

УДК 656.2:004.942

## Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли

**Зуев Денис Владимирович** — канд. техн. наук, генеральный директор. Научные интересы: нейронные сети, цифровые двойники. E-mail: zuevdv@gmail.com

ООО «Синтез АТ», Россия, 199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр., д. 28/29

**Для цитирования:** Зуев Д. В. Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 4 (44). С. 33–46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46

**Аннотация.** Представлен обзор развития интеллектуальных транспортных систем в железнодорожной сфере, центральным элементом которых стала технология цифровых двойников инфраструктуры и подвижного состава. Актуальность темы обусловлена глобальной цифровой трансформацией железнодорожной отрасли, направленной на повышение безопасности, надежности и эффективности перевозочного процесса. **Цель:** провести сравнительный анализ ключевых проектов, технологических решений и подходов к внедрению цифровых двойников в Европейском союзе, Китае и России, а также определить их роль в повышении эксплуатационных показателей. **Методы:** рассмотрены инициативы Европейского союза (Shift2Rail, Europe's Rail) с акцентом на стандартизацию и предиктивное обслуживание, масштабные государственные программы Китая (Digital Railway Plan до 2035 г.), отличающиеся высокой скоростью и комплексной интеграцией технологий (BIM, 5G-R), а также российский прагматичный подход ОАО «РЖД» (АСУ BIM, «Умный локомотив», цифровой двойник сортировочной станции), направленный на постепенное интеллектуальное управление активами к 2030 году. Сделан вывод, что все регионы используют единый технологический базис (BIM-платформы, IoT/5G-сети, AI/ML-аналитика и симуляционные модели). **Результаты:** подтверждают, что цифровые двойники обеспечивают раннее обнаружение дефектов и прогнозно-превентивное обслуживание, что ведет к снижению аварийности, повышению надежности, сокращению неплановых простоев до 30 % и экономической эффективности, снижению расходов на обслуживание до 30 % и оптимизации операций.

**Ключевые слова:** интеллектуальные транспортные системы, цифровой двойник, железнодорожная инфраструктура, BIM-моделирование, предиктивное обслуживание, искусственный интеллект, надежность, эффективность

**2.9.8** — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); **2.3.6** — методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

### Введение

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) — это совокупность современных цифровых технологий (коммуникации, датчики, вычислительные системы) для сбора и обработки данных о состоянии транспортной системы, управ-

ления движением и информирования участников перевозочного процесса [1]. В железнодорожной отрасли ИТС охватывают цифровизацию управления движением поездов, мониторинг состояния инфраструктуры и подвижного состава, системы

автоматического управления и поддержки принятия решений. За последние 5–10 лет железные дороги активно внедряют IoT-сенсоры, системы связи (4G/5G), искусственный интеллект (ИИ) и большие данные для повышения эффективности и безопасности перевозок.

Одним из ключевых направлений цифровой трансформации стала технология «цифровых двойников» — виртуальных моделей объектов инфраструктуры и техники, позволяющих в реальном времени отражать состояние физической системы и прогнозировать ее поведение. Цифровой двойник — это программная интерактивная копия реального объекта или процесса, полностью имитирующая его характеристики и поведение [2]. Работая с цифровым двойником, можно управлять жизненным циклом объекта: проводить виртуальные испытания и оптимизацию, мониторить состояние в режиме реального времени и предсказывать будущие изменения [3]. В железнодорожной сфере цифровые двойники применяются для моделирования инфраструктуры (пути, станции, мосты), подвижного состава (локомотивы, вагоны), технологических процессов (график движения, сортировка вагонов) и даже окружающей среды. Эта технология стала глобальным трендом цифровизации транспорта: ведущие железнодорожные компании рассматривают цифровые двойники как инструмент для улучшения проектирования, эксплуатации и обслуживания объектов [4]. Ниже рассмотрены ключевые проекты внедрения цифровых двойников инфраструктуры в Европейском союзе, Китае и России, используемые технологические решения, сравнительный анализ подходов, а также тенденции развития и влияние на безопасность, надежность и эффективность.

## Ключевые проекты и инициативы цифровых двойников по регионам

### Европейский союз (ЕС)

В Европе за последнее десятилетие тема цифровых двойников железных дорог получила мощный импульс благодаря совместным научно-исследовательским инициативам. Программа Shift2Rail

(2014–2020) и ее преемник Europe's Rail Joint Undertaking (с 2021) объединили производителей, операторов и научные организации для разработки инноваций. В рамках Shift2Rail были реализованы проекты по применению цифровых двойников в различных подсистемах железной дороги. Например, серии проектов X2Rail изучали цифровые модели для системы управления и сигнализации, проекты Pivot — для подвижного состава, In2Track — для инфраструктуры, In2Stempo — для энергосистем [4]. Эти исследования показали, что цифровой двойник может существенно улучшить прогнозирование и контроль текущих и будущих показателей железнодорожных активов (рельсов, стрелочных переводов, локомотивов и пр.).

На основе результатов Shift2Rail новая стратегия Europe's Rail ставит целью создание интегрированного «железнодорожного цифрового двойника» всей системы. В опубликованной стратегической программе исследований одним из «трансформирующих» проектов назван Railway Digital Twin, Simulation and Virtualisation, предполагающий разработку единой платформы цифрового двойника, охватывающей все элементы — подвижной состав, инфраструктуру, энергоснабжение, сигнализацию — и их взаимосвязи. Планируется, что такая всеобъемлющая модель позволит отрасли постоянно улучшать детализацию и функциональность цифровых копий, чтобы не только понимать прошлое и настоящее состояния объектов, но и моделировать сценарии будущего с прогнозированием последствий для эксплуатации и обслуживания [4]. В итоге ожидается значительный эффект для проектирования развития железнодорожной системы и оптимизации ее работы.

