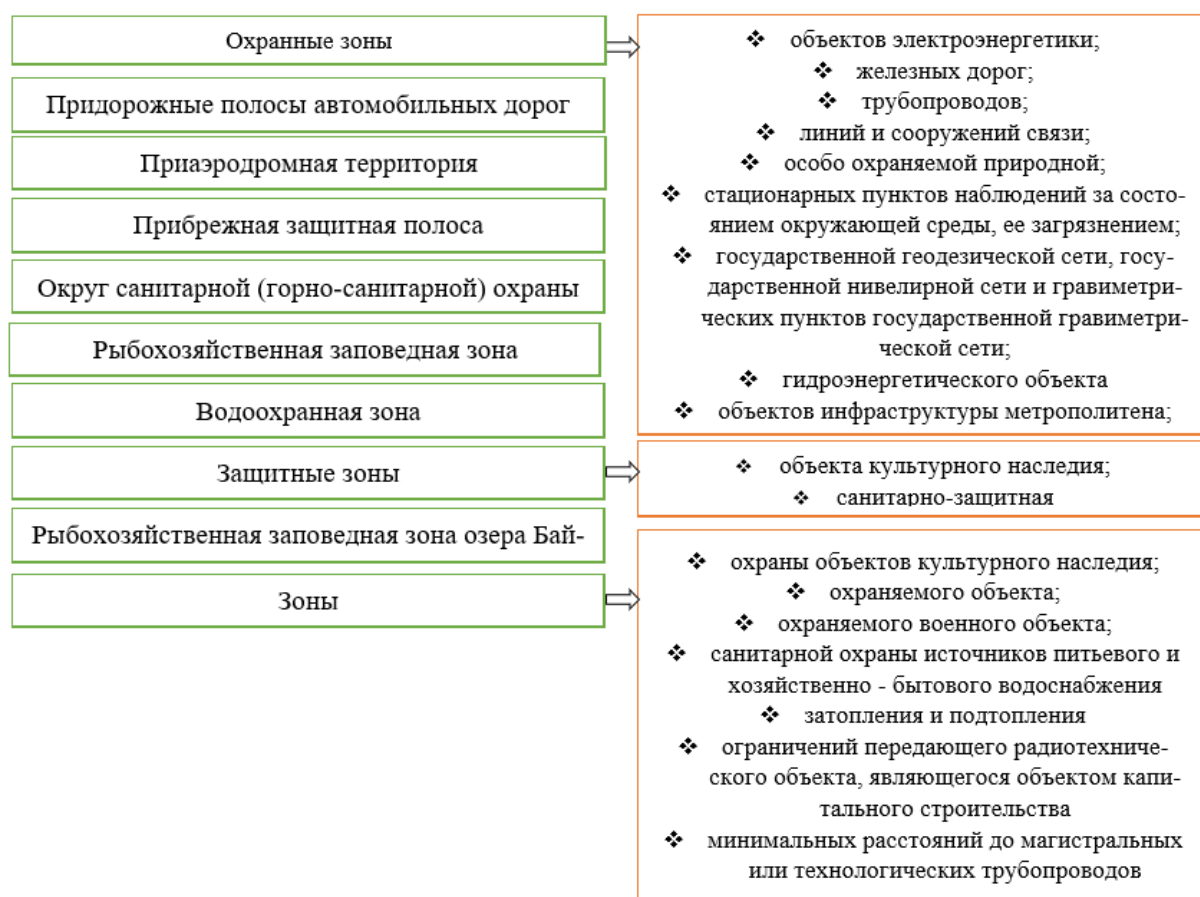


Рис. 4. Виды зон с особыми условиями использования территорий

Система установления и учета границ ЗОУИТ является важным элементом устойчивого развития территорий, обеспечения экологической безопасности и сохранения объектов культурного наследия. На сегодняшний день существует ряд системных проблем в управлении ЗОУИТ, перспективным решением данных проблем может служить цифровой двойник местности (рис. 5).



Рис. 5. Перспективы цифрового двойника, как инструмента регулирования ЗОУИТ

Обсуждение

Перспективы внедрения цифрового двойника в части ЗОУИТ включают возможность значительного улучшения управления, анализа и мониторинга таких зон, что позволит визуализировать, моделировать и прогнозировать процессы для принятия более обоснованных решений и минимизации рисков при соблюдении специальных условий использования территорий.

Применение цифровых двойников в этой сфере позволит:

- создать точные и актуальные цифровые модели с высокой детализацией границ и характеристик зон;
- интегрировать данные из различных источников;
- обеспечить мониторинг в режиме реального времени и выявить нарушения режима зон;
- моделировать сценарии возможного развития территорий.

Заключение

Цифровой двойник местности может служить перспективным инструментом управления ЗОУИТ. Дальнейшие исследования должно быть сфокусировано на разработке моделей цифровых двойников для отдельных типов ЗОУИТ. Внедрение цифровых двойников может способствовать более точному и обоснованному при-

нятию решений, повышению эффективности мониторинга и прогнозирования, а также обеспечению устойчивого развития территорий.

Для успешной реализации цифровых двойников как инструментов управления ЗОУИТ необходима разработка нормативной базы для стандартизации процессов обеспечения качества, актуальности и безопасности данных в цифровых двойниках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems// Kahlen F. J., Flumerfelt S., Alves A. (Eds). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017. P. 85-113. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
2. Лисицкий, Д. В. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования / Д. В. Лисицкий, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 1. – С. 206-212. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.
3. Царев, М. В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М. В. Царев, Ю. С. Андреев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 517-531. – DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
4. Аврунев, Е. И. Разработка технологической схемы установления границ приаэродромной территории / Е. И. Аврунев, М. А. Губанищева, Н. А. Моисеева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2025. – Т. 69, № 1. – С. 115-126. – DOI 10.30533/GiA-2025-007.

© А. К. Ямилова, М. А. Губанищева, Е. И. Аврунев, Б. Г. Иргит, 2026