

DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.03

УДК 625.7:004.9

## АДЕКВАТНОСТЬ ПРОЕКТНОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ РЕАЛЬНОМУ ОБЪЕКТУ В КОНТЕКСТЕ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Т.В. Боброва

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 02 Июня 2023  
Одобрена: 12 Августа 2023  
Принята к публикации:  
10 ноября 2023

#### Ключевые слова:

цифровой двойник, конвергенция BIM и DT, система информационного моделирования SIM-AD, пространственная декомпозиция линейного объекта, природные компоненты, модель текущего состояния.

### АННОТАЦИЯ

Обоснована актуальность объединения технологии информационного моделирования BIM и технологии цифрового двойника в систему информационного моделирования SIM-AD для управления строительством и эксплуатацией автомобильных дорог на протяжении жизненного цикла. Ключевым положением этой новой цифровой технологии является обеспечение двунаправленной связи между реальным физическим объектом и виртуальным объектом – его цифровой моделью. На протяжении жизненного цикла автомобильной дороги разрабатывают и хранят большой объем информации, однако из-за ее разобщенности и недостаточного уровня интеллектуальной поддержки принимаемые решения по управлению активами не всегда адекватны и своевременны. Одной из трудно решаемых проблем автоматизации проектирования транспортных объектов является сложность формализованного описания процессов взаимодействия элементов дорожной конструкции и меняющихся природно-климатических факторов на линейном объекте. Разработанная схема включения методики пространственного районирования трассы дороги на основе комплексных инженерных изысканий в SIM-AD позволяет создать модель цифрового двойника с декомпозицией объекта на проектно-технологические модули, в которых с большей достоверностью учитывается влияние природных полиструктур на элементы дорожной конструкции. Модели Digital Twin Instance призваны фиксировать текущее состояние эксплуатируемого объекта и параметров природной среды на основе датчиков, устанавливаемых на однотипных участках линейных и сосредоточенных проектно-технологических модулей. Систематическая диагностика и накопление статистической информации о взаимовлиянии элементов сооружения и факторов природной среды будут служить основой для планирования эффективных мероприятий на стадиях содержания, ремонта и реконструкции дорог.



## ADEQUACY OF A ROAD DESIGN MODEL TO A REAL OBJECT IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION

T.V. Bobrova

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 02 June 2023  
Approved: 12 August 2023  
Accepted for publication:  
10 November 2023

#### Keywords:

digital twin, BIM and DT convergence, SIM-AD information modeling system, spatial decomposition of a linear object, natural components, current state model.

### ABSTRACT

The relevance of combining BIM information modeling technology and digital twin technology into the SIM-AD information modeling system for managing the construction and operation of roads throughout the life cycle is substantiated. The key provision of this new digital technology is to provide bidirectional communication between a real physical object and a virtual object – its digital model. Throughout the life cycle of a highway, a large amount of information is developed and stored, however, due to its disunity and insufficient level of intellectual support, asset management decisions are not always adequate and timely. One of the hard-to-solve problems of automating the design of transport facilities is the complexity of a formalized description of the processes of interaction between elements of a road structure and changing natural and climatic factors at a linear facility. The developed scheme for including the method of spatial zoning of the road route based on complex engineering surveys in SIM-AD allows you to create a digital twin model with the decomposition of the object into design and technological modules, which more reliably take into account the influence of natural polystructures on the elements of the road structure. Digital twin instance models are designed to record the current state of the operated object and environmental parameters based on sensors installed in the same type of linear and lumped design and technological modules. Systematic diagnostics and accumulation of statistical information on the mutual influence of building elements and environmental factors will serve as the basis for planning effective measures at the stages of maintenance, repair and reconstruction of roads.

---

## Введение

За последние десятилетия произошли существенные изменения в дорожной отрасли, связанные с усилением роли дорог в социально-экономическом развитии страны, повышением требований к потребительским качествам дорог, срокам их проектирования и строительства. Существует тенденция включения автомобильных дорог РФ в международную сеть в нарастающем объеме. Учитывая эти обстоятельства, увеличился объем научных исследований, «связанных со строительством дорог в сложных инженерно-геологических условиях с использованием местных грунтов, которые в основном относятся к слабым грунтам, появились новые инновационные материалы, техника и технологии; создано уникальное оборудование для проведения изысканий и испытаний грунтов, неразрушающие методы контроля состояния дорожной конструкции и ее основания; предложен комплекс расчетных программ для автоматизированного проектирования автомобильных дорог в сложных условиях» [1].

