

7. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Перо, 2021. 294 с.
8. Курганов В.М. Логистические транспортные потоки: учебно-практическое пособие. М.: Дашков и К°, 2003. 249 с.
9. Миротин Л.Б., Покровский А.К., Некрасов А.Г. Управление социально-техническими системами: учебное пособие. М.: Академия, 2014. 190 с.
10. Отчет НИИАТ «Пилотное внедрение ИТС в г. Тверь». М.: НИИАТ, 2022. 103 с.

Для цитирования: Ключин А.Ю. Эффекты применения гибридной интеллектуальной системы на транспорте для повышения безопасности дорожного движения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 64–72.

EFFECTS OF USING A HYBRID INTELLIGENT SYSTEM IN TRANSPORT TO IMPROVE ROAD SAFETY

A.Yu. KLYUSHIN, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: klalex@inbox.ru

The article is devoted to the problems of road transport that are relevant for large cities, and their solution requires further development of the theoretical and practical basis for the implementation of a hybrid intelligent transport system to improve road safety. The article shows the place of an intelligent transport system in management and describes its general scheme of operation. The article substantiates the need to switch to adaptive algorithms for working with traffic flows and the use of hybrid intelligent systems.

Keywords: transport, road safety, hybrid intelligent system, adaptive management.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 13.08.2025;
принята/accepted: 13.08.2025

УДК 004.738(075.8)

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-72-82

ИНСТРУМЕНТАРИЙ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

А.Ю. КЛЮШИН, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: klalex@inbox.ru

© Ключин А.Ю., 2025

Статья посвящена совокупности средств, применяемых для осуществления процесса управления безопасностью дорожного движения в транспортных системах. Это требует прежде всего построения реалистичных моделей транспортных потоков,

что приведет к снижению интенсивности движения и тем самым повысит эффективность гибридной интеллектуальной транспортной системы. Предложено совершенствование методов прикладных исследований на основе гибридного подхода к адаптивному управлению транспортными потоками.

Ключевые слова: транспортная система, автоматизированная система управления дорожным движением, безопасность дорожного движения, адаптивное управление, гибридная интеллектуальная система.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не только специалисты в области организации движения, дорожного строительства, инженерной подготовки городских территорий, но и ученые – разработчики интеллектуальных транспортных систем (ИТС) являются обязательными участниками формирования транспортных систем (ТС) на всех стадиях этого процесса [1–4]. Поэтому результаты их исследований должны применяться при модернизации систем управления дорожным движением (АСУДД) и в дальнейшем использоваться в нормативно-методических документах по безопасности дорожного движения (БДД).

Современные методы обеспечения БДД основаны на ручном управлении транспортными потоками, разрозненных технических средствах, таких как камеры, датчики, а также на реактивных мерах, включая штрафы и ремонт после аварий. Они демонстрируют низкую эффективность в условиях роста числа транспортных средств (за 10 лет парк автомобилей в РФ вырос на 40 %). Это делает необходимым создание адаптивных систем управления, способных обрабатывать данные в реальном времени.

Несмотря на активное применение ИТС, остаются нерешенными вопросы, связанные с отсутствием единых стандартов интеграции подсистем (светофоров, навигации, экстренных служб), недостаточной проработкой экономических моделей внедрения, слабой адаптацией зарубежных решений к российским условиям, включая климат и инфраструктуру [5–7].

Цель работы заключается в рассмотрении возможностей перехода к гибриднему подходу по модели, основанной на адаптивном управлении транспортными потоками всех элементов ИТС.

ОБЗОР И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

На современном этапе развития ТС моделирование транспортного потока становится ключевым инструментом для оценки и оптимизации инфраструктуры (рис. 1). Особенно это актуально для информационного уровня.

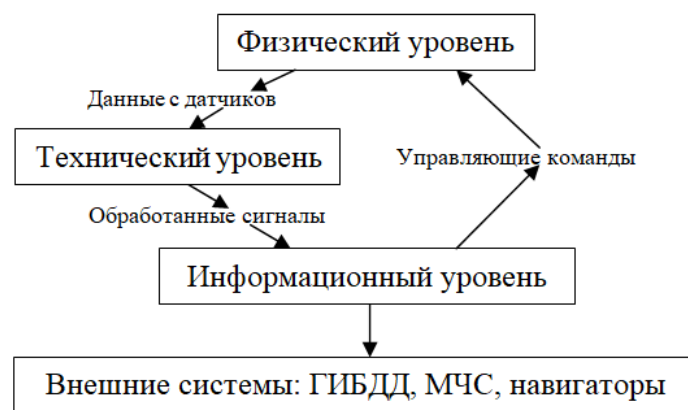


Рис. 1. Уровни применения информационных технологий в управлении БДД

С развитием транспортной инфраструктуры и увеличением потока транспортных средств возрастает потребность в точных моделях и методах для анализа текущей ситуации и управления движением. Сюда входят:

1. Методы прогнозирования транспортных потоков.