Параллельно с программами ЕС Международный союз железных дорог (Union Internationale des Chemins de fer (фр.), UIC) ведет работу по стандартизации данных и моделей. UIC инициировал проект Railway Digital Modelling, целью которого является определение общего данного формата и онтологии для цифровых двойников железнодорожной системы (проект OntoRail) с учетом наработок таких инициатив, как IFC Rail, Eulynx, Linx4Rail и других. Создание единой универсальной модели железно-

дорожной системы (RailSystemModel, RSM) и позволяя позволит разным организациям обмениваться цифровыми моделями инфраструктуры. Кроме того, в UIC сформированы рабочие группы по применению искусственного интеллекта (Artificial Intelligence, AI) — в первую очередь для предиктивного обслуживания на основе данных цифровых двойников [5]. Европейские железные дороги также внедряют цифровые модели на практике: так, компания Network Rail (Великобритания) и другие операторы создают цифровые двойники отдельных узлов (мостов, тоннелей, станций) для мониторинга их состояния, а Deutsche Bahn в Германии разрабатывает «цифровую железную дорогу» (Digital Rail Germany) с элементами виртуального моделирования сети. В Италии компания Italferr получила отраслевую награду за проект цифрового двойника железнодорожной инфраструктуры, используя платформу Bentley Systems [6]. Эти примеры подтверждают высокий интерес Европы к технологии цифровых двойников как к ключевому элементу ИТС на транспорте.

### **Китай**

Железнодорожная отрасль Китая за последние годы совершила рывок в цифровизации, и технологии цифровых двойников заняли важное место в стратегиях развития. China State Railway Group (China Railway) в 2023 году опубликовала программу Digital Railway Plan, согласно которой к 2035 году планируется завершить цифровую трансформацию железных дорог Китая [7]. Промежуточные цели — существенно повысить уровень цифровизации к 2027 году, добиться «интеллектуализации» ключевых направлений и охватить цифровыми технологиями все основные бизнес-сценарии эксплуатации. Для реализации этих амбиций делается упор на развитие цифровой инфраструктуры связи и данных. В частности, Китай внедряет специализированную сеть 5G-R для железных дорог, однако признает, что ее возможностей недостаточно для всех потребностей «цифровой железной дороги», таких как передача массивов данных с поездов и «умное» обслуживание на основе цифровых двойников. Поэтому в опытной

эксплуатации задействуют технологии сверхширокополосной связи (например, миллиметрового диапазона), чтобы обеспечить высокоскоростную передачу данных от поездов. Так, корпорация ZTE совместно с China Mobile в 2023 году реализовали первый в отрасли проект планирования сети связи на основе цифрового двойника для высокоскоростной линии: была создана виртуальная модель маршрута и радиоканалов на участке Пекин — Тяньцзинь, что позволило оптимизировать размещение базовых станций 5G и улучшить качество покрытия без трудоемких полевых измерений [8]. Этот проект демонстрирует применение концепции двойника не только к физическим объектам, но и к сетям связи, обеспечивающим работу ИТС.

Китайские железные дороги активно используют BIM-технологии (Building Information Modeling) и цифровое моделирование при строительстве новых линий. Яркий пример — высокоскоростная магистраль Пекин — Чжанцзякоу, открытая к зимней Олимпиаде 2022 года, ставшая первой в Китае железнодорожной линией со сплошным применением BIM на всех этапах жизненного цикла [9]. Проектировщик, China Railway Engineering Corporation (CRECG), создал единую среду данных на платформе Bentley ProjectWise для междисциплинарной координации, 3D-моделирования и управления качеством строительства. В результате удалось сократить сроки проектирования на три месяца и снизить затраты; проект получил международную премию в номинации «Цифровой двойник рабочего процесса в сфере железных дорог» [9]. Кроме того, китайские исследовательские институты и компании разрабатывают цифровые двойники отдельных объектов инфраструктуры и подвижного состава. Так, например, создаются высокодетализированные 3D-модели крупных вокзалов (проект цифрового двойника нового вокзала Гуанчжоу), отрабатываются системы «цифровых депо» для управления парком высокоскоростных поездов и их обслуживанием, внедряются виртуальные симуляторы для подготовки машинистов. В сфере эксплуатации китайские железные дороги внедряют «умные» диспетчерские центры, где сводные цифровые модели всей сети помогают

управлять движением, особенно в условиях высокоинтенсивного сообщения. Таким образом, Китай сочетает масштабное государственное планирование (дорожная карта до 2035 года) с быстрым внедрением конкретных решений, от BIM на стройках до цифровых двойников в обслуживании и управлении перевозками [9].

### **Российская Федерация**

В России внедрение цифровых технологий на железнодорожном транспорте также стало приоритетом последних лет. ОАО «РЖД» в своей цифровой трансформации одним из основных направлений называет создание цифрового двойника инфраструктуры. На уровне высшего руководства сформировано понимание, что технология цифровых двойников позволит повысить прозрачность процессов строительства и эксплуатации, тестировать новые решения и снизить затраты на содержание объектов [3]. В 2021 году на Объединенном ученом совете ОАО «РЖД» было объявлено, что компания создает корпоративную BIM-платформу (АСУ BIM), завершение которой планируется к 2024 году, после чего начнется разработка цифровых двойников объектов инфраструктуры, и к 2030 году РЖД рассчитывает перейти к интеллектуальному управлению активами с применением технологий искусственного интеллекта [10]. Фактически к 2030 году прогнозируется появление системы, где ИИ на основе данных цифрового двойника будет помогать управлять инфраструктурой и техническими средствами.

Уже сейчас в России реализуются пилотные проекты цифровых двойников. К примеру, разработана информационная система «цифровой двойник сортировочной станции», которая активно используется на федеральном уровне для управления работой крупных железнодорожных узлов [11]. Эта система моделирует процессы формирования и расформирования составов на сортировочной горке в виртуальной среде. Благодаря ей можно проигрывать различные сценарии маневров и операций без вмешательства в реальный процесс, что позволяет оптимизировать схемы роспуска вагонов и график работы станции. Циф-

ровой двойник сортировочного комплекса предоставляет диспетчерам и операторам ряд инструментов: сбор телеметрии с датчиков (прохождение вагонов, параметры состава) в режиме реального времени, визуализация на электронном диспетчерском табло, возможность задавать расписание прибытий/отправлений и автоматически рассчитывать оптимальный план сортировки. Система интегрирована с технологиями IoT (англ. *Internet of things* — интернет вещей) и позиционирования персонала: отслеживает местонахождение работников на станции через мобильные терминалы и с помощью встроенных алгоритмов ИИ предлагает оптимальное распределение бригад по задачам. В итоге, согласно отчетам, внедрение такого двойника позволило заказчику гибче реагировать на изменения, улучшить качество и скорость обработки вагонопотоков, удовлетворяя растущие требования рынка логистики [11].

