

Научная статья

УДК 656.1:004.8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

EDN: ITMNZK



Check for updates

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Д.С. Курбатов¹✉, А.В. Старostenко²

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

¹АО «СТАР-Проект»,

г. Санкт-Петербург, Россия

²АО ПО «РосДорСтрой»,

г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор

dimkur21@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается разработка теоретической модели для внедрения цифровых двойников автомобильных дорог и оценка их эффективности в системе организации дорожного движения с адаптацией принципов их построения к особенностям транспортной инфраструктуры России.

Материалы и методы. Интеграция цифровых двойников в управлении дорожным движением демонстрирует свою эффективность благодаря тесной взаимосвязи с интеллектуальными транспортными системами. В основе исследования лежит современный метод и системный анализ создания и применения цифровых двойников. Авторами предложена математическая модель для формализации и оценки эффективности, которая интегрирует такие ключевые факторы, как затраты на содержание дорог, снижение времени простоя транспорта, экономия топлива и повышение безопасности. Цифровые двойники приносят экономическую выгоду за счет более точного прогнозирования ремонтных и профилактических работ, сокращения эксплуатационных расходов и уменьшения необходимости постоянного присутствия персонала на объектах. Кроме того, они также выступают ключевым инструментом долгосрочного планирования, предостав员ая возможность моделировать будущие сценарии развития транспортной сети с минимальными финансовыми затратами.

Результаты. Исследование охватило методы прогнозной аналитики, данные пилотных проектов и подходы к созданию цифровых двойников, использующих данные, собранные с помощью сетей датчиков, видеокамер и беспилотников. Обработка и объединение этой информации в единую цифровую платформу позволяют в режиме реального времени отслеживать изменения на дорогах, прогнозировать развитие ситуаций и принимать обоснованные управленческие решения с помощью инструментов предсказательной аналитики.

Для оценки эффективности цифровых двойников разработана и формализована теоретико-экономическая модель, которая позволяет количественно обосновать инвестиционные решения. Определены некоторые специфические проблемы масштабирования технологий в Российской Федерации, включая недостаточную нормативно-правовую базу, разработку единых стандартов данных, кадровый дефицит. Представлена структурированная таблица развития цифровых двойников и их ключевых направлений.

Обсуждение и заключение. Исследование показало, что объединение цифровых двойников с интеллектуальными транспортными системами открывает широкие возможности для оптимизации управления дорожным потоком, улучшения безопасности на дорогах и увеличения транспортной емкости.

Комплексная оптимизация дорожного движения невозможна без показанной практической значимости цифровых двойников. Предложенная модель может являться основой для планирования и обоснования инвестиций в цифровизацию транспортной инфраструктуры на различных государственных и муниципальном уровнях. Однако успешная реализация зависит от многих факторов и требует комплексного подхода, включая серьезную подготовку кадров на всех уровнях, развитие нормативной базы и формирование единой цифровой экосистемы.

© Курбатов Д.С., Старostenко А.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой двойник, управление дорожным движением, интеллектуальные транспортные системы, теоретико-экономическая модель, оптимизация транспортных потоков, безопасность дорожного движения

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Курбатов Д.С., Старostenко А.В. Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 772-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

EDN: ITMNZK

INNOVATIVE APPROACHES TO TRAFFIC MANAGEMENT BASED ON DIGITAL TWINS OF ROAD NETWORKS

Dmitriy S. Kurbatov¹✉, Andrey V. Starostenko²

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
«STAR-Project» JSC,
St. Petersburg, Russia

²«RosDorstroy» JSC, Production association,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
dimkur21@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article considers the development of the theoretical model for the implementation of digital twins of highways and assesses their effectiveness within the traffic management system, adapting their construction principles to the specifics of Russia's transport infrastructure.

Materials and Methods. The integration of digital twins into traffic management demonstrates its effectiveness through a close relationship with intelligent transport systems. The research is based on modern method and system analysis to the creation and application of digital twins. The authors propose a mathematical model for formalizing and evaluating the effectiveness, which integrates key factors such as: road maintenance costs, reduction of vehicle idle time, fuel savings, and improved safety. Digital twins generate economic benefits through more accurate forecasting of repair and preventive maintenance work, diminishing operational expenses, and decreased need for constant personnel presence at sites. Furthermore, they also serve as a key tool for long-term planning, providing the capability to model future scenarios for the development of the transport network with minimal financial investment.

Results. The study encompassed methods of predictive analytics, data from pilot projects, and approaches to creating digital twins that utilize data collected by sensor networks, video cameras, and drones. Processing and integrating this information into the unified digital platform enables real-time monitoring of changes on the roads, forecasting situation development, and making informed management decisions using tools of predictive analytics. A theoretical and economic model has been developed and formalized to assess the effectiveness of digital twins, providing quantitative justification for investment decisions. Several specific problems related to scaling these technologies in the Russian Federation were identified, including an insufficient regulatory framework, the need to develop unified data standards, and a shortage of skilled personnel. A structured table outlining the development of digital twins and their key directions is presented.

Discussion and Conclusion. The research has showed that combining digital twins with intelligent transport systems opens sufficient opportunities for optimizing traffic flow management, improving road safety, and increasing transport capacity.

© Kurbatov Dmitriy S., Starostenko Andrey V., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Comprehensive traffic optimization is impossible without demonstrating the practical significance of digital twins. The proposed model can serve as a basis for planning and justifying investments in the digitalization of transport infrastructure at various state and municipal levels. However, successful implementation depends on many factors and requires a complex approach, including serious personnel training at all levels, development of the regulatory framework, and creation of the unified digital ecosystem.

KEYWORDS: *digital twin, traffic management, intelligent transportation systems, theoretical and economic model, traffic flow optimization, road safety*

The article was submitted: June 27, 2025; **approved after reviewing:** September 16, 2025; **accepted for publication:** October 21, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: *the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.*

For citation. Kurbatov D.S., Starostenko A.V. Innovative approaches to traffic management based on digital twins of road networks. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (5): 772-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

ВВЕДЕНИЕ

Российская транспортная система в последнее время испытывает серьезные испытания, вызванные некоторыми ключевыми факторами: стремительным увеличением количества транспортных средств, перегрузкой дорожной сети, ухудшением экологического состояния и ростом количества ДТП. Традиционные подходы к управлению транспортными потоками уже не справляются с современными вызовами: они не обладают достаточной гибкостью, эффективностью и масштабируемостью. В качестве перспективного решения выделяются цифровые двойники, представляющие собой виртуальные копии физических объектов, постоянно обновляемые актуальной информацией в реальном времени. В их состав входят геометрическая модель, сведения о техническом состоянии объектов, история эксплуатации и аналитические инструменты¹.