В соответствии с паспортом национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКАД) и в развитие утвержденной Перспективной программы по стандартизации разработан график обновления стандартов и технических требований до 2024 г. Только за период 2015–2020 гг. разработано и утверждено более 250 нормативных документов, направленных на увеличение межремонтного срока, приближение технико-эксплуатационных показателей российских автомагистралей к мировым образцам, повышение безопасности движения [1]. Обновление нормативно-технической базы дорожной отрасли активно продолжается. Нужно отметить, что происходит это обновление в период перехода экономики РФ на рельсы «цифровой трансформации», поэтому структура и содержание отраслевой нормативно-технической документации (НТД) должны соответствовать форматам новой технологии информационного моделирования в строительстве (BIM). Применительно к дорожной отрасли эта система получила название информацион-

ного моделирования дорог (ИМД). Элементы ИМД используют на разных этапах жизненного цикла (ЖЦ) дороги: ГИС-технологии, аэрокосмическая цифровая фотограмметрия, системы спутниковой навигации, объемно-лазерное сканирование местности, геофизические методы, системы автоматизированного проектирования на основе комплекса специализированных расчетных и графических программ.

В настоящее время в дорожной отрасли России накоплен опыт применения отдельных элементов BIM-технологий. Наиболее значимы эти достижения на этапах изысканий и проектирования дорог (САПР). На основе анализа использования BIM-технологий при строительстве площадочных объектов в нашей стране и за рубежом многие исследователи отмечают, что точная и упреждающая проверка объектов жизненно важны как на стадии управления строительством, так и для периода эксплуатации [2, 3]. В то же время авторы [4, 5] утверждают, что технология BIM не всегда достаточна для управления активами на протяжении всего ЖЦ строительной продукции, особенно на этапе эксплуатации и технического обслуживания (O&M).

Широкое использование новых методов в строительной отрасли способствует активному совершенствованию самой информационной системы. Тенденции этого развития привели к расширенному пониманию роли интеллектуального управления активами в жизненном цикле строительных объектов. Ключевым положением этой новой цифровой технологии является обеспечение двунаправленной связи между реальным физическим объектом и виртуальным объектом – его цифровой моделью [6, 7].

В традиционной методологии информационного моделирования в строительном производстве эти процессы пока недостаточно отработаны на теоретическом и информационном уровне. В то же время в высокотехнологичном промышленном производстве параллельно со строительным BIMом успешно развивался комплекс передовых компьютерных технологий и решений для обеспечения жизненного цикла инновационной промышленной продукции до стадии готового продукта. Этой новой технологии в многочисленных публикациях, в том числе и научных статьях, присвоен термин «цифровой двойник» (DT – Digital Twin). Применение DT задает вектор на повышение адекватности моделей реальным объектам.

Исследователи Центра компетенций НТИ СПбПУ в работах [6, 8], анализируя цели и особенности технологий BIM и DT, видят в них основу для будущего развития интеллектуального управления активами в разных отраслях народного хозяйства на базе сближения этих двух технологий. Цифровой двойник рассматривается как «процесс проектирования, в основе которого лежит разработка и применение семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей» с высоким уровнем адекватности реальным объектам. Ключевым элементом этой технологии является многоуровневая матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, в которой гибкие параметрические взаимосвязи компонентов позволяют осуществлять прогнозы сложных явлений и ситуаций в процессе вычислительных экспериментов.

Концепция цифрового двойника была впервые предложена профессором Майклом Гривсом в 2002 г. и включала три базовых составляющих [9]:

- реальный продукт в его реальном окружении,
- виртуальный продукт в его виртуальном окружении,
- информацию и данные, связывающие физический и виртуальный продукт.

Эта концепция получила дальнейшее развитие в работах многих ученых [7, 8, 10, 11]. В названных трудах термин «цифровой двойник» породил семейство новых семантических представлений, связанных с целями применения, моментом разработки, уровнем адекватности цифрового двойника реальному объекту или процессу и т.д.

Применительно к теме статьи отметим следующие компоненты:

1. Технологию SIM (System Information Modeling), которая представляет собой общий информационный ресурс в форме базы знаний (BIG data).

2. Digital Twin Prototype (DTP) – содержит полностью аннотированную 3D модель, спецификацию материалов, процессов, условий среды и т.д., но не включает в себя результаты измерений и отчеты о состоянии реального объекта.