Другой пример — проект «Умный локомотив» в РЖД. Это комплекс средств предиктивной аналитики для тягового подвижного состава, где применяются нейронные сети, IoT-датчики и цифровые модели узлов локомотива [12]. В реальном времени система оценивает техническое состояние ключевых агрегатов, выявляет аномалии в работе и прогнозирует износ. Цифровой двойник локомотива дает возможность перейти от планово-предупредительного ремонта к прогнозно-превентивному обслуживанию, когда замена детали проводится перед ожидаемым отказом, что повышает коэффициент готовности локомотивов и снижает расходы. Кроме того, РЖД развивает цифровые модели стационарных объектов (мостов, тоннелей) с использованием датчиков деформации, вибрации и температуры, данные с которых поступают в виртуальную модель для непрерывного мониторинга технического состояния сооружений. Российские научные организации (например, ВНИИЖТ, Российский университет транспорта) создали центры компетенций по цифровому управлению жизненным циклом инфраструктуры, где отрабатываются подходы к интеграции BIM, систем диагностики и цифровых двойников. Важным шагом стало введение с 2022 года нормативного требования, со-



гласно которому все новые проекты строительства ж/д объектов с госфинансированием должны выполняться с применением BIM-моделирования [12]. Это обеспечивает накопление актуальных цифровых моделей инфраструктуры, на основе которых затем формируются полноценные двойники для эксплуатации. В целом Россия следует мировым трендам: создается корпоративная платформа данных, реализуются пилоты цифровых двойников для повышения эффективности, и к началу 2030-х годов ожидается переход от локальных решений к масштабному интеллектуальному управлению сетью.

### **Технологические решения: платформы, стандарты и инструменты**

Развитие цифровых двойников в железнодорожной ИТС опирается на комплекс передовых технологий.

#### ***Единые цифровые платформы и BIM***

Базой для цифрового двойника инфраструктуры служат точные цифровые модели объектов. В отрасли широко внедряется BIM — информационное моделирование, обеспечивающее 3D/4D-модели путей, станций, инженерных сооружений. В ЕС разработан стандарт IFC Rail (расширение формата Industry Foundation Classes для железных дорог) для совместимости BIM-моделей различных систем. Компании используют платформы (Bentley ProjectWise, Autodesk Tandem и др.) для хранения и совместной работы с модельными данными. Создание общих сред данных стало приоритетом: например, РЖД разрабатывает АСУ BIM как единую базу данных обо всех объектах инфраструктуры [13], а UIC продвигает OntoRail/Rail System Model для стандартизации описания железнодорожных элементов [5]. Эти платформы позволяют объединять разрозненные данные (чертежи, облака точек, GIS-информацию) в едином цифровом пространстве, необходимом для развертывания полноценного двойника.

#### ***Датчики, IoT и телематика***

Физический мир «питает» цифровой двойник данными через сеть датчиков и систем связи. На путях и объектах устанавливаются тысячи сенсо-

ров (деформационные и температурные датчики, вибродатчики, счетчики осей, камеры и пр.), образуя промышленный интернет вещей. Например, в России ВНИИЖТ разработал беспроводные автономные датчики для мониторинга состояния земляного полотна, мостов и других объектов с передачей данных по IoT-сетям. Подвижной состав оснащается телематикой: бортовые модули собирают данные о работе компонентов локомотивов (давления, токи, температура узлов) и передают их в облачные хранилища. Для высокой пропускной способности применяются современные коммуникации: сети LTE/5G, спутниковые каналы. В Китае, как отмечалось, разворачивается 5G-R сеть для критически важных данных управления движением, дополняемая миллиметровыми радиолниями для массивных потоков данных (например, выгрузка за смену десятков гигабайт бортовых журналов локомотива) [8]. Телеизмерительные системы обеспечивают поступление оперативных данных в цифровой двойник, позволяя ему всегда соответствовать актуальному состоянию реальной инфраструктуры.

#### ***Искусственный интеллект и аналитика***

Сами по себе данные ценны лишь при грамотной обработке. Поэтому в архитектуре ИТС используются модули AI/ML для анализа больших данных, получаемых от цифрового двойника. Алгоритмы машинного обучения выявляют скрытые закономерности в показаниях датчиков — предсказывают дефект рельса по еле заметным вибрационным аномалиям либо рассчитывают оставшийся ресурс подшипника колесной пары по динамике температуры. В Европе акцент сделан на предиктивную аналитику: так, Европейская ассоциация железнодорожной промышленности (UNIFE) и железнодорожные операторы отмечают, что одно из главных преимуществ цифрового двойника — возможность предугадывать отказ того или иного компонента и тем самым перейти к проактивному обслуживанию [3]. RZD Digital заявляет, что использование технологий двойников и AI позволяет в разы увеличить число тестовых сценариев и выявлять риски до их реализации на практике [12].

Также ИИ применяется для оптимизационных задач, например подбора оптимального графика движения поездов по результатам имитационных экспериментов или планирования ресурсов ремонтов так, чтобы минимизировать простой техники. Отдельное направление — компьютерное зрение: анализ изображений (с дронов, камер мониторинга) для оценки состояния объектов и обновления цифровой модели (например, автоматическое выявление просадок пути или трещин).

### **Модели и симуляция процессов**

Цифровые двойники позволяют проводить многовариантное моделирование операций железной дороги. Программные комплексы симуляции (например, OpenTrack, AnyLogic, собственные разработки) интегрируются с данными двойника для проигрывания сценариев: от имитации движения поездов по расписанию до моделирования работы сортировочного узла. Благодаря этому железнодорожники могут «прокручивать» в виртуальной среде чрезвычайные ситуации, новые графики и технические решения. На цифровом полигоне можно проверить, как изменение расписания на узле повлияет на скопление вагонов или как модернизация контактной сети отразится на пропускной способности. Такие эксперименты снижают потребность в реальных испытаниях, экономя время и ресурсы [11]. Согласно европейским проектам, визуальная 3D/4D-среда цифрового двойника способствует улучшению межведомственного сотрудничества: инженеры, эксплуататоры и планировщики достигают лучшего взаимопонимания благодаря работе с единой моделью [6].