Разработка комплексного подхода к применению цифровых двойников автомобильных дорог является целью данного исследования, что в итоге должно непременно сказаться на повышении эффективности организации дорожного движения, адаптированного именно к российским условиям, а создание теоретической модели должно привести к правильной оценке экономической и практической эффективности. Стоит отметить, что внедрение цифровых двойников сопровождается рядом трудностей, среди которых стоит выделить необходимость обработки массивных данных, создание надежной защищенной системы и обеспечение мощных вычислительных ресурс-

сов для обработки информации в динамичном режиме. Необходимо также разработать соответствующие нормативно-правовые акты, поскольку текущие стандарты не всегда адекватно отражают особенности функционирования таких систем [1].

Цифровые двойники, благодаря стремительному развитию технологий, открывают новые возможности для совершенствования транспортных систем, уменьшения пробок и усиления безопасности на дорогах. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести системный анализ современных методик создания и применения цифровых двойников в дорожно-транспортной сфере с выделением перспективных направлений;
- разработать теоретическую модель, формализующую взаимосвязь ключевых факторов эффективности внедрения цифровых двойников в систему организации дорожного движения;
- предложить вариант создания экономико-математического аппарата для комплексной оценки инвестиционной целесообразности и окупаемости проектов цифровизации дорожной инфраструктуры;
- выявить и систематизировать основные проблемы и перспективы развития технологии цифровых двойников автодорог в России.

Современная концепция обеспечения безопасного и эффективного движения высокоматематизированных транспортных средств (БАТС) по автомобильным дорогам общего пользования, в том числе в условиях смешанного транспортного потока, предполагает обязательное взаимодействие БАТС с интеллек-

¹ Паспорт Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации // Мир дорог. 2021. № 139. С. 74–76. EDN IRTQRP

туальными транспортными системами (ИТС) с использованием цифровых двойников дороги и систем высокоточного позиционирования. Такая система способна ускорить внедрение автономного транспорта, который сможет безопасно и с высокой эффективностью работать в густонаселенных городах [2].

Актуальность темы подчеркивается не только глобальными трендами цифровизации, но и конкретными инициативами, такими как федеральный проект «Цифровая транспортная сеть» и стратегии развития умных городов. Результаты данного исследования могут быть полезны для государственных органов, занимающихся планированием транспортной политики, а также для коммерческих организаций, внедряющих интеллектуальные системы управления перевозками. Информация, полученная от этих моделей, играет ключевую роль в создании ИТС, что подтверждается актуальностью данной тематики в национальных планах цифровой модернизации².

Научная новизна исследования состоит в создании уникальной методики оценки эффективности цифровых двойников автомобильных дорог, учитывающей отраслевые и региональные особенности организации дорожного движения в России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования послужили данные открытых научных публикаций, отчетная документация по pilotным проектам внедрения цифровых двойников, а также действующие нормативно-правовые акты Российской Федерации, регламентирующие вопросы разработки и применения интеллектуальных транспортных систем и цифровой трансформации транспортной отрасли. Цифровой двойник дороги представляет собой виртуальную модель дорожной инфраструктуры, которая содержит информацию о геометрии дорог, их состоянии, интенсивности движения транспорта и других характеристиках. Изготовление данного объекта осуществляется на основе информации, которая была получена при помощи различных технологий и способов: геодезические измерения; дистанционное зондирование; системы мониторинга и другие. Для создания цифрового двойника дороги необходимо собрать большой объем информации, обработать их с помощью специальных программ и алгоритмов, а так-

же постоянно обновлять информацию, чтобы поддерживать актуальность модели.

Цифровые двойники революционизируют мониторинг состояния дорог, обеспечивая оперативность и точность, недоступные традиционным методам. В то время как классические обследования требуют значительных временных и финансовых вложений, цифровая модель может быть оперативно обновлена с помощью современных технологий, таких как дроны, мобильные лазерные сканеры и спутниковые снимки. Благодаря им создаются высокоточные 3D-модели, что существенно сокращает время диагностики и выявления проблем на дорогах. Центр интеллектуальных транспортных систем МАДИ отмечает, что применение цифровых двойников ускоряет процесс обследования объектов в 3-4 раза, обеспечивая при этом более точные результаты. Автоматическая обработка данных, получаемых из цифровых моделей, интегрируемых в системы управления дорожной инфраструктурой, исключает вероятность человеческих ошибок и повышает надежность принимаемых решений.

Цифровые двойники открывают новые возможности для планирования и совершенствования ремонтных работ на дорогах. Благодаря им можно разрабатывать обоснованные планы текущего и капитального ремонта, а также оптимальные схемы технического обслуживания. Анализируя цифровую модель дороги, можно выявить наиболее проблемные участки, сравнив их по показателям износа, нагрузки, частоты аварий, климатических условий и даже динамики скорости движения. Такой подход к планированию ремонта позволяет эффективно распределять ресурсы и формировать ремонтные графики исходя из приоритетов [3]. Особенno большое значение это приобретает для протяженных федеральных дорог, где даже незначительные погрешности в расчетах могут обернуться крупными финансовыми потерями.

Цифровые двойники оказывают существенное влияние на повышение безопасности на дорогах за счет возможности сбора, анализа и визуализации данных о дорожно-транспортных происшествиях, динамике движения транспорта, погодных явлений и других факторов в режиме онлайн. Такой подход позволяет, например, в рамках реализации проекта «Безопасные и качественные дороги» выяв-

² Министерство цифрового развития РФ. Концепция цифровой трансформации транспорта. М., 2022.

лять и оптимизировать участки с повышенным риском аварий в крупных городах. Использование цифровых моделей и искусственного интеллекта позволяет предсказывать места, где могут произойти ДТП. Благодаря этому службы безопасности могут оперативно принимать меры по снижению рисков, например, улучшить освещение, пересмотреть схему движения, установить дополнительные предупреждающие знаки и камеры. Такой подход особенно актуален во время зимнего периода, когда погодные условия играют ключевую роль в обеспечении безопасности на дорогах [4].

