

Дударев Кирилл Сергеевич

Студент 1-го курса кафедры географии, Института Медицины и экспериментальной биологии ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» (180000, Россия, Псковская область, г. Псков, пл. Ленина, д.2),

Теренина Наталья Константиновна

доцент кафедры географии Института Медицины и экспериментальной биологии ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» (180000, Россия, Псковская область, г. Псков, пл. Ленина, д.2), тел. +7 8112 20-16-99

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОБУСНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДА: ОТ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ К НЕЙРОСЕТЕВЫМ АЛГОРИТМАМ

***Аннотация:** Проектирование эффективной маршрутной сети городского пассажирского транспорта представляет собой сложную многокритериальную оптимизационную задачу, требующую одновременного учёта пассажирского спроса, топологии улично-дорожной сети, эксплуатационных затрат перевозчика и экологических ограничений. Традиционные подходы, основанные на математическом моделировании транспортных потоков, всё активнее дополняются инструментами, использующими методы искусственного интеллекта (ИИ), — от эволюционных алгоритмов и графовых нейронных сетей до полноценных цифровых двойников транспортных систем. В настоящей статье представлен систематизированный обзор программных средств, применяемых при проектировании автобусной сети города. Рассмотрены как классические пакеты имитационного моделирования (PTV Visum, PTV Vissim, AnyLogic, MATSim, SUMO), так и специализированные ИИ-ориентированные решения (ConnectPT, MANTIS, Optibus Strategic Planning, Via Intelligence, «Поланис»). Особое внимание уделено открытым исследовательским платформам (BusMezzo, AequilibraE, Transport-IDE) и отечественным разработкам (RITM³, TransNet). Проведён сравнительный анализ функциональных возможностей, архитектурных особенностей и ограничений рассматриваемых инструментов, а также намечены перспективные направления развития данной области.*

***Ключевые слова:** транспортное планирование, автобусная сеть, имитационное моделирование, искусственный интеллект, генетические алгоритмы, графовые нейронные сети, цифровой двойник, оптимизация маршрутов.*

1. Введение

Городской автобусный транспорт остаётся основой мобильности для значительной части населения, особенно в условиях растущей урбанизации и ужесточения экологических требований. Проектирование маршрутной сети относится к классу NP-трудных комбинаторных задач, известных в литературе как Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFSP): необходимо одновременно определить оптимальные места размещения остановочных пунктов, конфигурацию маршрутов и частоту движения на каждом из них, балансируя между удобством пассажиров и эксплуатационными расходами перевозчика. Долгое время основным инструментарием транспортных инженеров служили макромоделли (четырёхшаговая модель спроса) и микромоделли (имитационное моделирование движения отдельных транспортных средств). Однако в последние пять лет наметился существенный сдвиг в сторону интеллектуализации процесса проектирования: эволюционные и роевые алгоритмы, методы машинного обучения, включая графовые нейросети и обучение с подкреплением, всё активнее встраиваются как в коммерческие, так и в исследовательские программные пакеты. Настоящий обзор ставит целью систематизировать существующие программные решения, выделив в них две ключевые линии развития: (а) имитационное моделирование как средство анализа и верификации проектных решений; (б) алгоритмы ИИ как средство генерации и оптимизации самих проектных решений. Отдельно рассмотрен класс гибридных инструментов, где имитационная модель выступает «физическим каркасом», ограничивающим пространство поиска ИИ-алгоритма рамками реалистичных сценариев.

2. Инструменты имитационного моделирования автобусных сетей

2.1. Макро- и мезоскопическое моделирование: PTV Visum и TransNet

PTV Visum — один из наиболее распространённых в мире программных комплексов для стратегического транспортного планирования. В версии Visum 2026 реализована мезоскопическая модель общественного транспорта, позволяющая анализировать взаимодействие автобусных маршрутов с потоком индивидуального транспорта на улично-дорожной сети, что критически важно для оценки влияния остановок на пропускную способность дорог и формирования заторов. Важнейшей инновацией версии 2025 года стала процедура автоматизированного проектирования сети общественного транспорта (Automated Public Transport Network Design), основанная на генетическом алгоритме: генерируется пул потенциальных линий, на них назначается пассажирский спрос, после чего в итеративном цикле отбираются подмножества, максимизирующие целевую функцию при заданных ограничениях. Алгоритм не просто находит единственное оптимальное решение, но и предлагает спектр альтернативных конфигураций, которые планировщик может оценить содержательно. Версия 2025 года также включает AI-ассистента (Companion AI Chatbot), упрощающего взаимодействие пользователя с программой. Отечественным аналогом в сегменте