### **Стандарты и кибербезопасность**

Для успешного функционирования ИТС требуется унификация протоколов и обеспечение безопасности данных. В железнодорожной отрасли принимаются стандарты обмена данными от датчиков (например, протоколы Rail IoT), форматы описания объектов (упомянутые IFC Rail, RailSystemModel и др.), стандарты на интерфейсы между системами управления. Поскольку цифровой двойник тесно связан с реальной ин-

фраструктурой, большое внимание уделяется кибербезопасности — защищенности каналов связи и хранилищ от несанкционированного доступа с целью предотвращения вмешательства в работу транспорта. ИТС-платформы строятся с учетом требований надежности (круглосуточная доступность, резервирование) и масштабируемости, ведь объем данных от тысяч объектов инфраструктуры чрезвычайно велик.

Вышеописанные технологические элементы в совокупности образуют экосистему, внутри которой цифровой двойник железной дороги может полноценно функционировать. Мониторинговые системы непрерывно снабжают его данными, стандартизованные модели обеспечивают совместимость, а инструменты AI и симуляции превращают данные в полезные решения. Все это ложится в основу интеллектуальных транспортных систем нового поколения.

### **Сравнительный анализ подходов и зрелости внедрения**

Подходы к развитию цифровых двойников и ИТС в железнодорожной отрасли ЕС, Китая и России различаются, отражая особенности управления и приоритеты каждой из сторон.

#### **Европейский союз**

Характеризуется координированным научно-инновационным подходом. Большинство проектов реализуется консорциумами в рамках общеевропейских программ (Horizon 2020, Shift2Rail, Horizon Europe). Сильный акцент на стандартизации и интероперабельности: ЕС стремится создать единые архитектуры, чтобы цифровые решения были совместимы между разными странами и операторами. Зрелость внедрения неоднородна: отдельные операторы (например, SNCF, Deutsche Bahn, Network Rail) уже имеют реализованные цифровые двойники некоторых объектов и функций, тогда как общесистемный цифровой двойник еще в стадии исследований [6]. Европа продвинута в предиктивном техобслуживании, многие железные дороги используют системы диагностики с элементами цифровых моделей (например, циф-

ровой профиль пути для мониторинга износа). Однако процесс внедрения может замедлиться из-за необходимости согласования с многочисленными участниками и обеспечения соответствия единым нормам кибербезопасности ЕС [6]. В целом ЕС сейчас на этапе перехода от пилотов к масштабированию: в ближайшие 5 лет (до 2030 года) ожидается развертывание решений digital twin в рамках программы Europe's Rail по всей Европе.

### **Китай**

Применяет государственно ориентированный, масштабный подход. Под эгидой правительства установлены четкие целевые показатели (полная цифровизация к 2035 г., ключевые успехи к 2027 г.). Благодаря централизованному руководству внедрение идет быстро и комплексно: при строительстве новых высокоскоростных линий сразу закладываются BIM и цифровые модели, одновременно модернизируется связь (5G-R) и центры обработки данных. Зрелость внедрения в отдельных аспектах очень высока: например, китайские высокоскоростные магистрали уже оснащены тысячами датчиков и камер, данные которых интегрированы в централизованные платформы. Интеллектуальные вокзалы и автоматизированное управление движением (АТО) в метрополитенах крупных городов показывают, как цифровые двойники используются для оптимизации пассажиропотоков и графиков. Отличительной чертой являются масштаб и интеграция: китайские проекты объединяют сразу множество технологий (IoT, AI, 5G, цифровой двойник) в единой системе. По уровню практического применения Китай в некоторых областях лидирует: например, системы автоматического диагностирования подвижного состава с цифровыми моделями узлов или платформы управления инфраструктурой на основе данных уже действуют на национальном уровне. К 2030-м годам прогнозируется полная интеграция большинства процессов в единый цифровой контур, при котором все элементы инфраструктуры будут представлены цифровыми двойниками, управляемыми в режиме реального времени. Ключевыми вызовами для Китая станут обеспечение безопасности столь масштабного киберфизического комплекса и подготов-

ка необходимого количества квалифицированных специалистов для работы с этими системами.

### **Россия**

Следует эволюционному подходу, сочетая заимствование мировых лучших практик с учетом отечественной специфики. Зрелость внедрения пока точечная, имеются передовые пилоты (смарт-станции, «умные» локомотивы), но они не охватывают еще всю систему. Сильная сторона — наличие научных школ и понимание важности стандартизации: РЖД активно сотрудничает с университетами и НИИ, создает центры компетенций. Ограничивающим фактором могут быть финансовые и санкционные условия: доступность импортного программного обеспечения, оборудования сенсоров и т. п. Тем не менее РЖД декларирует приверженность мировому тренду и ставит амбициозные цели до 2030 года [10]. Российский подход можно назвать прагматичным: сначала создается фундамент (нормативная база BIM, единая платформа данных), затем запускаются пилотные проекты в ключевых наиболее окупаемых направлениях (грузовые узлы, локомотивы), и уже на основе результатов принимаются решения о масштабировании. Если ЕС движется через исследовательские консорциумы, Китай — через государственный план, то Россия — через корпоративную стратегию РЖД с постепенной цифровой трансформацией. К 2030 году разрыв в уровне зрелости может сократиться: Россия активно внедряет проверенные решения. В частности, в «РЖДстрой» используется опыт BIM-проектов Китая, а европейские наработки по предиктивному ремонту адаптируются для отечественных условий.