Цифровые двойники выступают в качестве фундамента для продвижения интеллектуальных и автономных транспортных систем. Современные беспилотные автомобили нуждаются в высокоточном представлении не только дорожной сети, но и всех окружающих объектов, включая дорожные знаки, временные ограничения и специфические правила движения, для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации. На магистралях М-11 «Нева» и ЦКАД проводятся экспериментальные проекты, направленные на создание цифровых моделей дорожных сегментов, которые смогут обмениваться информацией с автомобилями посредством V2X-технологий. Данная система предоставляет водителям актуальную информацию о пробках, дорожных работах, состоянии дорожного покрытия, погодных условиях и даже о планах других участников движения, что в итоге ведет к более комфорtnому, безопасному и экономичному путешествию по трассе [5].

Цифровые двойники выступают ключевым элементом в разработке и аprobации подхода к паспортизации автомобильных дорог на основе создания цифровых двойников с учетом российских нормативных требований [6]. Они обеспечивают единое хранилище данных о конструктивных особенностях дороги, проведенных ремонтах, ее текущем состоянии, а также расположении объектов и инженерных сетей. Такая централизованная база данных повышает эффективность взаимодействия между заказчиком и подрядчиками, минимизирует вероятность ошибок и дублирования информации, упрощая отслеживание и контроль со стороны заказчика. Интеграция цифрового паспорта дороги с кадастровыми и инженерными базами данных существенно упростит задачи проектирования и модернизации объектов транспортной инфраструктуры.

Цифровые модели оказывают существенное влияние на прозрачность и эффективность

контроля над подрядчиками. В частности, при реализации контрактов, охватывающих весь жизненный цикл объекта, от строительства до многолетней эксплуатации, цифровой двойник становится незаменимым инструментом для мониторинга соответствия выполненных работ проектной документации и установленным стандартам.

Помимо технических составляющих, большое значение имеет инвестиция в развитие человеческого капитала и создание надлежащей правовой базы. В данный момент наблюдается нехватка квалифицированных специалистов, владеющих навыками работы с цифровыми двойниками и большими данными в транспортной отрасли, что тормозит темпы и качество внедрения передовых технологий. Для ускорения этого процесса требуется активное совершенствование образовательных курсов в технических вузах и программы профессионального развития персонала на предприятиях. Для эффективного регулирования цифрового пространства необходимо сформировать правовую основу, которая одновременно защитит персональные данные и кибербезопасность, гарантирует доступ к информации, поощряет развитие отечественных технологий и обеспечивает открытость и ответственность в управлении цифровыми системами [7].

Успешное развитие цифровых двойников тесно связано с обеспечением им финансовых ресурсов. В настоящее время финансирование в основном сосредоточено на целевых программах и pilotных проектах, что, безусловно, тормозит масштабное внедрение инновационных технологий. Для создания полноценной инфраструктуры цифровых двойников требуется более широкая государственная поддержка, а также активное привлечение частных капиталов и развитие партнерских отношений между государственными структурами и бизнес-сообществом. Для успешного развития цифровых инноваций необходимо создать благоприятную среду, которая будет поощрять научные исследования и предоставлять поддержку как стартапам, так и компаниям, занимающимся разработкой ИТС.

Исходя из анализа существующих данных о цифровых двойниках автомобильных дорог, можно заключить, что создание и эксплуатация таких систем представляют собой сложный многоэтапный процесс, требующий комплексного подхода. Как показано на рисунке 1, данный процесс включает последовательную реализацию взаимосвязанных этапов, каждый из которых обладает специфическими особенностями и требованиями.

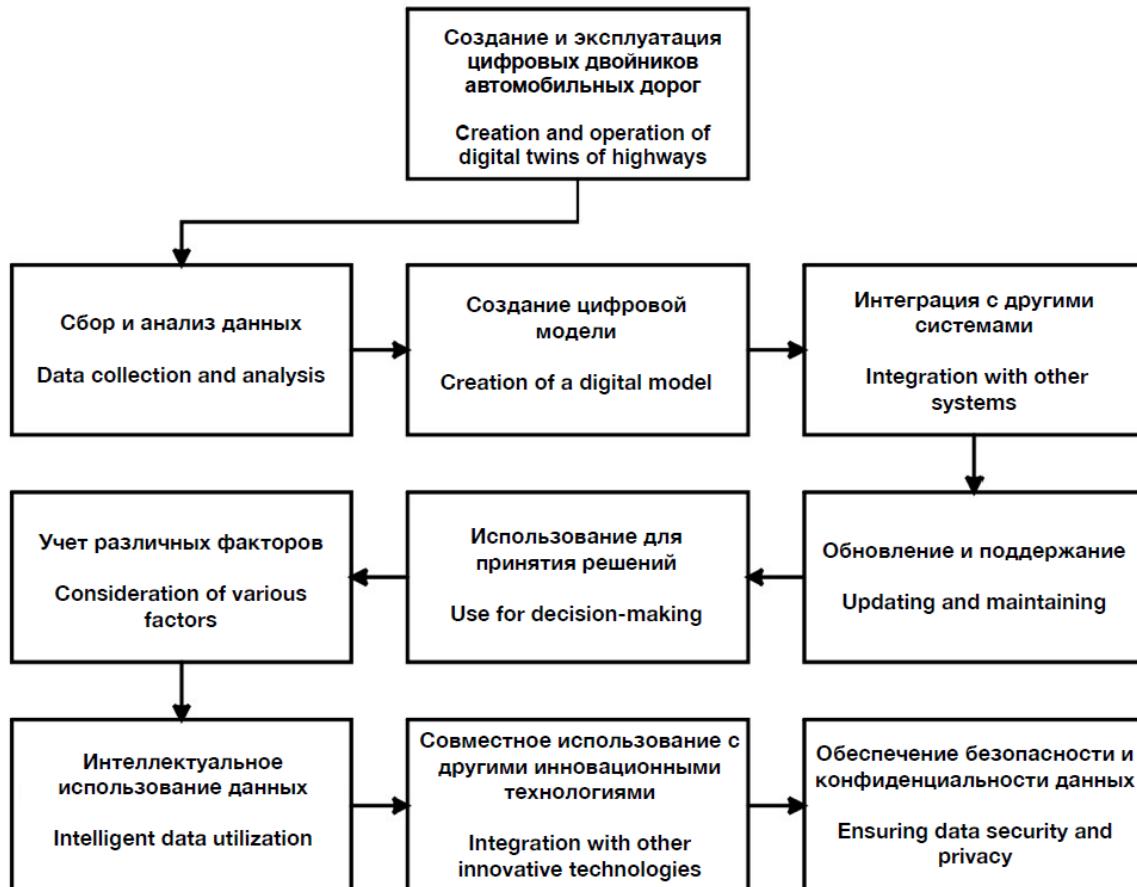


Рисунок 1 – Создание и эксплуатация цифровых двойников автомобильных дорог
Источник: составлено авторами.