макромоделирования выступает TransNet , программа для прогноза автомобильных и пассажирских потоков на основе математического моделирования. Версия TransNet 2.19 (выпуск августа 2024 года) обеспечивает динамическое распределение пассажиропотоков общественного транспорта с учётом расписаний и ограничений провозной способности.

2.2. Микроскопическая имитация: PTV Vissim и AnyLogic

PTV Vissim — микроскопический симулятор движения, моделирующий поведение каждого транспортного средства в пределах дорожной сети с учётом заданных поведенческих моделей следования за лидером и смены полосы. Для проектирования автобусной сети Vissim ценен возможностью детального анализа задержек на остановочных пунктах, влияния приоритетного пропуска на перекрёстках и взаимодействия автобусов с пешеходными потоками. Версия 2026 года включает автоматическую генерацию сети из HD-карт (Model2Go), что существенно сокращает время подготовки модели, и расширенные возможности экспорта критических сценариев для тестирования систем помощи водителю и автономных транспортных средств.

AnyLogic — многоагентная имитационная платформа, поддерживающая все три парадигмы моделирования (системную динамику, дискретно-событийное и агентное). Применительно к автобусным сетям AnyLogic позволяет строить модели, имитирующие прибытие пассажиров на каждую остановку, их посадку и высадку, а также движение автобусов по маршруту в соответствии с расписанием. Описаны успешные проекты по моделированию маршрутной сети Нижнего Новгорода и Екатеринбурга, а также специализированные задачи — оптимизация высокочастотных маршрутов для предотвращения эффекта «скупивания» автобусов (bus bunching).

2.3. Агентно-ориентированные платформы с открытым кодом: MATSim и SUMO

MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) — открытая платформа агентного моделирования транспортных систем. Ключевое преимущество MATSim для проектирования автобусной сети заключается в возможности симулировать дневные планы активности каждого жителя города (co-evolutionary algorithm) и оценивать, как изменение маршрутной сети повлияет на их перемещения. На платформе MATSim-NYC выполнена верификация проекта реорганизации автобусной сети Бруклина: модель показала среднюю ошибку в 21% по маршрутной загрузке относительно данных наблюдений и подтвердила прогнозируемый рост пассажиропотока на 20% при реализации предложенного дизайна. Аналогичные работы проведены для сети MyCiTi BRT в Кейптауне, где MATSim использовался для оценки альтернативных конфигураций, генерируемых оптимизатором.

Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) — микроскопический симулятор, поддерживающий мультимодальные перевозки, включая автобусы,

пешеходов и индивидуальный транспорт. В состав SUMO входит набор вспомогательных утилит для поиска маршрутов, визуализации, импорта сетей и расчёта выбросов. Модуль SUMOPy предоставляет графический интерфейс для подготовки сценариев, включая определение автобусных остановок, расписаний и маршрутов на основе данных OpenStreetMap. Для проектирования автобусных сетей SUMO особенно полезен возможностью интеграции данных GTFS (General Transit Feed Specification) — стандарта описания расписаний общественного транспорта.

Обе платформы активно применяются в академических исследованиях, в том числе в связке с внешними оптимизаторами: MATSim и SUMO выполняют роль имитационной «среды» для оценки пригодности (fitness) решений, генерируемых ИИ-алгоритмами.