3. Digital Twin Instance (DTI) – описывает реальный объект. Содержит информацию о настройках модели, управляющих параметрах, сведения о текущем состоянии реального объекта на протяжении всего периода функционирования. Использование предиктивной аналитики позволяет прогнозировать состояние объекта в будущем. В отличие от DTP модель подвергается изменениям в соответствии с изменениями реального объекта при его эксплуатации.

4. Digital Twin Aggregate (DTA) – это систем всех DTI, которые могут иметь общую структуру данных и обмениваться данными по запросу.

Эти определения со сложной аббревиатурой можно транспонировать применительно к существующей технической документации любых строительных объектов, в том числе и автомобильных дорог.

На протяжении ЖЦ автомобильной дороги разрабатывается и хранится большой объем информации (в прошлые годы в бумажном, а сейчас и в электронном виде) в форме документов: строительного проекта, паспорта дороги стандартной формы, проектов ремонта и реконструкции и т.д. Однако эта информация не всегда способствует принятию правильных технических и организационных решений в силу ее разобщенности, несогласованности и низкого уровня интеллектуальной поддержки на основе компьютерного моделирования.

Говоря о конвергенции технологий BIM и DT в строительстве, в большей степени мы подразумеваем при этом расширение типов используемых параметрических моделей и возможностей информационного моделирования на разных стадиях жизненного цикла объекта, сохраняя при этом терминологию, уже принятую в научной литературе.

## **Модели и методы**

Для разработки полноценного цифрового двойника дорожной конструкции с высоким уровнем надежности необходимо сформулировать и заложить в математическую модель достоверные качественные и количественные параметры системы «автомобиль – дорога – среда». Параметры внешней среды, должны, во-первых, соответствовать реальным условиям функционирования объекта, во-вторых, иметь описание функциональных или статистических связей с элементами проектируемой системы [12].

Современный уровень инструментария изыскательских работ позволяет существенно увеличить объем информации о состоянии природной среды по трассе дороги [13]. В то же время наличие большого объема неструктурированной информации при отсутствии обобщенных достоверных показателей о характеристиках природных компонентов не упрощает, а, наоборот, усложняет возможность принятия обоснованных проектных решений. Одной из трудно решаемых проблем автоматизации проектирования транспортных объектов является сложность формализованного описания процессов взаимодействия элементов дорожной конструкции и природно-климатических факторов на линейном объекте. При этом не реализуется основное преимущество информационного моделирования: параметрическая связь компонентов природной среды с элементами объекта проектирования.

Методы оценки влияния вероятностных характеристик ресурсных и технологических параметров производства на надежность и качество строительной продукции в дорожной отрасли изучали И.А. Золотарь, Ю.А. Мальцев, В.А. Семенов [14–16]. Для оценки надежности транспортных сооружений в своих исследованиях они применяли формулу распространения ошибок, по которой дисперсия функции (результата) определяется на основе дисперсий составляющих ее элементов:

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2,$$

где  $F$  – рассматриваемая функция, дисперсию которой  $\sigma_F^2$  нужно определить;  $x_i$ ,  $\sigma_{x_i}^2$  – соответственно элемент функции (аргумент) и его дисперсия.

Установлено, что при проектировании и строительстве дорожной одежды можно добиться улучшения качественных характеристик дорожной конструкции (требуемого модуля упругости), управляя дисперсией вероятностных показателей отдельных слоев по ровности, толщине слоев, коэффициентам уплотнения, модулям упругости и т.д.). Допустимые границы требований к геометрическим и технологическим параметрам производства регулируются требованиями отраслевых стандартов и являются областью контроля при производстве работ.

Опираясь на статистические данные о состоянии элементов дорожной конструкции и их влиянии на надежность автомобильной дороги в целом, решают вопросы прогнозирования состояния дороги и выполнения ремонтных работ. Таким образом может осуществляться связь между виртуальной (проектной) моделью объекта и реальным (физическим) объектом. Сложнее учитывать изменение природных факторов в течение всего периода эксплуатации дороги и их воздействие на элементы дорожной конструкции.

Влияние природных факторов при расчете дорожных конструкций определено в действующих стандартах проектирования с учетом деления территории России на дорожно-климатические зоны (ДКЗ) и подзоны, особенностей рельефа и типов местности по условиям увлажнения<sup>1</sup>. Соответствующие зависимости заложены в системах САПР-АД для проектирования конструкций земляного полотна и дорожных одежд в автоматизированном режиме.