*Figure 1 – Creation and operation of digital twins for highways
Source: compiled by the authors.*

В процессе создания цифровых двойников автомобильных дорог ключевым первым шагом выступает сбор и глубокий анализ имеющихся данных. Цель этого этапа – получить исчерпывающую информацию о текущем состоянии дорожной сети и динамике транспортных потоков. Для достижения данной цели применяются разнообразные источники, включая системы видеонаблюдения, датчики движения, GPS-трекеры и другие приборы, обеспечивающие сбор сенсорной информации. После сбора информации она подвергается обработке и анализу с помощью специальных программных приложений, что в итоге приводит к формированию цифровой карты дорожной инфраструктуры [8].

С помощью этих данных создаётся цифровая копия автомобильной дороги, которая

воспроизводит её ключевые свойства и параметры в виртуальном пространстве. Такая модель может содержать сведения о местоположении дорог, их строении и взаимосвязях, а также данные о движении транспорта, дорожных сооружениях и существующей инфраструктуре.

Интеграция цифровых двойников автомобильных дорог с другими управлением и мониторинговыми платформами, такими как системы регулирования светофоров, управления дорожным движением и систем безопас器ности, формирует единый информационный пул. Данная интеграция позволяет осуществлять комплексное управление и надзор за состоянием и функционированием всей дорожной сети.

Чтобы цифровые модели оставались релевантными, их непрерывно совершенствуют. Для этого постоянно собираются и обновляются сведения о трафике, состоянии дорожного покрытия и других факторах. Кроме того, все изменения, возникающие в процессе эксплуатации, должны быть учтены в цифровой модели для ее точности [9].

Цифровые двойники служат инструментом для поддержки решений в разных сферах, например, при составлении оптимальных маршрутов, повышении эффективности транспортных потоков, прогнозировании аварийных и критических ситуаций, а также для оценки действенности существующей инфраструктуры и разработке планов её модернизации.

Цифровые двойники строятся с учетом множества факторов, которые воздействуют на движение и безопасность, таких как погодные аномалии, качество дорожной инфраструктуры, временные рамки и другие нюансы. Благодаря этому создается более реалистичная и многомерная модель, способная адаптироваться к динамике окружающей среды и меняющимся условиям дорожного движения.

Цифровые двойники, благодаря встроенным интеллектуальным алгоритмам и аналитическим инструментам, способны самостоятельно обрабатывать и анализировать поступающие данные, выявлять закономерности, предсказывать происшествия и содействовать принятию решений, основанных на фактических данных. Такая функциональность обеспечивает повышение эффективности управления транспортной сетью и укрепление безопасности дорожного движения [10].

Цифровые двойники тесно интегрируются с другими передовыми технологиями, создавая синергетический эффект в сферах, таких как автономное и беспилотное движение, системы V2X, интернета вещей (*IoT*) и других. Это комплексное технологическое объединение служит мощным инструментом для развития умных городов и повышения уровня жизни их обитателей [11]. Для обработки этих данных применяются методы искусственного интеллекта, в частности машинное обучение, которое используется для прогнозирования износа дорожного покрытия, оптимизации транспортных потоков и моделирования потенциальных аварийных ситуаций. Дополнительно задействуются ГИС-технологии, обеспечивающие пространственный анализ и точную привязку

данных к цифровой картографической основе.

Безопасность и конфиденциальность данных являются приоритетными факторами при разработке и внедрении цифровых двойников. Чтобы предотвратить несанкционированный доступ, взломы и киберугрозы, применяются комплексные подходы, включающие в себя как технические решения, такие как шифрование и защищенные сетевые протоколы, так и организационные меры, например, обучение персонала по безопасной работе с информацией.

Таким образом, цифровой двойник автомобильных дорог представляет собой динамическую систему, объединяющую передовые методы моделирования, обработки данных и прогнозирования. Его эффективность определяется не только техническими возможностями используемых технологий, но и степенью их интеграции, что требует соблюдения стандартов совместимости данных и создания единой информационной среды. Для конкретных проектов состав методов и материалов может варьироваться в зависимости от масштабов – от моделирования отдельных перекрестков до создания комплексных систем управления дорожной сетью региона [12].

В современном мире транспортная инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития городов и регионов. Эффективное управление улично-дорожной сетью (УДС) становится все более важным в условиях роста населения, увеличения автопарка и интенсификации городского движения. В этой связи цифровая трансформация транспортной отрасли становится необходимой мерой для обеспечения устойчивого развития городов и обеспечения безопасности и комфорта транспортного движения [13].

Цифровой двойник УДС включает в себя несколько ключевых элементов, обеспечивающих создание виртуальной модели реальной транспортной инфраструктуры и обеспечивающих возможность эффективного управления и мониторинга.

Первым ключевым элементом является цифровая карта, которая представляет собой основу цифрового двойника, которая виртуально отображает реальную УДС, разработанную с использованием архитектуры локальной динамической карты или других архитектур, и использует четырехслойную модель, как показано на рисунке 2.