3. Инструменты на основе искусственного интеллекта

3.1. Эволюционные алгоритмы и нейросетевые методы

ConnectPT (ИТМО, 2025) — открытая библиотека для оптимизации маршрутной сети общественного транспорта, способная работать на минимальном объёме исходных данных: для анализа достаточно информации о топологии улично-дорожной сети и городской застройке. В основе лежит эволюционный алгоритм, использующий графовые нейронные сети в качестве оператора мутаций — ключевого механизма, вносящего случайные изменения в популяцию решений-кандидатов. Графовые нейросети адаптированы для оптимизации транспортной связанности, взвешенной по пассажирскому спросу. Отличительная особенность ConnectPT — низкая требовательность к исходным данным и высокая скорость работы: анализ сети может быть выполнен за несколько часов, тогда как классические подходы с построением полномасштабной транспортной модели требуют месяцев или даже лет сбора данных и затрат до нескольких десятков миллионов рублей.

MANTIS (Modular Adaptive Network for Transit Infrastructure Solutions, 2025) — ИИ-фреймворк для проектирования сетей общественного транспорта, ориентированный на регионы с дефицитом исторических данных о перемещениях. Методология включает три последовательных этапа: кластеризация (K-means) для определения мест размещения остановок на основе плотности населения и точек интереса; гравитационная модель для оценки пассажирского спроса между кандидатными остановками; генетический алгоритм для совместной оптимизации маршрутов и частот. Валидация выполнена путём агентной симуляции в SUMO на примере Большого Лондона и Большого Куала-Лумпура, что подтвердило адаптируемость подхода к различным градостроительным контекстам.

3.2. Коммерческие AI-платформы для транспортного планирования

Optibus Strategic Planning (2024) — надстройка над облачной платформой Optibus, объединяющая данные о пассажиропотоках, расписаниях и стоимости эксплуатации с методами машинного обучения для генерации проектных альтернатив. Целевые показатели включают пунктуальность движения, загрузку транспортных средств, время ожидания пересадок и доступность ключевых точек притяжения. Решение позиционируется как инструмент для транспортных администраций и консультантов, обеспечивающий «единый источник истины» на всех этапах планирования — от стратегического проектирования сети до оперативного управления.

Via Intelligence (2025) — вертикальная AI-платформа, разработанная компанией Via специально для общественного транспорта. В отличие от универсальных BI-решений, Via Intelligence интегрирует данные из различных источников (бортовые датчики, системы оплаты проезда, данные мобильных операторов) и преобразует их в стратегические рекомендации по изменению маршрутной сети, включая гибридные конфигурации «фиксированные маршруты + перевозки по требованию». Модуль Service Design позволяет визуальное проектировать и модифицировать маршрутную сеть на карте, оперативно оценивая последствия изменений.

AI4Bus (Eurecat, Барселона, 2025) — исследовательский проект, направленный на разработку моделей ИИ для оптимизации управления автобусной сетью Барселонского метрополитенского ареала на основе анализа исторических паттернов спроса.

3.3. Гибридные системы: имитационно-обоснованные нейронные сети

Цифровая платформа «Поланис» (СПбПУ, 2025) — российский прототип интеллектуальной системы управления транспортом, ключевой особенностью которого является комбинация имитационного моделирования и методов машинного обучения. В основе лежит концепция имитационно-обоснованных нейронных сетей, функционально близкая к методологии Physics-Informed Neural Networks (PINN): имитационная модель выступает каркасом, ограничивающим решения рамками физической реальности, а нейросетевой компонент отвечает за анализ больших данных и прогнозирование. Платформа поддерживает функции предиктивной (прогнозной) и прескриптивной (предписывающей) аналитики, обеспечивая точность позиционирования объектов до 5 см.

Отечественная платформа RITM³ (SIMETRA) представляет собой рабочее пространство для транспортных инженеров, объединяющее математическую транспортную модель, инструменты визуализации и модули на базе ИИ для оптимизации маршрутной сети. Важной особенностью является возможность автоматического импорта моделей из PTV Visum (процесс миграции запускается по клику), что облегчает переход на импортонезависимое ПО.

4. Открытые библиотеки и узкоспециализированные инструменты

BusMezzo (TU Delft / KTH Stockholm) — динамическая имитационная модель операций и распределения пассажиропотоков для мультимодальных сетей общественного транспорта (автобус, трамвай, метро, пригородные поезда) с открытым исходным кодом. Модель способна симулировать как штатные, так и сбойные ситуации, включая отклонения от расписания, и оценивать их влияние на пассажиров.