В исследованиях, выполненных позднее рядом отечественных ученых, обоснована необходимость дальнейшей структуризации ранее сформированных дорожно-климатических зон [17–19]. Новые методы предлагают рассматривать общие показатели инженерно-геологических условий как фактор научно обоснованной декомпозиции территорий на районы и участки.

Научные разработки в этом направлении ведутся в разных странах, особенно характерны для государств, развивающих в настоящее время свою дорожную сеть. Многие из них опираются на Руководство MEPDG [20–23], в котором используется программное обеспечение с большим количеством встроенных виртуальных метеостанций. В Руководстве MEPDG [24] приведен подробный перечень механических и физических показателей для характеристики состояния разных геологических структур в основаниях дорог, а также комплекс мероприятий для решения типовых задач проектирования надежных дорожных

<sup>1</sup> ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования [Электронный ресурс]. – М.: Стандартинформ, 2021. – 153 с. – URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&page=7&month=6&year=2021&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=230356> (дата обращения: 30.06.2023); ОДМ 218.3.1.005-2021. Проектирование жестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. – М., 2021.

конструкций. Надежность конструкции определена как вероятность того, что основные критерии оценки состояния достигнут порогового уровня не ранее конца срока службы при заданных условиях эксплуатации. К условиям эксплуатации относятся не только характеристики меняющихся во времени параметров действующих нагрузок (интенсивности, состава движения), но и изменение показателей природной среды во времени. Эти показатели учитываются в расчетах на момент проектирования. В то же время наблюдение и прогноз этих показателей могут оказать существенное влияние на своевременность, эффективность и способы ремонтных мероприятий.

В процессе эксплуатации дорог воздействие параметров внешней среды на реальный объект отслеживают с помощью системы датчиков. Если таким объектом является автомобильная дорога, то важно решить вопрос, в каких местах установка датчиков будет наиболее эффективной для принятия оперативных и плановых решений с целью нормальной эксплуатации сооружения.

Свойства дорожной конструкции на определенном участке дороги можно представить в виде функции от совокупности свойств природной среды в виде зональных, интразональных и региональных факторов, свойственных этому участку.

Территориальное деление местности на зоны, подзоны и участки не всегда позволяет учесть меняющиеся по длине трассы интразональные и региональные факторы в полной мере, особенно в сложных природных условиях России. Недоучет этих факторов при проектировании дорог приводит к отказам дорожных конструкций на отдельных участках, проявляющимся в виде резкого снижения транспортно-эксплуатационных показателей, дефектам или даже к разрушению конструкций ранее нормативного срока службы.

Для решения данной проблемы в СИБАДИ разработан метод линейного дорожного районирования на основе многоуровневой концептуальной модели, построенной по принципу ранжирования доминирующих факторов природной среды: зональных, интразональных, региональных. Математическое моделирование позволяет последовательно осуществлять декомпозицию объекта (трассы дороги) на зоны, линейные дорожные комплексы (ЛДК) в составе зон, участки с региональными особенностями в составе ЛДК [25–27]. Метод прошел апробацию в проектных организациях и рекомендован к использованию при проектировании и строительстве дорог.

Результатом линейной таксономии является разделение дороги на характерные участки, в пределах которых дисперсия большинства показателей природных факторов снижается в 2–3 раза. При включении линейной декомпозиции дороги в систему автоматизированного проектирования (САПР) расчеты дорожных конструкций будут иметь определенную привязку к линейным дорожным комплексам. Тогда цифровая модель прототипа дороги будет представлять собой набор линейных проектно-технологических модулей (ЛПТМ) с определенными типами конструктивных решений. Отдельно выделяют конструкции на сосредоточенных участках с особыми региональными условиями.

Однородность и адекватность значений показателей по интразональным факторам обеспечивают методы геоинформационных технологий, таксономического анализа, распознавания образов, используемые в разработанных моделях. Целью данного исследования является адаптация методов линейного дорожного районирования и структурно-модульного проектирования дорожных конструкций к технологии BIM + DT. Эти методы обеспечат повышение точности оценки взаимовлияния факторов природных территориальных комплексов и инженерных решений при включении в модели цифрового двойника автомобильной дороги.

Показатели качества дорожной конструкции (прочность, устойчивость, надежность и др.) функционально связаны с количественными характеристиками природной среды, которые положены в основу большинства конструктивных решений, в частности при назначении разных типов современных геосинтетических материалов [28].

