

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2025 vol. 2

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 2, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2025



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 2, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Railcar monitoring system based on BLE and LoRaWAN

Sh.Sh. Kamaletdinov¹ 

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The architecture of a railway rolling stock monitoring system using Bluetooth Low Energy (BLE) and LoRaWAN technologies is proposed. The aim of the development is to increase the efficiency of accounting and control of wagons by digitalizing the process. The method is to equip each car with a compact BLE beacon that transmits an identifier and telemetry, and collect these signals using LoRaWAN-enabled gateways. The key elements of the architecture are BLE beacons on wagons and stationary BLE/LoRaWAN gateways forming a multi-level star-within-a-star network. The expected advantages of the system are energy efficiency (long-term operation of beacons from a battery), a wide coverage area thanks to LoRaWAN, automated data collection in close to real time, a reduction in the proportion of manual labor and improved accuracy of operational monitoring of the location of wagons.

Keywords: Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN, BLE beacon, BLE/LoRaWAN gateway, railcar monitoring, IoT, RSSI-based positioning, gateway placement, energy efficiency, MQTT

Система мониторинга вагонов на основе BLE и LoRaWAN

Камалетдинов Ш.Ш.¹ 

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: Предлагается архитектура системы мониторинга подвижного состава железных дорог с использованием технологий Bluetooth Low Energy (BLE) и LoRaWAN. Целью разработки является повышение эффективности учёта и контроля вагонов за счёт цифровизации процесса. Метод заключается в оснащении каждого вагона компактным BLE-маяком, передающим идентификатор и телеметрию, и сборе этих сигналов с помощью шлюзов с поддержкой LoRaWAN. Ключевыми элементами архитектуры служат BLE-маяки на вагонах и стационарные BLE/LoRaWAN-шлюзы, образующие многоуровневую сеть «звезда в звезде». Ожидаемые преимущества системы – энергоэффективность (многолетняя работа маяков от батареи), широкая зона покрытия благодаря LoRaWAN, автоматизированный сбор данных в режиме, близком к реальному времени, снижение доли ручного труда и улучшение точности оперативного контроля местоположения вагонов.

Ключевые слова: Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN, BLE-маячок, BLE/LoRaWAN-шлюз, мониторинг вагонов, IoT, RSSI-позиционирование, размещение шлюзов, энергоэффективность, MQTT

1. Введение

Цифровизация железнодорожного транспорта и применение технологий Интернета вещей (IoT) становятся ключевыми направлениями повышения эффективности и безопасности перевозок. Современные IoT-решения позволяют автоматизировать мониторинг подвижного состава, снижая зависимость от человеческого фактора и обеспечивая прозрачность управления парком [1].

Традиционные методы мониторинга имеют ограничения. Спутниковые трекеры (GPS/ГЛОНАСС) обеспечивают высокую точность, но требуют прямой видимости спутников, установки вне корпуса вагона и подключения к сотовой сети. Это повышает стоимость оборудования, увеличивает потребление энергии и усложняет обслуживание [2]. RFID-системы дешевле и эффективны на контрольных точках, однако не обеспечивают непрерывный мониторинг и требуют

затратной инфраструктуры с чувствительностью к помехам [2].

Комбинация Bluetooth Low Energy (BLE) и LoRaWAN представляет собой перспективное решение. BLE-маяки позволяют автономно передавать идентификаторы и телеметрию на короткие дистанции с минимальным энергопотреблением [3]. LoRaWAN, в свою очередь, обеспечивает дальнюю и энергоэффективную передачу этих данных на центральный сервер, охватывая большие территории [3]. Такая двухуровневая архитектура даёт масштабируемое, автономное и экономически оправданное решение для массового оснащения вагонов.

Опыт зарубежных железнодорожных операторов подтверждает эффективность подхода. Французская SNCF развернула сеть из сотен LoRaWAN-шлюзов в партнёрстве с Actility и использует платформу ThingPark для сбора данных с тысяч устройств [4]. Швейцарская SBB применила трекеры Abcaway, которые работают до 5 лет и обновляют данные о местоположении вагонов с точностью до 20 метров.