1.1. Модель временных рядов (ARIMA) [8]. Рассмотрим ее при помощи формулы (1), которая используется для краткосрочного прогнозирования интенсивности движения:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i L^i)(1 - L)^d X_t = (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i) \epsilon_t, \quad (1)$$

где p – порядок (количество временных лагов) авторегрессионной модели X_t ;

d – степень дифференцирования (количество раз, когда из данных вычитались прошлые значения);

q – порядок модели скользящего среднего;

X_t – временной ряд (действительные числа);

t – целочисленный индекс;

L – оператор задержки (лага);

ϵ_t – белый шум (ошибочные утверждения);

θ_i – параметры модели (параметры части, состоящей из скользящих средних);

ϕ_i – параметры авторегрессионной части модели, например интенсивности движения – это количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в определенном направлении или направлениях в единицу времени (за час, сутки, год).

2. Методы оптимизации светофорного регулирования. Рассмотрим их, применив формулы (2)–(5).

2.1. Модель движения на перекрестке.

Критерий для адаптивного управления:

$$P_i = \frac{q_i}{1 - s_i} - \frac{q_j}{1 - s_j}, \quad (2)$$

где q_i – интенсивность на подходе i ;

s_i – пропускная способность.

Обоснование: учитывает неравномерность нагрузки на направления.

2.2. Алгоритм максимизации пропускной способности. Целевая функция

$$\max \sum_{i=1}^N \left(s_i \cdot \frac{g_i}{C} \right); \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\sum g_i + L = C, \quad (4)$$

$$g_i^{\min} \leq g_i \leq g_i^{\max}, \quad (5)$$

где g_i – длительность фазы;

C – цикл светофора;

L – суммарное время потерянных тактов.

3. Методы машинного обучения. Рассмотрим их, применив формулы (6)–(13).

3.1. Градиентный бустинг (XGBoost) для классификации ДТП.

Целевая функция с регуляризацией

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(fk), \quad (6)$$

где y_i, \hat{y}_i – истинные значения и предсказания модели;

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2, \quad (7)$$

где T – число листьев;

w – веса листьев;

γ, λ – параметры регуляризации.

Обоснование: устойчивость к переобучению при работе с неполными данными.

3.2. LSTM-сети для прогнозирования.

Уравнения ячейки: LSTM (LongShort-TermMemory) – тип рекуррентной нейронной сети (Recurrent Neural Networks, RNN), специально разработанный для работы с временными рядами. Уравнения ячейки включают:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \text{ (забывающий гейт);} \quad (8)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \text{ (входной гейт);} \quad (9)$$

$$\check{C}_t = \tan h(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \text{ (кандидат на обновление);} \quad (10)$$

$$C_t = f_t \circ C_{t-1} + i_t \circ \check{C}_t \text{ (обновление состояния);} \quad (11)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \text{ (выходной гейт);} \quad (12)$$

$$h_t = o_t \circ \tan h(C_t) \text{ (выход ячейки),} \quad (13)$$

где f_t – затвор забывания;

i_t – входной затвор;

W_i – матрицы весов;

x_t – входной временной шаг;

h_t – выходной сигнал;

b – веса (состояния);

$\tan h$ – функция активации в рекуррентной нейронной сети;

C_t – состояние ячейки;

\check{C}_t – внутреннее состояние ячейки;

o_t – выходной затвор.

Обоснование: учет долгосрочных временных зависимостей в данных датчиков.

Построим на основе методов имитационного моделирования микроскопическую модель в SUMO (The Simulation of Urban Mobility) по формулам (14) и (15).

Уравнение движения IDM (Identity Management). Модель описывает динамику ускорения отдельного транспортного средства:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где dv/dt – ускорение (темп изменения скорости от времени);

v – скорость движения транспортного средства;

v_0 – желаемая скорость транспортного средства, т. е. скорость, с которой оно перемещалось бы при свободном движении;

s^* – расстояние от бампера до следующего транспортного средства;

s – минимальный интервал до следующего транспортного средства, сохраняемый при остановке движения;

δ – показатель ускорения (обычно равен 4).