## Результаты и дискуссия

На основе проведенных экспериментов на дорогах в сложных природных условиях, в том числе в условиях многолетнемерзлых грунтов, установлено, что средний коэффициент вариаций показателей по интразональным факторам на ЛДК снижался более чем в 3 раза по сравнению со средним значением по дороге. На рис. 1 приведены результаты линейного районирования, выполненного в составе проектной документации на участке автомобильной дороги в условиях многолетнемерзлых грунтов. Результатом линейной таксономии является получение обобщенных параметров природных компонентов для проектирования дорожных конструкций, а также снижение дисперсии природных факторов в пределах ЛДК.



Рис. 1. Фрагмент сопоставления параметров природных комплексов на протяжении участка дороги и на ЛДК по результатам таксономии  
 Fig. 1. Fragment of comparison of the parameters of natural complexes along the road section and at the LDK based on the results of taxonomy

Для районирования использованы данные инженерно-геодезических, инженерно-геологических и инженерно-гидрометеорологических изысканий. Алгоритм таксономического анализа и классификации реализован с использованием программы MS Excel. В настоящее время разработаны специальное программное обеспечение автоматического районирования многомерных данных в векторных геоинформационных системах (ГИС).

Технология SIM-AD, организованная как общая структура данных Digital Twin Aggregate (DTA) по отдельным участкам дороги в форме совокупности DTI и DTP, позволит создать и хранить информацию о конструктивных решениях и связанных с ними природных факторах в обобщенном и структурированном виде.

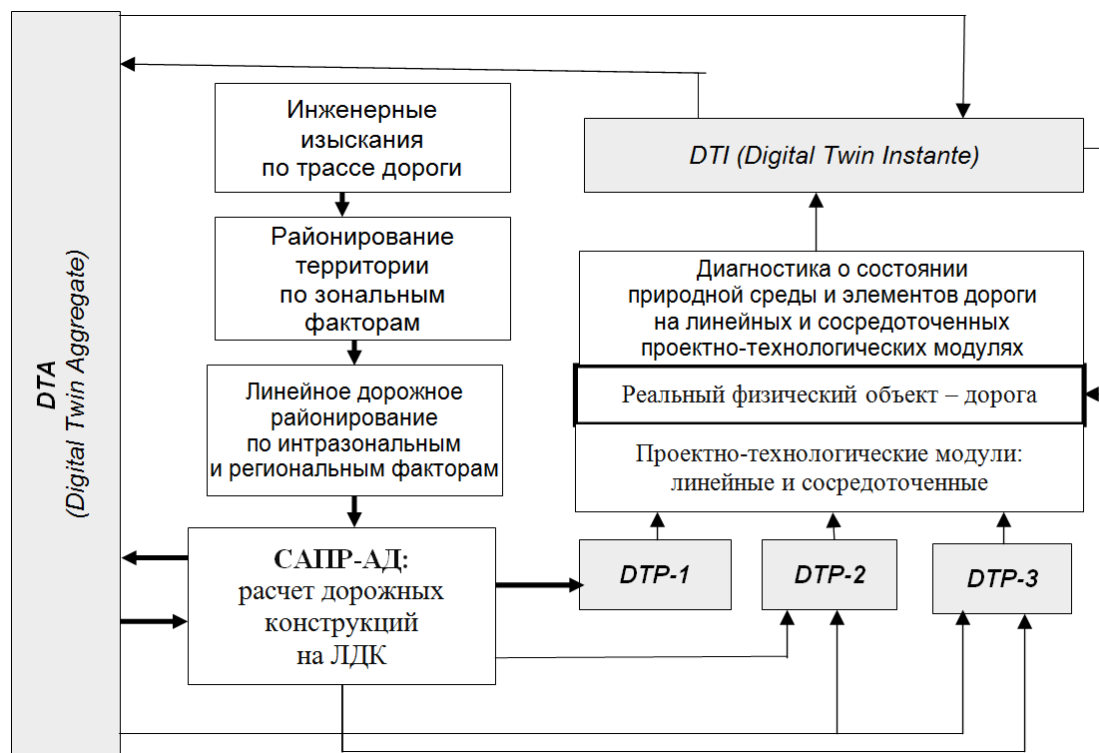


Рис. 2. Концепция включения линейного дорожного районирования в систему SIM-AD (BIM + DT).