 <https://orcid.org/0000-0002-4004-9736>



Помимо крупных операторов, в развитии таких систем участвуют индустриальные компании и сообщества. Платформы вроде ChirpStack и The Things Network поддерживают интеграцию через MQTT и HTTP, упрощая внедрение в корпоративные ИТ-системы. Коммерческие устройства, такие как шлюзы MOKO LW003-B и GeoTek, сочетают BLE-сканирование с LoRaWAN-передачей и работают в автономном режиме от батареи [4]. Таким образом, использование BLE/LoRaWAN открывает новые возможности в рамках концепции «цифровой железной дороги».

Работы [5,6,7] отражают поэтапное развитие исследований по применению IoT в железнодорожном транспорте. В [5] проведён сравнительный анализ беспроводных технологий и обоснован выбор LoRaWAN как оптимальной по энергоэффективности, дальности и независимости от операторов связи. В работе [6] разработана инфраструктура LoRaWAN: выбраны сетевые серверы (Actility, The Things Network), протестированы шлюзы и датчики, даны рекомендации по их применению. Работа [7] посвящена практической апробации рабочей модели отслеживания вагонов с интеграцией в платформу визуализации Tago, что подтвердило применимость решений в условиях, близких к эксплуатации. Таким образом, исследования представляют последовательный переход от выбора технологии к проектированию инфраструктуры и её опытному внедрению.

Цель статьи — представить методику и результаты проектирования гипотетической системы мониторинга

вагонов на основе BLE–LoRaWAN. В работе описывается архитектура сети, обзор оборудования, моделирование сценариев эксплуатации и преимущества по сравнению с традиционными решениями.

2. Методика исследования

Архитектура и топология сети

Система построена по многоуровневой схеме. На вагонах устанавливаются BLE-маяки, передающие уникальные идентификаторы и телеметрию (рис.1). Стационарные или мобильные шлюзы (BLE + LoRaWAN) принимают эти сигналы и пересылают данные на сервер через LoRa-сеть. Сеть организована по топологии «звезда звёзд»: BLE-маяки работают на «последней миле», а LoRaWAN — на магистральной передаче данных. Такая архитектура обеспечивает масштабируемость, избыточность и отказоустойчивость [5][6].

Аппаратные компоненты

Каждый вагон оснащается BLE-маячком в герметичном корпусе (IP65/67), работающем до 5 лет от батареи. Маяк вещает идентификатор, RSSI и опциональную телеметрию (температура, ускорение и др.). Мощность и частота передачи настраиваются. Радиус действия — до 100 м на открытом воздухе и 10–20 м в застроенной среде. Кодировка UUID позволяет однозначно связать маяк с конкретным вагоном.

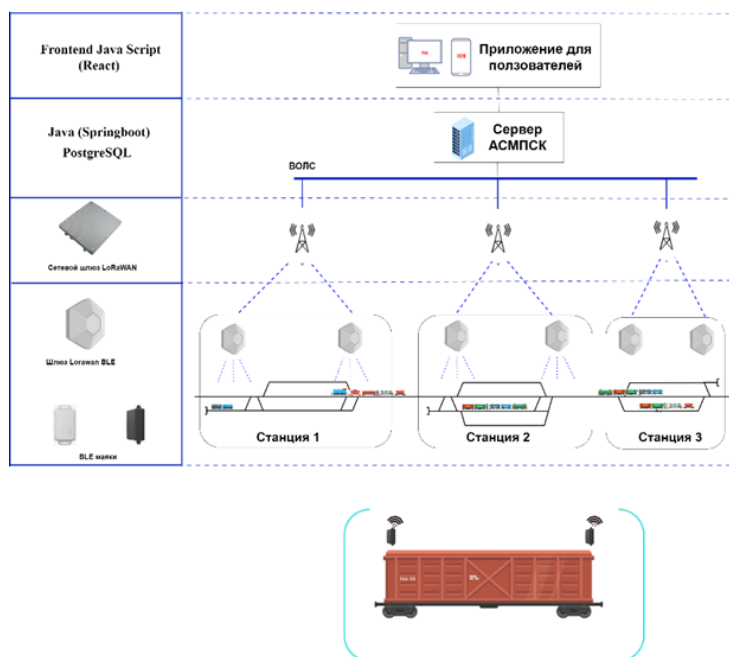


Рис. 1. Архитектура и топология сети на основе BLE/LoRaWAN

Шлюзы объединяют BLE-приёмник и LoRaWAN-модем. Они принимают BLE-сигналы от десятков маяков и отправляют данные на сервер через LoRaWAN. Типичный пример — WavePointer Gateway или MOKO LW003-B с поддержкой Ethernet, Wi-Fi и LTE [7]. Шлюзы работают в диапазоне 863–870 МГц (EU868), используют 8 каналов приёма и внешние антенны LoRa

с дальностью до 15 км. BLE-антенны встроены. Корпуса защищены, предназначены для внешнего монтажа.