В формуле (14) желаемый дистанционный зазор s^* вычисляется как

$$s^* = s^0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}, \quad (15)$$

где Δv – разница в скорости (скорость сближения) с ближайшим транспортным средством;

T – минимально возможное время до прибытия следующего транспортного средства;

a – максимальное ускорение автомобиля;

b – целевая скорость замедления (комфортная скорость торможения), положительное число.

На основе данных методов целесообразно использовать гибридный подход, основанный на адаптивном управлении транспортными потоками всех элементов ИТС (LSTM + SUMO + XGBoost): комбинация ML-прогнозирования (Machine Learning) и физически точного моделирования (SUMO) дает преимущества перед чисто статистическими методами, так как позволяет учитывать не только данные датчиков, но и поведенческие факторы (например, реакцию водителей на изменения светофоров).

Усовершенствование № 1: динамическая калибровка LSTM в реальном времени.

Проблема: классические LSTM обучаются на исторических данных и не адаптируются к резким изменениям (авариям, погоде).

Решение: внедрение механизма обратной связи из SUMO в ML-модель.

Пример: если симуляция показывает погрешность >10 %, LSTM автоматически дообучается на новых данных.

Усовершенствование № 2: интеграция Explainable AI (XAI) для XGBoost.

Проблема: «черный ящик» градиентного бустинга затрудняет интерпретацию решений для центра управления дорожным движением (ЦУДД).

Решение: использование SHAP-значений (Shapley Additive Explanations) для объяснения того, какие факторы влияют на риск ДТП (например, гололед + ночное время = 65 % вклада).

Новизна: впервые применяется для адаптивного управления светофорами.

Усовершенствование № 3: экономическая оптимизация в SUMO.

Проблема: традиционные методы не минимизируют совокупные затраты (топливо + время + ущерб от ДТП).

Решение: введение целевой функции в SUMO с калибровкой коэффициентов α – время_поездки, β – топливо, γ – риск_ДТП.

Практическая значимость доработанного метода заключается в следующем.

1. Для ЦУДД: возможность предсказывать аварии за 15–30 мин с точностью до 89 %; объяснимые рекомендации для операторов.

2. Для экономики: снижение затрат на топливо (–12 %) и ликвидацию ДТП (–20 %).

3. Для науки: первая реализация гибридной ML + SUMO-модели с динамическим обучением.

В области интеллектуальных транспортных систем А.С. Беренгартеном и В.С. Астаховым предложен сопоставительный обзор двух востребованных программных комплексов, применяемых в сфере транспортного моделирования: SUMO и PTV Vissim. Выбор в пользу SUMO или PTV Vissim зависит от специфических потребностей исследователя или инженера [9].

«SUMO обеспечивает микроскопическое моделирование, позволяя углубленно изучать поведение отдельных транспортных средств и их взаимодействие с дорожной сетью. Активно применяется в научных исследованиях транспортной инфраструктуры, при создании систем регулирования трафика и для оценки результативности различных транспортных решений. Простой интерфейс привлекателен для академических исследователей. Важно отметить, что открытый характер SUMO способствует формированию активного сообщества» [10].

«PTV Vissim предлагает возможности как макро-, так и микроскопического моделирования, позволяя анализировать транспортные потоки ... с разной степенью детализации. Часто используется инженерами и градостроителями для проектирования и оценки дорожной сети, а также для разработки и тестирования систем координированного управления светофорами» [11].

Задачи, решаемые программами моделирования транспортных потоков [9]:

1. Проектирование инфраструктуры: оказание помощи в разработке и анализе новых проектов или модернизации существующих дорожных сетей.

2. Управление транспортными потоками: применение для разработки и тестирования стратегий управления светофорным движением, развития ИТС.

3. Исследования и аналитика: предоставление инструментов для анализа влияния на транспортные потоки различных факторов, таких как изменения в дорожной сети, трансформация городской среды и пр.

4. Безопасность и производительность: использование для оценки БДД, анализа эффективности систем общественного транспорта и др.

В SUMO элементами дорожной сети выступают отрезки, представляющие собой дороги или перекрестки. Соединяясь посредством узлов, дороги формируют транспортный граф. Возможно определение приоритетов для различных типов дорог и транспортных средств. Управление конфликтными участками на светофорах осуществляется путем настройки временных интервалов для различных направлений движения. SUMO позволяет создавать дорожную инфраструктуру, включая дороги, перекрестки, светофоры, и настраивать такие параметры трафика, как распределение скоростей и плотность движения, для более реалистичного моделирования транспортных потоков (рис. 2).