Обозначения:  – выделение блоков с цифровыми двойниками; DTP-1, DTP-2, DTP-3 – цифровые двойники-прототипы соответственно по строительству, ремонтам, реконструкции;

$\rightarrow$  – стрелки процессов создания DTP на этапе строительства дороги

Fig. 2. Concept for incorporating linear road zoning into SIM-AD (BIM + DT). Designations:

– selection of blocks with digital twins; DTP-1, DTP-2, DTP-3 – digital twins of prototypes, respectively, for construction, repairs, reconstruction;  $\rightarrow$  – arrows of DTP creation processes during the road construction phase

Далее такая информация может использоваться при проектировании новых конструкций на объектах с аналогичными природными условиями. Накопление статистической информации от датчиков при изменении интразональных и региональных факторов, а также данных о состоянии дорожных конструкций в процессе эксплуатации обеспечит формирование параметрических зависимостей как основы для принятия конструктивных и организационно-технологических решений при ремонте и реконструкции дорог. Схема включения линейного дорожного районирования в систему SIM + DT представлена на рис. 2.

## Выводы

1. На основании выполненных исследований и анализа научной литературы обоснована актуальность объединения технологии информационного моделирования BIM и технологии цифрового двойника DT в систему информационного моделирования SIM-AD для управления строительством и эксплуатацией автомобильных дорог на протяжении жизненного цикла.

2. Структура BIM + DT предусматривает учет параметрических зависимостей между элементами строительного объекта и факторами окружающей среды как в процессе проектирования строительства, так и на этапе эксплуатации и обслуживания (O&M). В то же время необходимы дополнительные научные исследования для формирования структуры DTP и DTI с учетом особенностей нормативно-технической документации дорожной отрасли.



3. Методика пространственного районирования трассы дороги, по данным комплексных инженерных изысканий, включенная в САПР, позволяет создать модель цифрового двойника с декомпозицией объекта на проектно-технологические модули, в которых с большей достоверностью учитывается влияние природных полиструктур на элементы дорожной конструкции. Модели DTI (Digital Twin Instance) призваны фиксировать текущее состояние эксплуатируемого объекта и параметров природной среды на основе датчиков, устанавливаемых на однотипных участках линейных и сосредоточенных проектно-технологических модулей. Систематическая диагностика и накопление статистической информации о взаимовлиянии элементов сооружения и факторов природной среды будут служить основой для повышения адекватности моделей при проектировании мероприятий на стадиях содержания, ремонта и реконструкции дорог.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад 100 %.**

## **Библиографический список**

1. Кузахметова Э.К. К новой нормативной базе для современных дорог [Электронный ресурс] // Дороги. Инновации в строительстве. – Февраль 2020. – № 83. URL: [http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf) (дата обращения: 28.06.2023).
2. Hamledari H., Rezazadeh Azar E., McCabe B. IFC-based development of as-built and as-is BIMs using construction and facility inspection data: Site-to-BIM data transfer automation // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2018. – № 322. – P. 04017075. DOI: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000727
3. Пименов С.И. Состояние и перспективы многоуровневой системы планирования строительных проектов в условиях цифровой трансформации // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 55–66. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.05.
4. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management / Q. Lu, X. Xie, J. Heaton, A.K. Parlikad, J. Schooling // Studies in Computational Intelligence. – 2019. – No. 853. – P. 392–404. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1\_30
5. Анализ зрелости BIM-решений как инструмента обеспечения жизненного цикла здания / А.С. Сунцов, О.Л. Симченко, Ю.А. Толкачев, Е.Л. Чазов, Д.Р. Самигуллина // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 41–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04
6. Integration of digital twin and BIM technologies within factories of the future / V.L. Badenko, N.S. Bolshakov, E.B. Tishchenko [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 1(101). – P. 10114. – DOI: 10.34910/MCE.101.14.
7. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Гамзикова А.А. Цифровые двойники в нефтегазовом машиностроении [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – 2020. – № 6. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tekhnologii/555981-tsifrovye-dvoyniki-v-neftegazovom-mashinostroenii/> (дата обращения: 28.06.2023).
8. Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием, Санкт-Петербург, 20–22 июня 2019 года / под ред. А.В. Бабкина. – С.-Петербург.: Санкт-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого, 2019. – С. 234–245. DOI: 10.18720/IEP/2019.3/25

9. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication, 2014 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> (дата обращения: 28.06.2023).
10. Брук П. Цифровые двойники, основанные на симуляции мультифизических процессов // САПР и графика. – 2019. – № 7(273). – С. 24–26.
- 11 Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research / С. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 114. – P. 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179
12. Bobrova T.V., Kodentseva Yu.V., Perfiliev M.S. Parameterization of environmental components in the information-modeling context of roads // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 698. – P. 066006. DOI:10.1088/1757-899X/698/6/066006
13. Гладун Л.Ю., Ловягин В.Ф. Концептуальные положения геоинформационного обеспечения многовариантного проектирования линейных сооружений // Гео-Сибирь-2008: IV Междунар. науч. конгр., 22–24 апреля, 2008 г. – Новосибирск: СГГА. – 2008. – Т. 1: Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 1. – С. 131–134.
14. Золотарь И.А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1974. – 248 с.
15. Мальцев Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений. – М.: Академия, 2010. – 320 с.
16. Семенов В.А. Качество и однородность автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1989. – 125 с.
17. Ефименко С.В., Бадина М.В. Дорожное районирование территории Западной Сибири. – Томск: Изд-во Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2014. – 244 с.
18. Application of information systems in road-climatic zoning / V. Efimenko, S. Efimenko, A. Sukhorukov, A. Yankovskaya // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 71(1). – P. 012049.
19. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic zoning of territories // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 143. – P. 01012.
20. Li Q., Mills L., McNeil S. The implications of climate change on pavement performance and design [Электронный ресурс] // UD-UTC Final Report. – 2011. – URL: <https://trid.trb.org/view/1131916> (дата обращения: 02.03.2023).
21. Saha J. Evaluation of climatic effects on pavement performance using MEPDG. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
22. Shallal M.M., Ahmed S.E.M. Rational structural designs for highways in different climatic zones in Sudan // IOSR Journal of Engineering. – 2014. – Vol. 4, iss. 4. – P. 13–26.
23. Elshaeb M.A., El-Badawy S.M., Shawaly E.A. Development and impact of the egyptian climatic conditions on flexible pavement performance // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2014. – Vol. 2, iss. 3. – P. 115–121.
24. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Interim Edition. – Washington D.C., 2008.
25. Боброва Т.В., Дубенков А.А., Тытарь И.В. Совершенствование организационно-технологического проектирования линейных транспортных объектов на основе моделирования их пространственной декомпозиции // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 169–175.

26. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact // MATEC Web of Conferences. – 2018. – No. 216. – P. 01003. DOI: 10.1051/mateconf/201821601003

27. Дубенков А.А. Структурно-модульный подход к проектированию земляного полотна автомобильных дорог в условиях многолетнемерзлых грунтов на основе линейного районирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2015. – 23 с.

28. Ушаков В. К выбору надо подходить разумно [Электронный ресурс] // ДОРОГИ. Инновации в строительстве. – Февраль 2020. – № 83. – URL: [http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf) (дата обращения: 28.06.2023).

## References

1. Kuzakhmetova E.K. K novoy normativnoy baze dlya sovremennykh dorog [Towards a new regulatory framework for modern roads]. *DOROGI. Innovatsii v stroitelstve*, Februar 2020, no. 83, available at: [http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf) (accessed 28 Yuni 2023).

2. Hamledari. H., Rezazadeh Azar. E., McCabe B. IFC-based development of as-built and as-is BIMs using construction and facility inspection data: Site-to-BIM data transfer automation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2018, no. 322, p. 04017075. DOI: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000727.

3. Pimenov S.I. The state and prospects of a multi-level planning system for construction projects in the context of digital transformation. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 2, pp. 55–66. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.05.

4. Lu Q., Xie X., Heaton J., Parlikad A.K., Schooling, J. From BIM Towards Digital Twin: Strategy and Future Development for Smart Asset Management. *Studies in Computational Intelligence*, 2019, no. 853, pp. 392-404. DOI: 10.1007/978-3-030-27477-1\_30.

5. Suntsov A.S., Simchenko O.L., Tolkachev Yu.A., Chazov E.L., Samigullina D.R. Maturity analysis of bim solutions as a tool for building life cycle support. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 41–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04.

6. Badenko V.L., Bolshakov N.S., Tishchenko E.B. [et al.]. Integration of digital twin and BIM technologies within factories of the future. *Magazine of Civil Engineering*, 2021, no. 1(101), pp. 10114. DOI 10.34910/MCE.101.14.

7. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Gamzikova A.A. Tsifrovyye dvoyniki v neftegazovom mashinostroyenii. *Neftegaz.RU*, 2020, no. 6, available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tehnologii/555981-tsifrovyye-dvoyniki-v-neftegazovom-mashinostroyenii/> (accessed 28 Yuni 2023).

8. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. Tsifrovyye dvoyniki: opredeleniye. podkhody i metody razrabotki. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti : Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii s zarubezhnym uchastiyem. Sankt-Peterburg. 20–22 iyunya 2019 goda*. Ed. A.V. Babkin. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2019, pp. 234-245. DOI 10.18720/IEP/2019.3/25.

9. Grieves M. Digital Twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014, available at: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf> (accessed 28 Yuni 2023).

10. Bruk P. Tsifrovyye dvoyniki, osnovannyye na simulyatsii multifizicheskikh protsessov. *SAPR i grafika*, 2019, no. 7(273), pp. 24-26.

11. Boje. C., Guerriero A., Kubicki S., Rezugui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 2020, vol. 114, p. 103179. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179

12. Bobrova T.V., Kodentseva Yu.V., Perfiliev M.S. Parameterization of environmental components in the information-modeling context of roads. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 698, p. 066006. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066006.
13. Gladun L.Yu., Lovyagin V.F. Kontseptualnyye polozheniya geoinformatsionnogo obespecheniya mnogovariantnogo proyektirovaniya lineynykh sooruzheniy. *GEO-SIBIR-2008. IV Mezhdunar. nauch. Kongr*, 22 - 24 apr. 2008. Novosibirsk, SGGGA, 2008, vol. 1: *Geodeziya. geoinformatika. kartografiya. marksheyderiya*. part 1, pp. 131-134.
14. Zolotar I.A. Ekonomiko-matematicheskiye metody v dorozhnom stroitelstve. Moscow, Transport, 1974, 248 p.
15. Maltsev Yu.A. Ekonomiko-matematicheskiye metody proyektirovaniya transportnykh sooruzheniy. Moscow, Akademiya, 2010, 320 p.
16. Semenov V.A. Kachestvo i odnorodnost avtomobilnykh dorog. Moscow, Transport, 1989, 125 p.
17. Efimenko S.V., Badina M.V. Dorozhnoye rayonirovaniye territorii Zapad-noy Sibiri. Tomsk, Izd-vo Tom.gos.arkhit.-stroit. un-ta, 2014, 244 p.
18. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A., Yankovskaya A. Application of information systems in road-climatic zoning. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 71(1), p. 012049.
19. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic zoning of territories *MATEC Web of Conferences*, 2018, Vol. 143, p. 01012.
20. Li Q., Mills L., McNeil S. The Implications of Climate Change on Pavement Performance and Design. *UD-UTC Final Report*, 2011. <https://trid.trb.org/view/1131916>.
21. Saha J. Evaluation of climatic effects on pavement performance using MEPDG. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011.
22. Shallal M.M., Ahmed S.E.M. Rational structural designs for highways in different climatic zones in Sudan. *IOSR Journal of Engineering*, 2014, vol. 4, iss. 4, pp. 13-26.
23. Elshaeb M.A., El-Badawy S.M., Shawaly E.A. Development and impact of the egyptian climatic conditions on flexible pavement performance. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2014, vol. 2, iss. 3, pp. 115-121.
24. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Interim Edition, Washington D.C., 2008.
25. Bobrova T.V., Dubenkov A.A., Tytar I.V. Sovershenstvovaniye organizatsionno-tekhnologicheskogo proyektirovaniya lineynykh transportnykh ob'yektov na osnove modelirovaniya ikh prostranstvennoy dekompozitsii. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2016, no. 4, pp. 169-175.
26. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact. *MATEC Web of Conferences*, 2018, no. 216, p. 01003, available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>.
27. Dubenkov A.A. Strukturno-modulnyy podkhod k proyektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobilnykh dorog v usloviyakh mnogoletnemerzlykh gruntov na osnove lineynogo rayonirovaniya [Structural-modular approach to the design of highway subgrade under permafrost conditions on the basis of linear zoning]. Abstract of Ph. D. thesis. Omsk, 2015, 23 p.
28. Ushakov V. K vyboru nado podkhodit razumno [You have to choose wisely]. *DOROGLI. Innovatsii v stroitelstve*, Februar 2020, no. 83, available at: [http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf) (accessed 28 Yuni 2023).