AequilibraE — первый полнофункциональный открытый пакет транспортного моделирования для экосистемы Python, предоставляющий инструменты для расчёта матриц корреспонденций, распределения потоков и оценки транспортной доступности. Выпущен под лицензией, допускающей коммерческое использование.

Transport-IDE — открытый исследовательский инструментарий моделирования интеллектуальных транспортных систем на Java/JavaFX, разрабатываемый Университетом прикладных наук Верхней Австрии и Берлинским техническим университетом.

ArcGIS Network Analyst — модуль, позволяющий моделировать сервис общественного транспорта на основе расписаний в составе мультимодального набора сетевых данных. Специализированный анализатор «Общественный транспорт» учитывает время суток и день недели при вычислении оптимальных поездок с пересадками.

5. Сравнительный анализ и обсуждение

5.1. Критерии сравнения

Анализ рассмотренных инструментов целесообразно проводить по следующим осям:

- Уровень детализации модели : макро- (PTV Visum, TransNet), мезо- (Visum 2026), микроскопический (Vissim, AnyLogic, SUMO, MATSim).
- Степень автоматизации проектирования : от ручного (ArcGIS, базовый Visum) через автоматизированную генерацию альтернатив (Visum Line Construction) до полностью автоматической оптимизации (ConnectPT, MANTIS).
- Тип используемого ИИ : эволюционные алгоритмы (Visum, ConnectPT, MANTIS), машинное обучение (Optibus, Via Intelligence), нейросетевые методы, включая графовые нейросети (ConnectPT, «Поланис»).
- Требования к исходным данным : высокие (Visum, MATSim — требуют матриц корреспонденций), средние (Optibus, Via — используют исторические данные операторов), низкие (ConnectPT, MANTIS — способны работать только с данными о застройке и улично-дорожной сети).
- Лицензионная модель : проприетарное ПО (Visum, Vissim, Optibus, Via), открытое ПО (SUMO, MATSim, BusMezzo, AequilibraE, ConnectPT).

5.2. Ключевые тенденции

Первая тенденция — конвергенция имитационного моделирования и ИИ. Если ранее имитационная модель использовалась преимущественно для анализа «что будет, если», а оптимизация выполнялась планировщиком вручную, то теперь имитационная среда всё чаще выступает как компонент цикла машинного обучения: ИИ-алгоритм генерирует решение, симулятор оценивает его качество, результат возвращается алгоритму для корректировки. Эта архитектура реализована в MANTIS (где генетический алгоритм использует SUMO для оценки), в MATSim для Кейптауна и Бруклина, и заложена в идеологию «Поланис».

Вторая тенденция — снижение порога входа благодаря открытым библиотекам и облачным сервисам. ConnectPT демонстрирует, что для получения содержательных рекомендаций достаточно открытых данных OpenStreetMap и информации о застройке — без необходимости в дорогостоящих обследованиях пассажиропотоков. MANTIS принципиально ориентирован на регионы, где исторические матрицы корреспонденций отсутствуют. Облачные платформы Via Intelligence и Optibus предоставляют готовые конвейеры обработки данных, избавляя пользователя от необходимости развёртывания вычислительной инфраструктуры.

Третья тенденция — цифровые двойники транспортных систем. Систематический обзор литературы (2026) фиксирует устойчивый рост публикаций, посвящённых применению цифровых двойников в автобусном транспорте, где они интегрируют IoT-датчики на транспортных средствах, данные о местоположении в реальном времени и AI-модели для поддержки оперативного планирования и перепланирования маршрутов.

5.3. Ограничения существующих подходов

Несмотря на значительный прогресс, сохраняется ряд нерешённых проблем. Во-первых, большинство рассмотренных инструментов оптимизируют либо маршрутную сеть, либо расписание, но не то и другое одновременно. Во-вторых, мультимодальная интеграция (автобусы + метро + индивидуальный транспорт + велосипеды/самокаты) во многих пакетах реализована фрагментарно. В-третьих, актуальной остаётся проблема переносимости моделей: модель, построенная для одного города, требует существенной перекалибровки при переносе на другой. Наконец, лишь немногие инструменты поддерживают учёт электрификации автобусного парка и связанных с ней ограничений (запас хода, размещение зарядных станций), хотя систематический обзор Operational AI for Multimodal Urban Transport (2026) подчёркивает критическую важность этого направления для устойчивой мобильности.