### **Общий вывод сравнения**

Европейский союз лидирует в проработке стандартов и совместимости, Китай — в темпах и масштабе реальных внедрений, Россия — в таргетированной адаптации и интеграции решений в существующую систему. Все три региона признают ключевую роль цифровых двойников в будущей железной дороге, но идут к этой цели несколькими разными маршрутами. При этом наблю-

дается и сотрудничество: международные организации (УИС, академические союзы) обеспечивают обмен опытом между ЕС, Китаем и Россией, что способствует выработке лучших практик для всех.

## **Тенденции и направления развития**

Анализируя последние 5–10 лет развития ИТС на железнодорожном транспорте, можно выделить несколько отчетливых тенденций и перспективных направлений, связанных с цифровыми двойниками инфраструктуры:

### **1. Предиктивная диагностика и обслуживание**

Интеграция цифровых двойников с системами технической диагностики — один из главных трендов. Виртуальные модели инфраструктуры и поездов, непрерывно обновляемые данными датчиков, позволяют реализовать обслуживание по техническому состоянию. Например, двойник железнодорожного полотна, получая данные от дефектоскопных тележек и вибродатчиков, выявляет зарождающиеся дефекты рельсов или просадки балласта и сигнализирует о необходимости ремонта до того, как произойдет авария. Искусственный интеллект в этой связке играет роль движка предиктивной аналитики: он обрабатывает большие массивы исторических и текущих данных, чтобы спрогнозировать время отказа компонента. Таким образом, техническая служба получает раннее предупреждение о проблеме и может спланировать ремонт в удобное окно, а не в авральном режиме. Уже сейчас европейские железные дороги отмечают, что применение цифровых двойников в симуляции работы инфраструктуры помогает определить узлы и детали, находящиеся в зоне риска отказа [4]. В перспективе данная тенденция усилится: цифровые двойники станут основой для автономных систем диагностики, когда ИИ сам формирует заявки на обслуживание, заказывает запасные части и т. д. Для России и Китая это особенно актуально ввиду огромной сети: автоматизация диагностики через двойники позволит удерживать надежность инфраструктуры на высоком уровне при оптимальных затратах.

### **2. Диспетчеризация и управление движением**

Цифровой двойник всей железнодорожной сети открывает новые возможности для диспетчерских центров. Традиционно диспетчеры опираются на телеметрию и регламенты, но с виртуальной копией сети они могут видеть динамическую модель трафика: где находится каждый поезд, состояние каждого участка пути, прогнозные конфликты в графике. Тенденция такова, что системы управления движением переходят от реактивных к проактивным. На основе данных двойника можно просчитывать наперед последствия тех или иных действий (например, задержку поезда из-за внеплановой остановки) и автоматически предлагать диспетчеру оптимальное решение (обходной маршрут, изменение приоритетов и т. п.). Китай внедряет элементы такого прогнозирующего управления на высокоскоростных линиях, где автоматизированные центры контроля используют симуляцию, чтобы увеличивать пропускную способность без ущерба пунктуальности. В России цифровой двойник сортировочной станции уже позволяет оптимизировать операции формирования составов и тем самым улучшать общее течение перевозочного процесса [11]. В будущем возможно появление «цифровых диспетчеров» — интеллектуальных модулей, способных в реальном времени перестраивать график движения сотен поездов, моделируя различные варианты на цифровом близнеце сети, прежде чем применять их на практике. Это прямо связано и с темой автоматического управления поездами: для безопасного внедрения беспилотных грузовых составов или автономных электричек необходима надежная виртуальная модель, на которой алгоритмы будут «обучаться» ведению движения. Таким образом, цифровой двойник станет неотъемлемой частью центра управления перевозками, повышая их адаптивность и устойчивость к сбоям.

### **3. Эксплуатационное планирование и оптимизация ресурсов**

Еще одно направление — использование цифровых двойников для стратегического планирования инфраструктуры и перевозок. Виртуальная мо-



дель железной дороги позволяет проводить what-if анализ на уровне месяцев и лет: что будет, если увеличить скорость движения на участке, построить второй путь, запустить новый маршрут грузопотока? Имитация в цифровом пространстве дает ответы о влиянии на пропускную способность, износ, экономические показатели. Поэтому регуляторы и компании все активнее применяют двойники при разработке инвестиционных программ и расписаний. Европейский взгляд включает связь цифровых двойников с целями устойчивого развития — моделируя разные сценарии, железные дороги ищут пути повысить энергоэффективность и экологичность. Например, виртуальный полигон может просчитать экономию энергии при разных алгоритмах вождения поездов или оценить, как изменения в расписании снизят выбросы CO<sub>2</sub> за счет сокращения простоев локомотивов. В операционном плане цифровые двойники помогают оптимизировать использование подвижного состава и персонала. Уже реализованные системы (например, сортировочная станция в России) распределяют локомотивные бригады и маневровую технику более эффективно [4]. Эта тенденция будет углубляться с развитием нейросетевых рекомендационных систем. На основе данных о всех процессах (движение, ремонт, погрузка) ИТС будет подсказывать, как лучше составить план работы на сутки/неделю, куда направить дополнительный локомотив, где есть узкие места в графике и т. д. К 2030-м годам можно ожидать появления комплексных решений OPM (Operations Planning and Management) нового поколения, полностью основанных на цифровом двойнике инфраструктуры, который непрерывно синхронизирован с реальностью.

#### **4. Интеграция смежных систем и «метаверс» инфраструктуры**

Цифровые двойники в железнодорожной отрасли начинают тесно интегрироваться с другими информационными системами: АСУ предприятий, ГИС, городскими цифровыми платформами. Возникает концепция своеобразного «метаверса» транспортной инфраструктуры, где все объекты связаны цифровыми представительствами. В ЕС

инициатива Destination Earth (DestinE) предполагает создание цифровых моделей большей части инфраструктуры Европы, и железные дороги являются частью этой экосистемы [4]. Это открывает путь к интеграции ж/д двойников с умными городами, например совместное планирование в единой цифровой среде услуг городского транспорта и ж/д сообщения для оптимизации «последней мили» для пассажира. Другая смежная область — логистические цифровые платформы: железнодорожные двойники могут подключаться к цифровым цепочкам поставок, предоставляя информацию о движении грузов в реальном времени и прогнозируя сроки прибытия вагонов на терминалы. Такая интеграция улучшит прозрачность для клиентов и повысит конкурентоспособность железной дороги. Технологически это требует унификации протоколов (что и делают UIC/OSJD на международном уровне) и больших вычислительных мощностей, но тенденция ясно прослеживается: границы между отдельными ИТС стираются, формируется единое информационное пространство транспорта. В этом пространстве цифровой двойник ж/д инфраструктуры станет одним из ключевых узлов, связывающих железную дорогу с автомобилями (через интеллектуальные переезды, Intelligent Grade Crossings), энергетическими сетями (учет энергопотребления подвижного состава в энергосистеме), промышленностью (грузотправители подключаются напрямую к планам движения поездов).