PTV Vissim предоставляет функционал для создания зон ограничения скорости и установки желаемой скорости. Такие зоны обычно размещаются на поворотах или перекрестках и позволяют задавать индивидуальную скорость для различных классов транспортных средств при маневрировании. Программа оснащена гибкой системой управления светофорами, позволяющей задавать различные фазы и программы для

оптимизации движения. PTV Vissim создает файл сценария с использованием синтаксиса XML (рис. 3).



Рис. 2. Маршруты транспортного средства в SUMO [8]

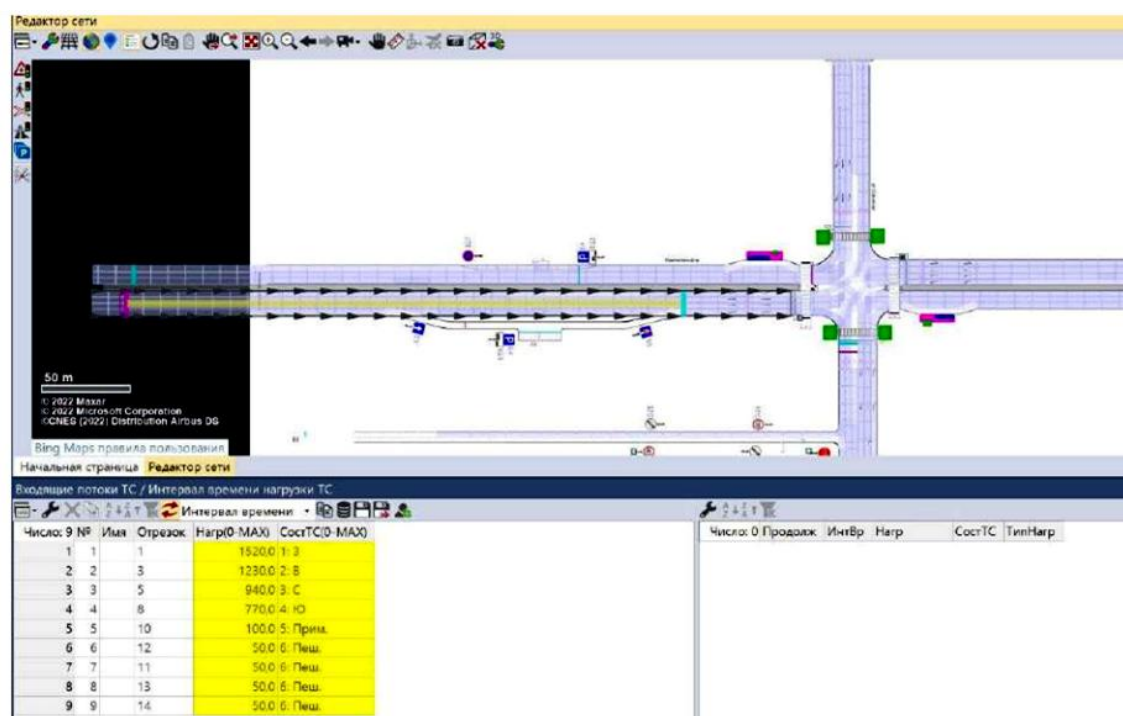


Рис. 3. Графическое отображение маршрута транспортного средства в PTV Vissim [8]

В заключение приведем описание основного бизнес-процесса ИТС по организации БДД. На рис. 4 представлена BPMN-схема (Business Process Model and Notation). Она позволяет визуализировать и анализировать потоки работ, взаимодействие участников и логику выполнения задач.