6. Заключение

Ландшафт программных средств для проектирования автобусных сетей города характеризуется сегодня одновременным сосуществованием трёх поколений инструментов: (1) классических имитационных пакетов (PTV Visum, AnyLogic), обеспечивающих высокую точность ценой значительных трудозатрат на сбор данных и калибровку; (2) открытых исследовательских платформ (MATSim, SUMO, BusMezzo), формирующих среду для апробации новых алгоритмов; (3) ИИ-ориентированных решений (ConnectPT, MANTIS, Optibus), позволяющих получить проектные альтернативы с минимальными требованиями к исходным данным за счёт методов машинного обучения.

Наиболее перспективным представляется гибридное направление, где имитационная модель выполняет функцию «цифрового полигона» для верификации решений, генерируемых ИИ-алгоритмами, а те, в свою очередь, используют накопленный симуляционный опыт для обучения. Подобные системы — от исследовательского MANTIS до промышленного прототипа «Поланис» — способны в перспективе трансформировать процесс транспортного планирования из преимущественно экспертного и трудоёмкого в Data-Driven, оставляя за специалистом содержательную постановку целей и выбор между альтернативами, но не рутинный перебор вариантов.

Список литературы.

1. PTV Group. PTV Group представила новые версии Visum, Vissim и Vistro 2026 // PTV Traffic, 2025.
2. CNews. Маршрут перестроен: в ИТМО разработали ИИ-сервис для оптимизации маршрутов общественного транспорта // CNews, 30.10.2025.
3. РБК Компании. ИТМО представил ИИ-сервис для оптимизации маршрутов транспорта // РБК, 01.11.2025.
4. Mohamed, Y., Chen, Z. An AI Framework for Generating and Simulating Public Transportation // Cureus Journal of Computer Science, 2025.
5. Digital twins in public bus transport: A systematic literature review // ScienceDirect, 2026.
6. Operational AI for Multimodal Urban Transport: A Systematic Literature Review // MDPI Logistics, 2026.
7. Public Transport Network Design with PTV Visum: Line Construction Procedure // PTV Group Blog, 2025.
8. Цифровая платформа «Поланис» для моделирования транспортных систем // СПбПУ, 2025.
9. TransNet ПО для транспортного моделирования // TAdviser, 2024.
10. Гринченко, А. В. Моделирование городского автобусного маршрута в AnyLogic: методические указания . Липецк: ЛГТУ, 2023.
11. Сетевой анализ с помощью данных общественного транспорта // ArcGIS Pro Documentation.
12. Eclipse SUMO — Simulation of Urban MObility // Eclipse Foundation.
13. BusMezzo // TU Delft.
14. AequilibraE // PyPI.
15. Transport-IDE // GitHub.
16. MATSim-NYC: Optimizing the Brooklyn Bus Network Redesign // C2SMART, 2022.
17. MATSim Brooklyn Bus Redesign Project // TRID, 2020.
18. Simulation-based optimisation of public transport networks // OpenUCT.
19. Optibus launches Strategic Planning machine learning tool // Route One, 2024.
20. Optibus launches toolkit for network planning // ITS International, 2024.
21. Via Intelligence: AI for Public Transit // Via.
22. Via Unveils First-Ever Vertical AI Platform for Public Transit // Metro Magazine, 2025.

23. AI4Bus // Eurecat, 2025.
24. SIMETRA разработала транспортную модель Красноярска на платформе RITM³ // iEMag, 2026.
25. SIMETRA: Цифровая платформа RITM³ // SIMETRA Group.
26. Как укрепить импортонезависимость транспортной сферы // Рейс.РФ, 2026.
27. Имитационное моделирование автобусных пассажироперевозок части города Екатеринбурга // УрФУ, 2025.
28. High Frequency Bus Route Optimization to Avoid Bus Bunching // AnyLogic.