#### **5. Повышение киберустойчивости и надежности моделей**

По мере растущей зависимости перевозочного процесса от цифровых двойников усиливается тренд на обеспечение их надежности. Идет работа над методиками верификации и валидации моделей, чтобы виртуальная модель всегда адекватно отражала физическую реальность. Появляется понятие Technical Authority по цифровым двойникам: например, Европейское агентство по железным дорогам (ERA) обсуждает введение регламентации для цифровых моделей как элемента обеспечения безопасности (вплоть до сертификации критичных

алгоритмов ИИ). Таким образом, одна из тенденций — нормативное закрепление использования цифровых двойников. Вероятно, в ближайшие годы появятся стандарты, обязывающие применять цифровой двойник для сложных инфраструктурных проектов (аналогично тому, как BIM уже стал обязательным для бюджетного строительства в РФ [10]). Также развивается направление кибербезопасности: уделяется внимание защите данных цифровых двойников от искажений и атак, резервированию систем управления на случай сбоев цифровой модели. Все это важно для доверия к технологии и ее устойчивого развития.

Подводя итог, тенденции можно охарактеризовать коротко: умнее, связнее, предиктивнее. Железнодорожные ИТС с цифровыми двойниками стремятся быть более умными (AI для оптимизации и прогнозов), более связными (интеграция между системами и видами транспорта) и более предсказуемыми (превентивное обслуживание и планирование). Эти направления развития взаимно усиливают друг друга и ведут к трансформации традиционной железной дороги в высокотехнологичную систему управления жизненным циклом инфраструктуры.

## **Роль цифровых двойников в повышении безопасности, надежности и эффективности**

Внедрение цифровых двойников инфраструктуры уже сейчас приносит ощутимые выгоды, а в перспективе кардинально повысит безопасность, надежность и эффективность управления железнодорожной сетью.

### **1. Безопасность**

Цифровые двойники позволяют значительно улучшить безопасность движения и работ на транспорте. Во-первых, за счет раннего обнаружения дефектов: мониторинговые системы, интегрированные с виртуальной моделью, выявляют отклонения (начало разрушения рельса, просадка насыпи, сбой в оборудовании) на самой ранней стадии и подают сигнал, пока ситуация не переросла в отказ [11]. Это сокращает число аварий и инцидентов. Во-вторых, двойники дают возможность моделировать

аварийные ситуации и обучать персонал без риска для реальных людей и техники. Например, виртуальная тренировка действий при сходе подвижного состава или имитация пожара в тоннеле на цифровом полигоне позволяют отработать навыки оперативного реагирования. Как отмечается в [11], с помощью цифровых моделей можно проводить такие тренинги, что в итоге значительно повышает уровень безопасности на станции и магистрали. В-третьих, точная оценка состояния каждого элемента инфраструктуры благодаря цифровым двойникам позволяет снизить влияние человеческого фактора при оценке безопасности. Решения принимаются на основе объективных данных и ИИ-прогнозов, а не субъективных суждений. Наконец, система, предугадывающая события, делает движение более предсказуемым, снижая вероятность неожиданных ситуаций на путях. Все это ведет к снижению травматизма, аварийности и общему укреплению безопасности перевозок.

### **2. Надежность и бесперебойность работы**

Надежность железнодорожной инфраструктуры определяется устойчивостью к отказам и способностью оперативно восстанавливать работоспособность. Цифровой двойник существенно повышает эти показатели. Благодаря предиктивной диагностике ремонтные бригады проводят замену оборудования перед наступлением отказа, то есть плановые простои заменяют внезапные поломки. Это повышает коэффициент готовности инфраструктуры и подвижного состава. Например, платформа «Умный локомотив» с цифровым двойником узлов уже сейчас позволяет отслеживать состояние агрегатов и автоматически выводить информацию о необходимости обслуживания до возникновения неисправности [12]. В результате локомотивы реже выходят из строя на линии. Сходным образом цифровые модели инженерных сооружений прогнозируют срок службы компонентов (балок моста, опор контактной сети) и рекомендуют оптимальное время их замены, предотвращая внезапные обрушения или обрывы проводов. Еще один аспект — устойчивость к внешним воздействиям: двойник может включать данные о погоде,

сейсмике, что позволяет заблаговременно принять меры (например, снизить скорость поездов при прогнозируемом перегреве рельсов или увеличить частоту осмотров перед сильным паводком). Тем самым надежность всей системы растет, так как она всегда подготовлена к ожидаемым воздействиям. Если же сбой все-таки произошел, цифровой двойник помогает быстрее восстановить работу: зная точное состояние и имея симуляционную модель, диспетчеры могут оперативно просчитать обходные варианты движения, а инженеры — найти корень проблемы. В совокупности, по оценкам RZD Digital, внедрение технологий цифрового двойника способно снизить затраты и потери от неплановых простоев до 30 % за счет повышения надежности и оптимизации процессов [12]. Надежная железная дорога — это пунктуальные поезда, довольные клиенты и стабильная работа без «узких мест», чего и позволяют добиться современные ИТС.