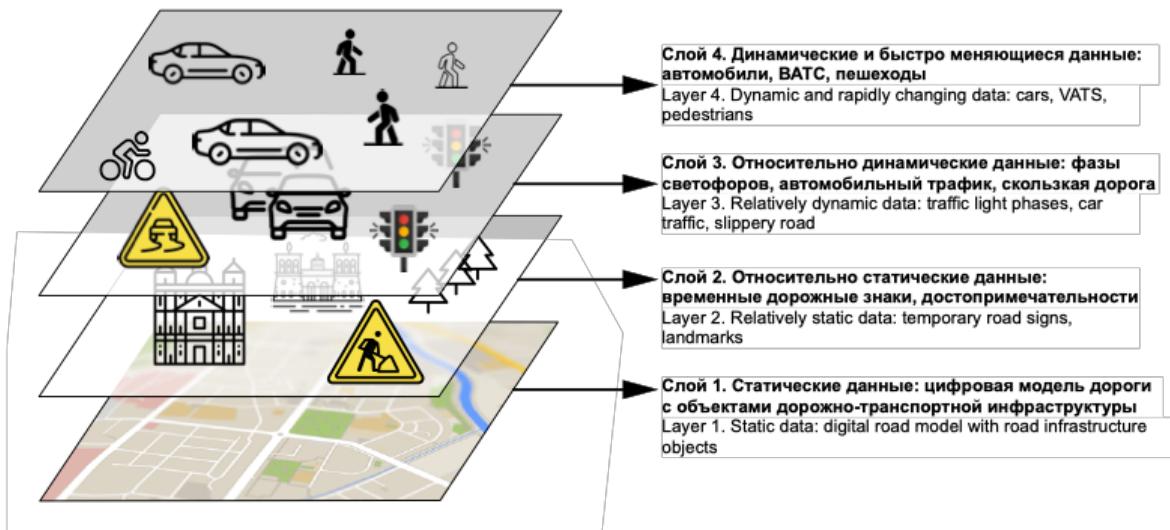


Рисунок 2 – Структура локальной динамической карты

Источник: <https://delta.news/article/mintrans-zaplatit-300-mln-rublej-za-sozdanie-cifrovogo-kopii-trassy-m-11-dlya-bespilotnikov-8278>.

Figure 2 – Structure of the local dynamic map

Source: <https://delta.news/article/mintrans-zaplatit-300-mln-rublej-za-sozdanie-cifrovogo-kopii-trassy-m-11-dlya-bespilotnikov-8278>.

Цифровая модель автомобильной дороги должна содержать высокоточные пространственные и технические данные о количестве проезжих частей, дорожной разметке, дорожных знаках, светофорах, периферийном оборудовании ИТС и схеме организации дорожного движения, с учетом рядности и полос движения. Данная информация должна быть достаточной для решения задач определения местоположения транспортного средства на проезжей части, расчета маршрута его движения по автомобильным дорогам и УДС, включ-

чая перестроение и обгон. Цифровой двойник позволяет перейти к оптимизации светофорного регулирования в реальном времени, обеспечивая переход от статических светофорных циклов, к динамическому адаптивному управлению, учитывающих текущую ситуацию. С помощью получаемых данных с датчиков и камер, алгоритмы ИИ в режиме реального времени корректируют длительность сигналов, обеспечивая «зеленую волну» и приоритет общественному транспорту (рисунок 3).

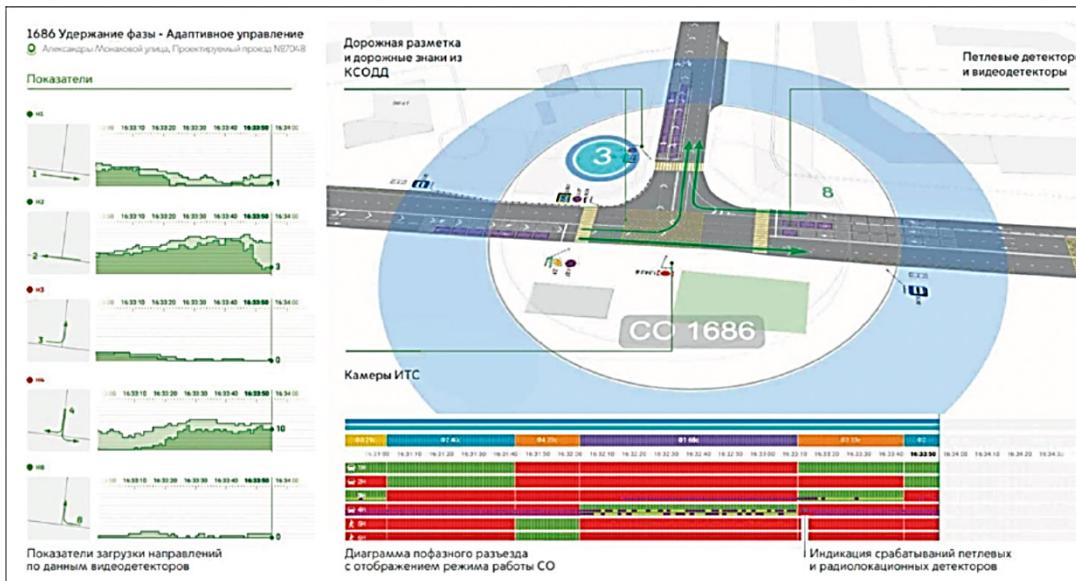


Рисунок 3 – Цифровой двойник светофорного объекта
Источник: журнал «Системы безопасности» 2022. № 2. 31 с.

Figure 3 – Digital twin of the traffic light object
Source: "Safety Systems" Journal – 2022. – №2. – 31 c.

Второй элемент – центр управления, централизованный узел, где собираются, анализируются и обрабатываются данные о дорожном движении и состоянии транспортной инфраструктуры от уже существующих элементов автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД). Центр управления принимает решения на основе полученной информации и координирует действия для оптимизации транспортного потока, улучшения безопасности и обеспечения эффективного функционирования дорожной сети [14].

Третий элемент – это автомобильное бортовое оборудование *OBU*, устанавливаемое в транспортные средства, используемые для проведения испытаний. Предназначено для осуществления информационного обмена

между транспортным средством и дорожно-транспортной инфраструктурой посредством элементов телекоммуникационной инфраструктуры. Бортовое оборудование должно поддерживать возможность передачи информации посредством использования IEEE 802.11p (ETSI ITS-G5) и/или сети подвижной радиотелефонной связи стандартов GSM/WCDMA/LTE; 5G³.

В качестве технологической инфраструктуры, обеспечивающей связь и взаимодействие между различными устройствами и системами в УДС, используется сервисная V2X-платформа. На рисунке 4 изображена коммуникация автомобилей, оборудованных данной технологией.

³Сафиуллин Р.Н., Керимов М.А. Интеллектуальные бортовые системы на автомобильном транспорте. Directmedia, 2017.