Каждый шлюз конфигурируется под частотный план (EU868 или RU864), задаются сетевые параметры (DevAddr, NetID), каналы, мощность передачи. Устройства BLE, передающие через LoRaWAN, регистрируются по OTAA (Over-the-Air Activation),

обеспечивая безопасность и масштабируемость.

Шлюзы фильтруют BLE-устройства по сигнатуре UUID или MAC, игнорируя «шум» от смартфонов и других систем. Поддерживаются разные режимы передачи: непрерывная, пакетная, с агрегацией или усреднением RSSI, что оптимизирует энергопотребление и пропускную способность.

Данные передаются либо по MQTT-топикам (например, `application/railwagons/deviceID/up`), либо через REST API (HTTP POST-запросы). Серверная часть подписывается на MQTT и обрабатывает события в реальном времени. Возможна настройка нескольких каналов доставки (основной, резервный, BI-система) [8].

Шлюзы поддерживают OTA-обновление конфигурации и прошивок через LoRa-сообщения. Все параметры могут быть изменены удалённо: частоты, фильтры, расписания передачи.

Серверная инфраструктура

Центральный сервер включает:

- LoRaWAN Network Server (например, ChirpStack) для приёма пакетов и устранения дубликатов;

- брокер сообщений (RabbitMQ, Kafka);
- сервис обработки событий (бизнес-логика);
- базу данных (PostgreSQL с PostGIS).

Каждое событие (обнаружение вагона) содержит ID, шлюз, время, RSSI и, при наличии, телеметрию (температура, удар). Фильтруются повторы, агрегируются дубли. Бизнес-логика преобразует события в события «прибытие», «убытие», «простой», «отклонение от маршрута».

Сообщения ставятся в очередь, разгружая систему при пиковых нагрузках. Множественные обработчики читают из очереди параллельно. Такой подход обеспечивает горизонтальное масштабирование и отказоустойчивость.

Система предоставляет REST API и веб-интерфейс. Реализована диспетчерская панель с актуальным положением вагонов, статусами маршрута и аналитикой: время нахождения на станции, в пути, в ремонте и т. д. Поддерживаются алерты по e-mail или SMS в случае нештатных ситуаций (сход, отклонение, потеря связи).

В случае отсутствия связи шлюзы буферизуют до 20 000 событий, передавая их при восстановлении соединения. Вся система может быть развёрнута в контейнерах с резервированием компонентов.

API защищено аутентификацией (API-ключи, OAuth2), возможна разграниченная видимость по группам вагонов (мультитенантность). Все действия логируются.

3. Результаты исследования

Размещение шлюзов на объектах инфраструктуры

На крупных станциях с десятками путей и сотнями вагонов размещаются несколько BLE/LoRaWAN-шлюзов, формирующих сеть с перекрывающимся покрытием. Они устанавливаются в стратегических точках — на мачтах освещения, административных зданиях, горочных башнях. Один шлюз с внешней антенной способен технически охватывать до 15 км радиуса на открытой местности, однако в условиях плотной застройки и экранирования вагонами радиус

уменьшается до 1–2 км. Поэтому для уверенного покрытия применяются группы шлюзов, размещённые линейно вдоль путей. В случае перекрытия зоны тремя и более шлюзами возможно приблизительное позиционирование вагонов методом триангуляции по уровню BLE-сигнала (RSSI). Такая избыточность значительно повышает надёжность: при затенении сигнала одним объектом его подхватывает другой шлюз. Топология системы может быть как звездообразной, так и с элементами ретрансляции (mesh) в случае вытянутых участков или сложной планировки.