### **3. Эффективность и экономичность управления**

Экономический эффект от цифровых двойников проявляется сразу в нескольких плоскостях. Прежде всего, это оптимизация операций. Виртуальные модели дают возможность находить наиболее эффективные способы организации перевозок. Как было показано на примере сортировочной станции, внедрение системы цифрового двойника позволило сократить время обработки вагонов и улучшить использование ресурсов, повысилась пропускная способность станции без дорогостоящих капитальных вложений [11]. Подобные оптимизационные задачи, решаемые на модели, в реальности приводят к экономии топлива, электроэнергии, более рациональному привлечению локомотивов и вагонов. Второй аспект — снижение эксплуатационных расходов. Мониторинг через двойника и профилактика поломок уменьшают затраты на аварийные ремонты и продлевают срок службы активов. По данным РЖД, применение цифровых двойников способно снизить расходы на обслуживание инфраструктуры и техники до 30 % благодаря предотвращению повреждений и повышению эффективности работ [12]. Точный

учет и анализ данных двойника позволяет лучше планировать бюджеты: корректно рассчитывать стоимость эксплуатации объектов и процессов и выявлять избыточные траты. Еще один фактор эффективности — ускорение планирования и принятия решений. Когда у руководства есть наглядная модель и аналитические прогнозы, время на планирование сокращается (по оценкам, на 20 % и более [12]), а решения принимаются обоснованно на основе цифр. Это уменьшает потери от неоптимальных решений. К примеру, цифровой двойник может показать, что определенный перегон скоро станет «бутылочным горлышком», и инвестиции направят именно туда, где это нужнее, избежав ошибочных вложений. Наконец, цифровые двойники улучшают качество обслуживания клиентов — за счет повышения точности расписаний, прозрачности статуса перевозки груза, быстрого реагирования на запросы. Это косвенно повышает экономическую эффективность за счет роста грузо- и пассажиропотока на железной дороге. Цифровые двойники выполняют функцию интеллектуального помощника менеджмента: обеспечивают принятие обоснованных решений в оптимальные сроки при минимальных издержках.

### **Заключение**

Цифровые двойники инфраструктуры стали центральным элементом интеллектуальных транспортных систем в железнодорожной отрасли, обеспечивая новую глубину понимания и контроля над сложнейшим хозяйством железных дорог. За последнее десятилетие в ЕС, Китае и России накоплен значительный опыт, показывающий практическую ценность этой технологии. Благодаря цифровым двойникам железные дороги повышают безопасность (за счет проактивного предотвращения аварий и улучшения подготовки персонала), улучшают надежность работы (минимизируя отказы и увеличивая готовность техники) и повышают эффективность перевозочного процесса (оптимизируя операции и снижая затраты). Впереди дальнейшая интеграция цифровых моделей, совершенствование стандартов и повсеместное распространение этих решений. Можно ожидать,

что уже к началу 2030-х годов цифровой двойник станет таким же привычным и обязательным инструментом управления железной дорогой, как сегодня диспетчерский центр, и без него невозможно будет представить ни строительство новых линий,

ни ежедневную эксплуатацию. Интеллектуальные транспортные системы, опирающиеся на цифровые двойники, прокладывают путь к более устойчивой, эффективной и умной железнодорожной сети будущего — в Европе, Азии и по всему миру.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 56829—2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения = Intelligent transport systems. Terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2015 г. № 2150-ст: дата введения: 2016-06-01. М.: Стандартинформ, 2016. 13 с.
2. Glaessgen E. H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference (Honolulu, HI, USA, 23–26 April 2012). American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
3. Spanevello T. Digital Twins: Accelerating the Digital Transformation in the Rail Sector // Global Railway Review. 2021. 01 July. URL: <http://www.globalrailwayreview.com/article/120887/digital-twins-rail> (дата обращения: 28.09.2025).
4. Rail Strategic Research and Innovation Agenda — December 2020 // European Rail Research Advisory Council. 2020. 01 December. URL: <http://errac.org/publications/rail-strategic-research-and-innovation-agenda-december-2020> (дата обращения: 28.09.2025).
5. Digital Modelling Workshop. 30 June 2021. Webinar Slidepack // International Union of Railways. URL: <http://uic.org/events/digital-modelling-workshop> (дата обращения: 28.09.2025).
6. The Case for a Federated Digital Model of the Rail System / A. Magnien, B. Janssen, G. Dessagne, P. Tane // Global Railway Review. 2022. 20 October. URL: <http://www.globalrailwayreview.com/article/138386/the-case-for-a-federated-digital-model-of-the-rail-system> (дата обращения: 28.09.2025).
7. Crisan O. Italferr's AI-Powered Digital Twin for Serravalle Tunnel // Bentley's Blog. 2025. 23 October. URL: <http://blog.bentley.com/software/yii-winner-bridges-and-tunnels-category-italferr-s-p-a> (дата обращения: 25.10.2025).
8. Wang T. The Intelligent Beijing–Zhangjiakou High-Speed Railway // Engineering. 2021. Vol. 7, Iss. 12. Pp. 1665–1672. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.006.
9. China Mobile and ZTE Achieve Industry's First Digital Twin-Based Precise Network Planning for High-Speed Rail // ZTE Official Website. 2023. 10 November. URL: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-and-zte-achieve-industrys-first-digital-twin-based-precise-network-planning-for-high-speed-rail> (дата обращения: 28.09.2025).
10. Кадик Л. Цифровые двойники на железной дороге. К 2030 году искусственный интеллект будет управлять транспортной инфраструктурой // Гудок.RU. 2021. 21 октября. URL: <http://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1583619/> (дата обращения: 28.09.2025).
11. Ольгейзер И. А. Цифровой двойник сортировочной горки // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 1. С. 20–22. DOI: 10.34649/AT.2020.1.1.003.
12. «Умный локомотив» увеличит производительность депо на 22 % // РЖД Цифровой. 2022. 08 июля. URL: <http://rzdigital.ru/projects/umnyy-lokomotiv-velichit-proizvoditelnost-depo-na-22/> (дата обращения: 28.09.2025).
13. Об установлении случаев, при которых застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства: постановление Правительства Российской Федерации от 05 марта 2021 года № 331 (ред. от 20 декабря 2022 года № 2357).