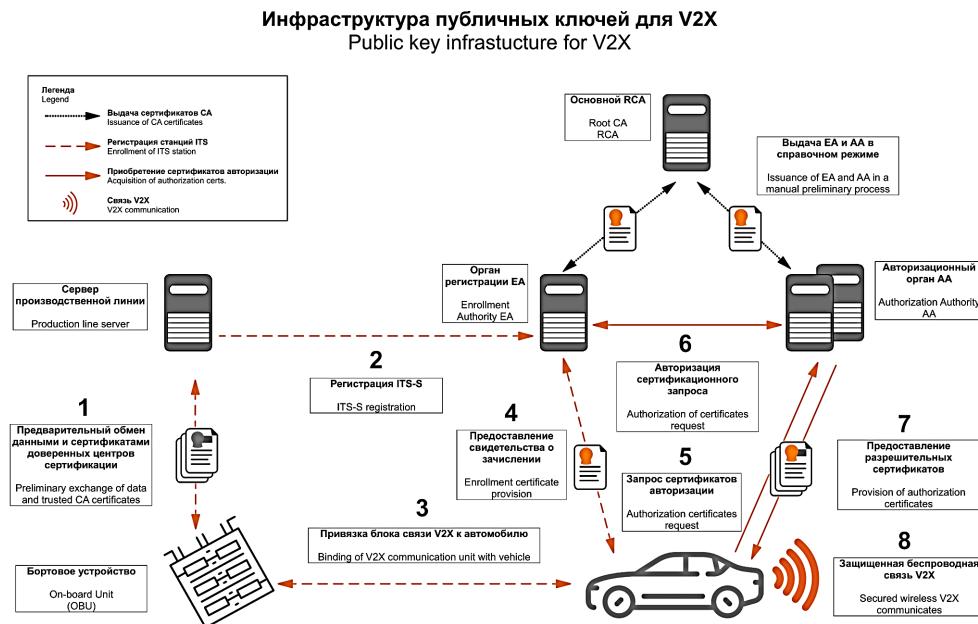


Рисунок 4 – Применение технологий V2X
Источник: <https://iot-automotive.news/gemalto-v2x/>.

Figure 4 – Application of V2X technologies
Source: <https://iot-automotive.news/gemalto-v2x/>.

Подобная платформа обеспечивает передачу данных и команд между транспортными средствами, инфраструктурой, пешеходами и другими участниками дорожного движения, что позволяет им взаимодействовать между собой и с центром управления для координации действий и оптимизации работы системы в целом [15].

Для оценки эффективности внедрения цифровых двойников была разработана теоретическая модель, описывающая совокупный показатель эффективности системы после внедрения цифрового двойника. Модель основана на взвешенном суммировании эффектов от ключевых факторов за вычетом затрат на внедрение и эксплуатацию. Для оценки экономической целесообразности предложено условие, при котором совокупный экономический эффект за определенный период должен покрывать капитальные и операционные затраты. Далее представлена формализованная модель оценки эффективности внедрения цифрового двойника и экономическое обоснование её применения.

Теоретическая модель эффективности

Показатель эффективности системы после внедрения цифрового двойника описывается по формуле

$$E_{\text{после}} = \sum_{i=1}^n w_i \times e_i - \Delta E_{\text{затраты}}, \quad (1)$$

где w_i – весовой коэффициент значимости i -го фактора;

e_i – эффективность от i -го фактора;

n – число ключевых факторов, влияющих на эффективность;

$\Delta E_{\text{затраты}}$ – снижение эффективности из-за затрат на внедрение цифрового двойника.

Наиболее существенными факторами являются:

- уменьшение времени простоя транспортных средств (оптимизация дорожного движения и своевременное устранение проблем снижают задержки);

- снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт автомобильных дорог (цифровой двойник позволяет прогнозировать износ дорожного покрытия и оптимизировать ремонтные работы);

- повышение безопасности дорожного движения (снижение аварийности за счет мониторинга и анализа данных);

- экономия на топливе (оптимизация маршрутов и снижение пробок уменьшают расход топлива).

Таким образом, уравнение (1) приобретает следующий вид по формуле

$$E_{\text{после}} = w_1 \times e_1 + w_2 \times e_2 + w_3 \times e_3 + w_4 \times e_4 - \Delta E_{\text{затраты}}. \quad (2)$$

После создания системы очевидно, что при поддержании работоспособности полезные действия будут также проводиться постоянно в течение времени, значит и вся эффективность от положительных факторов увеличивается со временем.

Экономическая модель эффективности: оценка экономической целесообразности. Эффективность внедрения цифрового двойника должна удовлетворять условию по формуле

$$\sum_{i=1}^n B_i(t) \geq C_k + \int_0^T C_0(t) dt, \quad (3)$$

где B_i – экономический эффект от i -го фактора во времени;

C_k – капитальные затраты на внедрение цифрового двойника;

$C_0(t)$ – операционные затраты на поддержку;

T – горизонт планирования.

При известном снижении убытков от положительных свойств системы и затратах на её содержание возможно рассчитать соотношение инвестиций ко времени, через которое затраченные ресурсы на внедрение системы будут полностью восстановлены. Данное соотношение позволит показать рентабельность внедрения системы цифрового двойника.

Решение обратной задачи с известным горизонтом планирования и выделенными ресурсами на создание системы позволит найти минимальную требуемую эффективность системы цифрового двойника для положительного эффекта на всю систему.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование выявило ряд важных результатов, представленных в виде взаимосвязанных этапов, которые оказывают существенное влияние на совершенствование подходов к оценке эффективности и практической реализации цифровых двойников в российском транспортном секторе.

В рамках первого этапа исследования была создана теоретическая модель, позволяющая количественно оценить эффективность внедрения цифровых двойников автомобильных дорог. Ключевым результатом этой работы явилось формирование комплексной модели, которая определяет эффективность по-

средством расчета интегрального показателя, учитывающего воздействие четырех основных определяющих факторов:

- сокращение простоев транспортных средств;
- уменьшение расходов на содержание и ремонт объектов дорожной сети;
- усиление защиты участников дорожного движения за счет уменьшения количества происшествий;
- снижение расхода топлива за счет рационального планирования маршрутов и сокращения пробок.