В локомотивных и вагонных депо масштабы меньше, поэтому обычно достаточно одного-двух шлюзов. Внутри депо радиосвязь осложнена металлическими конструкциями, поэтому BLE-ретрансляторы размещаются внутри цехов, а основной шлюз — на внешней стене или крыше. BLE фиксирует нахождение вагона в пределах 30–50 м, позволяя точно определить его прибытие или убытие из помещения. Если сигнал не может быть немедленно передан (например, при нахождении вагона в экранированном боксе), данные буферизуются во внутренней памяти до появления связи. Передача осуществляется через Ethernet, Wi-Fi или сотовую связь, либо через корпоративную сеть LoRaWAN. Такая схема обеспечивает полное покрытие, включая «сложные» зоны внутри зданий.

Анализ работы в различных сценариях

Для оценки эффективности были проанализированы три ключевых сценария: работа на станции, в депо и на перегоне. Каждый из них предъявляет свои требования к архитектуре системы.

На станциях наблюдается высокая плотность вагонов и частая смена их положения в результате маневров. При подаче состава на приёмо-отправочный путь вагоны автоматически фиксируются шлюзом. Расположение шлюзов на возвышенности (мачтах, крышах) позволяет преодолеть возможные помехи от зданий или подвижного состава. Испытания показали, что BLE-маяки уверенно распознаются на расстоянии до 100 м в открытом пространстве. Для крупных станций предусматривается масштабирование с использованием нескольких шлюзов, объединённых в единую сеть. При этом сигнал каждого маяка может быть зарегистрирован несколькими шлюзами, что увеличивает вероятность точного распознавания. Регистрация событий (прибытие, убытие) происходит практически в реальном времени — средняя задержка от момента события до появления его в системе составляет менее 3 секунд. При отказе одного из шлюзов система автоматически компенсирует потери за счёт соседних узлов либо оперативной замены неисправного шлюза.

Депо отличаются ограниченным пространством и экранирующими факторами (металлоконструкции, стены, оборудование). Поэтому здесь применяется смешанная архитектура: один внешний LoRaWAN-шлюз для передачи данных и один или несколько внутренних BLE-приёмников. Радиус действия снижается до 10–20 м, однако этого достаточно для типового депо. Если вагон глубоко в боксе и сигнал не проходит наружу, данные сохраняются и передаются при восстановлении канала (например, при открытии ворот или выводе вагона наружу). Система точно фиксирует события прибытия и выбытия на ремонт, а также передаёт показания с бортовых сенсоров —



температура, перегрузки, состояние узлов. Это позволяет удаленно следить за соблюдением температурного режима хранения и условиями обслуживания. Отказоустойчивость обеспечивается за счёт локальной буферизации, резервных каналов связи и питания шлюзов, что делает работу системы надёжной даже при временной потере внешней сети.

4. Заключение

Гибридная система на базе BLE и LoRaWAN обеспечивает высокую масштабируемость для мониторинга больших парков вагонов. LoRaWAN поддерживает подключение тысяч устройств без лицензий и с низкими затратами. Один шлюз способен обслуживать сотни вагонов, поскольку устройства передают небольшие пакеты только при событиях. Добавление новых вагонов не требует изменений в инфраструктуре — достаточно установить BLE-маяк. Практика (например, опыт SNCF с 6000 IoT-модулями и 500 шлюзами) подтверждает возможность охвата всей сети. LoRaWAN способен поддерживать миллионы устройств на км² при оптимальной настройке, что позволяет расширять систему от пилотного участка до национального масштаба без узких мест.

BLE-маяки и LoRaWAN обеспечивают автономную работу устройств до 7–10 лет. BLE передаёт короткие пакеты раз в несколько секунд с минимальным энергопотреблением. Передача по LoRaWAN — редкая и энергооптимизированная. Комбинированная архитектура (BLE + LoRa) позволяет вагону использовать BLE в зоне действия шлюза, а LoRaWAN — при отсутствии покрытия. GPS включается только при необходимости. Расчёты и натурные испытания подтверждают низкое потребление: BLE/LoRaWAN-трекер с батареей 2400 мА·ч работает до 7 лет при умеренной частоте отправок. Такая архитектура сводит к минимуму обслуживание и упрощает установку оборудования.

LoRaWAN обладает высокой помехоустойчивостью, использует разнообразные частотные каналы и спрэдинг-факторы. Сеть строится по топологии «звезда» с перекрывающимися зонами действия шлюзов, исключая единую точку отказа. Вагоны буферизуют данные и используют механизмы повторной передачи. При потере связи по BLE активируется LoRaWAN. Система обнаруживает сбои датчиков и аварии (удар, наклон, остановка движения), передавая сигналы тревоги. Последняя позиция вагона сохраняется даже при полном разрушении устройства.