Дата поступления: 21.10.2025

Решение о публикации: 08.11.2025

# Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry

**Denis V. Zuev** — PhD in Engineering, General Director. Research interests: neural networks, digital twins.  
E-mail: zuevdv@gmail.com

Sintez AT LLC, 28/29, Sredny prospect, Vasilievsky Island, Saint-Petersburg, 199004, Russia

**For citation:** Zuev D. V. Development of Intelligent Transport Systems: Digital Twins in the Railway Industry. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, No. 4 (44), Pp. 33–46. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-444-33-46. (In Russian)

**Abstract.** *An overview of the evolution of intelligent transport systems within the railway sector is presented, highlighting the pivotal role of “digital twins” technology for both infrastructure and rolling stock. The relevance of this topic arises from the ongoing global digital transformation within the railway industry, which aims to enhance the safety, reliability and efficiency of the transportation processes. **Purpose:** to conduct a comparative analysis of major projects, technological solutions and approaches to the implementation of digital twins in the European Union, China, and Russia, while also assessing their impact on operational performance. **Methods:** the analysis incorporates initiatives from the European Union, such as Shift2Rail and Europe’s Rail, which emphasize standardization and predictive maintenance; extensive Chinese government programmes such as the Digital Railway Plan set for completion by 2035, recognized for its emphasis on high speed and integrated technologies (such as BIM and 5G-R); and the pragmatic strategies adopted by Russian Railways (ACS BIM, the “Smart Locomotive”, and the digital twin of the marshalling yard), all aimed at achieving intelligent asset management by 2030. The findings indicate that all regions are utilizing a common technological foundation, encompassing BIM platforms, IoT/5G networks, AI/ML analytics, and simulation models. **Results:** the results demonstrate that digital twins facilitate early defect detection and predictive preventive maintenance, resulting in fewer accidents, increased reliability, reduced unplanned downtime by up to 30%, and improved economic efficiency, with maintenance costs reduced by up to 30% and operations optimized.*

**Keywords:** *intelligent transport systems, digital twin, railway infrastructure, BIM modelling, predictive maintenance, artificial intelligence, reliability, efficiency*

## REFERENCES

1. GOST R 56829—2015. Intellektualnye transportnye sistemy. Terminy i opredeleniya [GOST R 56829—2015. Intelligent transport systems. Terms and definitions]. Effective from June 01, 2016. Moscow, StandartInform Publishing House, 2016, 13 p. (In Russian)
2. Glaessgen E. H., Stargel D. S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, HI, USA, April 23–26, 2012*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012, 14 p. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
3. Spanevello T. Digital Twins: Accelerating the Digital Transformation in the Rail Sector, *Global Railway Review*. Published online at July 01, 2021. Available at: <http://www.globalrailwayreview.com/article/120887/digital-twins-rail> (accessed: September 28, 2025).
4. Rail Strategic Research and Innovation Agenda — December 2020, *European Rail Research Advisory Council*. Published online at December 01, 2020. Available at: <http://errac.org/publications/rail-strategic-research-and-innovation-agenda-december-2020> (accessed: September 28, 2025).
5. Digital Modelling Workshop. 30 June 2021. Webinar Slidepack, *International Union of Railways*. Available at: <http://uic.org/events/digital-modelling-workshop> (accessed: September 28, 2025).



6. Magnien A., Janssen B., Dessagne G., Tane P. The Case for a Federated Digital Model of the Rail System, *Global Railway Review*. Published online at October 20, 2022. Available at: <http://www.globalrailwayreview.com/article/138386/the-case-for-a-federated-digital-model-of-the-rail-system> (accessed: September 28, 2025).
7. Crisan O. Italferr's AI-Powered Digital Twin for Serravalle Tunnel, *Bentley's Blog*. Published online at October 23, 2025. Available at: <http://blog.bentley.com/software/yii-winner-bridges-and-tunnels-category-italferr-s-p-a> (accessed: October 25, 2025).
8. Wang T. The Intelligent Beijing–Zhangjiakou High-Speed Railway, *Engineering*, 2021, Vol. 7, Iss. 12, Pp. 1665–1672. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.006.
9. China Mobile and ZTE Achieve Industry's First Digital Twin-Based Precise Network Planning for High-Speed Rail, *ZTE Official Website*. Published online at November 10, 2023. Available at: <http://www.zte.com.cn/global/about/news/china-mobile-and-zte-achieve-industrys-first-digital-twin-based-precise-network-planning-for-high-speed-rail> (accessed: September 28, 2025).
10. Kadik L. Tsifrovye dvoyniki na zheleznoy doroge. K 2030 godu iskusstvennyy intellekt budet upravlyat transportnoy infrastrukturoy [Digital Twins on the Railway. By 2030, Artificial Intelligence Will Manage Transport Infrastructure], *Gudok.RU*. Published online at October 21, 2021. Available at: <http://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1583619/> (accessed: September 28, 2025). (In Russian)
11. Olgezyer I. A. Tsifrovoy dvoynik sortirovochnoy gorki [Digital Twin Sorting Yard], *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2020, No. 1, Pp. 20–22. DOI: 10.34649/AT.2020.1.1.003. (In Russian)
12. “Umnyy lokomotiv” uvelichit proizvoditelnost depo na 22 % [“Smart Locomotive” to Increase Depot Productivity by 22 %], *RZhD Tsifrovoy* [RZD.Digital]. Published online at July 08, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/projects/umnyy-lokomotiv-uvelichit-proizvoditelnost-depo-na-22/> (accessed: September 28, 2025). (In Russian)
13. Ob ustanovlenii sluchaev, pri kotorykh zastroyshchikom, tekhnicheskim zakazchikom, litsom, obespechivayushchim ili osushchestvlyayushchim podgotovku obosnovaniya investitsiy, i (ili) litsom, otvetstvennym za ekspluatatsiyu obekta kapitalnogo stroitelstva, obespechivayutsya formirovaniye i vedeniye informatsionnoy modeli obekta kapitalnogo stroitelstva [On establishing cases in which the developer, technical customer, person ensuring or carrying out the preparation of investment justification, and (or) the person responsible for the operation of a capital construction project ensure the formation and maintenance of an information model of the capital construction project]: Decree of the Government of the Russian Federation No. 331 dated March 05, 2021 (as amended on December 20, 2022 No. 2357). (In Russian)

Received: 21.10.2025

Accepted: 08.11.2025