Чтобы оценить вклад каждого фактора в модель, используются весовые коэффициенты, определяемые либо экспертным путем, либо с помощью регрессионного моделирования на основе прошлых данных. Важной особенностью модели является то, что она учитывает естественное снижение эффективности, вызванное расходами на внедрение и обслуживание системы, что корректирует общую положительную отдачу от модели.

На втором этапе мы обосновываем экономическую целесообразность внедрения цифровых двойников, используя разработанную модель и выявляя условия, при которых реализация таких проектов будет экономически выгодной. Предложенный экономико-математический инструмент обладает высокой практической значимостью, так как он способен эффективно решать две ключевые задачи, которые тесно взаимосвязаны:

- расчет рентабельности проекта при фиксированных показателях его результативности;
- задача заключается в определении минимального показателя рентабельности, который позволит окупить инвестиции в установленные сроки, при условии ограниченности финансовых ресурсов.

Этот подход отличается своей гибкостью в составлении инвестиционных планов и дает возможность настраивать модель под разные варианты финансирования проектов по цифровой модернизации дорожной инфраструктуры.

На третьем этапе была проведена оценка текущего положения дел и выявлены препятствия, мешающие широкому внедрению цифровых двойников в России. Комплексный анализ позволил выделить и структурировать основные проблемы, тормозящие этот процесс.

Основные выводы исследования систематизированы в таблице, где для каждого направления развития отражены ключевые тенденции, текущее положение дел и требуемые действия.

Таблица
Основные задачи развития цифровых двойников автомобильных дорог
Источник: составлено авторами.

Table
Key development objectives for digital twins of highways
Source: compiled by the authors.

Направление развития	Текущий статус	Необходимые действия
Стандартизация данных	Частичная, отдельные регионы и проекты	Разработка и внедрение федеральных стандартов обмена данными
Интеграция цифровых платформ	Ограниченнная совместимость систем	Создание единой национальной цифровой платформы с открытыми API
Точность и актуальность моделей	Высокая на пилотных участках, локальная	Масштабирование и регулярное обновление данных по всей сети
Кадровый потенциал	Недостаточный, дефицит профильных специалистов	Развитие профильного образования и повышение квалификации
Нормативно-правовое обеспечение	На стадии формирования законодательных актов	Принятие комплексных нормативных документов и регламентов
Финансирование	Ограничено целевыми программами и грантами	Расширение государственного финансирования и привлечение частных инвестиций

Одна из причин, препятствующих массовому внедрению цифровых двойников, – это несовершенство технологической базы во многих регионах. Исследования показали, что лишь 35% субъектов России имеют достаточную телекоммуникационную инфраструктуру для полноценной реализации проектов цифровых двойников.

Для решения обозначенных проблем актуальной задачей является создание отраслевой программы цифровой модернизации дорожного сектора, которая предусматривает организацию центра экспертизы по цифровым двойникам, установление системы сертификации для цифровых решений и введение стимулов для внедрения инновационных технологий.

Результаты исследования предоставляют отправную точку для создания стратегии цифровой модернизации дорожного сектора и послужат основой для разработки государственных инициатив по развитию интеллектуальных транспортных систем в России.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование выявило огромный потенциал цифровых двойников в реорганизации систем управления дорожным движением. Предложенный в ходе работы методический подход предлагает все необходимое для комплексной оценки пользы внедрения подобных технологий.

Изучение полученных данных свидетельствует о том, что внедрение цифровых двой-

ников оказывает синергетический эффект на все сферы управления дорожным движением. В результате отмечается улучшение ключевых показателей, таких как безопасность, пропускная способность транспортной сети, экологическая чистота и экономическая эффективность эксплуатации дорожной инфраструктуры.

Оптимизация процесса принятия инвестиционных решений путем его формализации является ключевым фактором для повышения обоснованности и открытости управленческих действий. Представленные модели и подходы дают возможность не только непосредственно оценивать экономическую эффективность, но и выявлять необходимые параметры внедрения для реализации поставленных целей.

Для успешной реализации потенциала цифровых двойников в масштабах национальной транспортной системы требуется преодоление ряда системных проблем. Ключевыми направлениями развития представляются: формирование комплексной нормативно-правовой базы, разработка отраслевых стандартов и протоколов взаимодействия, создание системы подготовки квалифицированных специалистов, а также развитие механизмов финансирования подобных проектов.

Перспективные направления дальнейших исследований включают апробацию разработанных моделей на данных реальных проектах, изучение вопросов интеграции с перспективными транспортными технологиями, а также разработку комплексных решений в об-

ласти кибербезопасности таких систем. Дальнейшее развитие предложенных подходов будет способствовать созданию методологической основы для цифровой трансформации транспортной отрасли.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о практической значимости разработанных моделей и методик для обоснования решений по внедрению цифровых двойников в системах организации дорожного движения. Реализация предложенных подходов может способствовать повышению эффективности управления транспортной инфраструктурой и созданию основы для развития интеллектуальных транспортных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thonhofer E. et al. Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. 2023; 4: C. 311-324. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2023.3266800>
2. Свистельников А.А. [и др.] Востребованность испытаний и исследований интеллектуальных транспортных систем и отдельных ее элементов, в том числе направленных на обеспечение движения высокоматематизированных транспортных средств // Транспортное дело России. 2024. № 4. С. 188–191. EDN QNPAKW.
3. Диденко Д.Н. Цифровая трансформация сферы транспорта и дорожного хозяйства России // Вестник науки. 2024. Т. 2, №12 (81). С. 973–982.
4. Кравченко П.А., Плотников А.М., Олещенко Е.М. О цифровых технологиях обеспечения безопасности дорожного движения в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. № 4 (77). С. 12–16.
5. Ризаева Ю.Н. Государственная политика в области развития беспилотных систем // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 5. С. 11–19.
6. Комарова А.А., Акулова А.О. Паспортизация автомобильных дорог с использованием цифровых технологий и двойников // Московский экономический журнал. 2024. № 9 (6). С. 55–73. DOI 10.55186/2413046X_2024_9_6_279 . EDN SZRPLJ
7. Wu D. et al. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions // Applied Sciences. 2025. № 15 (4). Article ID 1911. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041911>
8. Акимов А.Е. [и др.] К вопросу о создании цифрового двойника для строительства автомобильной дороги // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 25–34.
9. Чекина Е.В. Построение цифровых двойников автомобильных дорог в среде интеллектуальной транспортной геоинформационной системы // IT & Transport = ИТ & Транспорт: сб. науч. статей. 2021. С. 88.
10. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics // Advanced Engineering Informatics. 2023. № 55: Article ID 101858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101858>
11. Евстигнеев И.А., Шмыгинский В.В. Вопросы взаимодействия беспилотных транспортных средств с дорожной инфраструктурой // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 6 (85). С. 17–21.
12. Argota Sánchez-Vquerizo J. Getting real: The challenge of building and validating a large-scale digital twin of Barcelona's traffic with empirical data // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. №11 (1). С. 24. <https://doi.org/10.3390/ijgi11010024>
13. Иванов С.А. [и др.] Концепция построения цифрового двойника города // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. № 9 (4): С. 5–23.
14. Hilmani A., Maizate A., Hassouni L. Automated real-time intelligent traffic control system for smart cities using wireless sensor networks // Wireless Communications and mobile computing. 2020. Article ID: 8841893, 28 с. <https://doi.org/10.1155/2020/8841893>
15. Бирюков Т.А., Иневаткина А.П. Умные дороги: влияние инновационных технологий V2X на безопасность и эффективность // Вестник науки. 2025. Т. 4, № 1 (82): С. 963–967.