При выходе из строя шлюза сигнал перехватывает соседний. На станциях размещаются резервные приёмники. При потере сигнала от вагона система определяет проблему по тайм-ауту, пытается восстановить связь и сохраняет последнюю траекторию. Вагоны в спящем режиме не считаются потерянными — данные восстанавливаются при появлении сигнала.

В отличие от ручного ввода данных и RFID, BLE/LoRaWAN обеспечивает автоматический мониторинг с передачей дополнительных параметров (температура, удары и др.) и дальностью до 100 м. В сравнении с GSM/спутниковыми трекерами система дешевле, автономнее и не зависит от сторонних операторов. В отличие от NB-IoT и Sigfox, LoRaWAN не

требует абонентской платы и адаптируется под потребности инфраструктуры. Передача событийных данных вместо непрерывного потока снижает нагрузку на сеть.

Система может быть расширена дополнительными датчиками (вибрации, износ, подшипники), с локальной предобработкой данных и передаче только аномалий. Возможно добавление обратного канала для настройки и управления устройствами (FOTA, индикация). Такие возможности сделают систему гибкой и интерактивной.

Использованная литература / References

- [1] Интернет вещей // RZD Digital : [rzddigital.ru]. — [Б. м.], [2022 г.]. — URL: <https://rzddigital.ru/technology/internet-veshchey/> (дата обращения: 04.08.2025).
- [2] GPS vs. RFID Railroad Tracking: Which is Better for Railcar Tracking? // GeoForce. URL: <https://www.geoforce.com/gps-vs-rfid-railroad-tracking/> (дата обращения: 04.06.2025).
- [3] Indoor Positioning with BLE and LoRa: A Comparative Approach // IoT For All. URL: <https://www.iotforall.com/indoor-positioning-ble-and-lora> (дата обращения: 01.06.2025).
- [4] SNCF uses LoRaWAN IoT to monitor assets, infrastructure and rolling stock // Actility. URL: <https://www.actility.com/sncf-blog/> (дата обращения: 28.07.2025).
- [5] Арипов, Н. М., Камалетдинов, Ш. Ш., Тохиров, Н. С. Выбор беспроводной технологии среди интернета вещей для совершенствования организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте // Electronic Journal of Actual Problems of Modern Science, Education and Training. — 2022. — № 8. — С. 96–104. — ISSN 2181 9750.
- [6] Арипов, Н. М., Камалетдинов, Ш. Ш., Тохиров, Н. С. Развитие инфраструктуры сети LoRaWAN для организации управления перевозками на железнодорожном транспорте // Electronic Journal of Actual Problems of Modern Science, Education and Training. — 2022. — № 8. — С. 104–114. — ISSN 2181 9750.
- [7] Арипов, Н. М., Камалетдинов, Ш. Ш., Тохиров, Н. С. Практическое применение технологии LoRaWAN для отслеживания подвижного состава на железнодорожном транспорте // Academic Research in Educational Sciences. — 2022. — Т. 3, № 8. — С. 45–55. — ISSN 2181 1385.
- [8] LoRa network architecture. Download Scientific Diagram https://www.researchgate.net/figure/LoRa-network-architecture_fig1_307965130
- [9] WavePointer GATEWAY <https://www.wavepointer.com/en/products/gateway>
- [10] Bluetooth-шлюз LoRaWAN | Двойное подключение и масштабируемость MQTT - ChirpStack open-source LoRaWAN® Network Server documentation <https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack/integrations/mqtt.html> Ferrari A., ter Beek M.H. Formal Methods in Railways: a Systematic Mapping Study. arXiv preprint arXiv:2105.03924, 2021.



**Информация об авторах/
Information about the authors**

Камалетдинов Ташкентский государственный
Шохрух / транспортный университет, доцент
Shokhrukh кафедра «Управление
Kamaletdinov эксплуатационной работой на
железнодорожном транспорте», д.т.н.
(DSc), доцент

E-mail:

shoxruxkamaletdinov@gmail.com

Tel.: +998935834569

<https://orcid.org/0000-0002-4004-9736>

Sh. Kamaletdinov

Complex automated transportation management system for railway transport in the Republic of Uzbekistan92

Sh. Kamaletdinov

Railcar monitoring system based on BLE and LoRaWAN.....99