REFERENCES

1. Thonhofer E., et al. (2023). "Infrastructure-based Digital Twins for Cooperative, Connected, Automated Driving and Smart Road Services." *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 4: 311-324. DOI: 10.1109/OJITS.2023.3266800
2. Svistel'nikov A. A., et al. Demand for Testing and Research of Intelligent Transport Systems and Their Individual Components, Including Those Aimed at Ensuring the Movement of Highly Automated Vehicles. *Transport Business of Russia* 2024; 4: 188–191. (In Russ.). EDN QNPAKW.
3. Didenko D.N. Digital Transformation of Russia's Transport and Road Sector. *Bulletin of Science*. 2024; 2(12)(81): 973-982. (In Russ.).
4. Kravchenko P.A., Plotnikov A.M., Oleshchenko E.M. On Digital Technologies for Ensuring Road Safety in the Russian Federation. *Transport of the Russian Federation: Journal on Science, Practice, Economics*. 2018; 4(77): 12-16. (In Russ.).
5. Rizaeva Yu.N. State Policy in the Development of Unmanned Systems. *Intelligence. Innovations. Investments*, 2023; 5: 11-19 (In Russ.).
6. Komarova A. A., Akulov A. O. Road Passortization Using Digital Technologies and Digital Twins. *Moscow Economic Journal*. 2024; 9 (6): 55–73. (In Russ.). DOI 10.55186/2413046X_2024_9_6_279 EDN SZRPLJ
7. Wu D., et al. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Sur-

vey of Current Applications, Challenges, and Future Directions. *Applied Sciences*, 2025; 15(4): 1911. DOI: 10.3390/app15041911

8. Akimov A.E., et al. On the Creation of a Digital Twin for Road Construction. *System Technologies*. 2023; 4(49): 25-34. (In Russ.).

9. Chekina E.V. Building Digital Twins of Highways in an Intelligent Transport GIS Environment. *IT & Transport: Collection of Scientific Articles*. 2021; 88. (In Russ.).

10. Kušić K., Schumann, R., Ivanjko, E. A Digital Twin in Transportation: Real-time Synergy of Traffic Data Streams and Simulation for Virtualizing Motorway Dynamics. *Advanced Engineering Informatics*. 2023; 55: Article ID 101858. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101858

11. Evstigneev I.A., Shmytinsky, V.V. Issues of Interaction Between Autonomous Vehicles and Road Infrastructure. *Transport of the Russian Federation: Journal on Science, Practice, Economics*. 2019; 6(85): 17-21. (In Russ.).

12. Argota Sánchez-Vquerizo, J. Getting Real: The Challenge of Building and Validating a Large-scale Digital Twin of Barcelona's Traffic with Empirical Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022; 11(1): 24. DOI: 10.3390/ijgi11010024

13. Ivanov S.A., et al. Concept for Building a City's Digital Twin. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*. 2020; 9(4): 5-23. (In Russ.).

14. Hilmani A., Maizate, A., Hassouni, L. Automated Real-time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2020; Article ID 8841893. DOI: 10.1155/2020/8841893

15. Biryukov T.A., Inevatkina, A.P. Smart Roads: The Impact of V2X Innovative Technologies on Safety and Efficiency. *Bulletin of Science*. 2025; 4,1(82): 963-967. (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Курбатов Д.С. Определение ключевых целей и задач с последующим проведением анализа существующих методик совершенствования цифровых двойников автомобильных дорог, отработка теоретического материала на практике на основе предложенных решений на участках дорожной сети.

Старostenко А.В. Тщательный подбор и изучение научной литературы по теме, всесторонняя оценка полученных данных, а также последующая систематизация результатов и формулировка итоговых выводов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kurbatov Dmitriy S. Defining key goals and objectives with the following analysis of existing methodologies for improving digital twins of highways, practical testing of theoretical materials on proposed solutions for the road network segments.

Starostenko Andrey V. Selection and review of scientific literature on the topic, comprehensive evaluation of the obtained data, systematization of the results and formulation of final conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курбатов Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), начальник отдела безопасности и диагностики организации дорожного движения АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, Измайловский бульвар, д. 11, строение 1, помещение 29Н, кабинет 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5413-8878>,
e-mail: dimkur21@yandex.ru

Старostenко Андрей Владимирович – АО «ПО РосДорСтрой», ведущий специалист по сопровождению объектов (175400, г. Валдай, Комсомольский пр., д. 1 А), магистр Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Москва, Ленинградский пр-т., 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,
e-mail: starostenko2637@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kurbatov Dmitriy S. – Postgraduate Student of the Department of Transport Systems and Road Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Head of the Road Traffic Safety and Road Traffic Management Diagnostics Department «STAR-Project» JSC (2nd Krasnoarmeyska ya st., 4, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5413-8878>,
e-mail: dimkur21@yandex.ru

Starostenko Andrey V. – Leading specialist in facility maintenance, «RosDorStroy» JSC Production association, St. Petersburg, Russia, Master's degree, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University-MADI (Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, 125319)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,
e-mail: starostenko2637@mail.ru