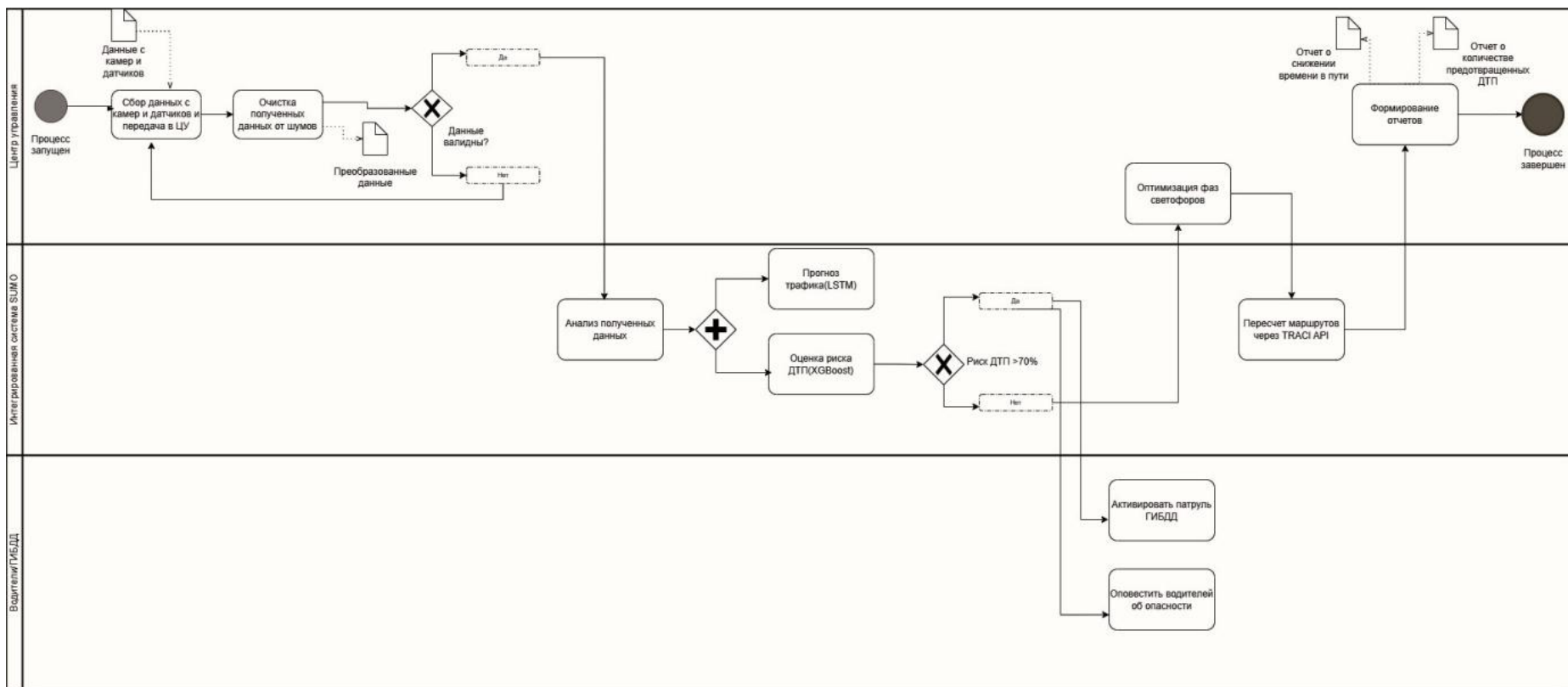


Рис. 4. BPMN-схема бизнес-процесса ИТС по организации БДД

После запуска процесса на шаге 1 происходит сбор данных с камер и радаров по фиксации скорости, количества транспортных средств и аварийных событий. Эти данные передаются в ЦУДД.

На шаге 2 «Препроцессинг» происходит обработка полученных данных, включающая в себя их очистку от шумов и нормализацию моделей машинного обучения для подготовки к дальнейшему анализу.

На шаге 3 выполняется анализ и прогнозирование. Шаг разбит на две ветки:

ветка 1: прогнозирование заторов (LSTM);

ветка 2: классификация рисков ДТП (XGBoost).

На шаге 4 принимаются решения исходя из следующего условия: если риск ДТП >70 %, то запускается аварийный сценарий, при котором передается сигнал ГИБДД для активации патруля и предотвращения аварий, а также осуществляется оповещение водителей об опасных ситуациях; в ином случае через ЦУДД оптимизируются фазы светофоров.

На шаге 5 «Исполнение» происходит симуляция дорожной ситуации в системе SUMO, в результате которой осуществляется пересчет маршрутов с использованием TraCI API (интерфейс для взаимодействия с симуляцией трафика SUMO) для нахождения оптимального решения.

На заключительном шаге 6 оценивается эффективность процесса и формируются отчеты по снижению времени в пути и количеству предотвращенных ДТП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика управления транспортными потоками, основанная на современных методах анализа данных и математического моделирования, применима для осуществления процесса управления БДД в ТС.

Ключевые достижения

1. Разработанный инструментарий:

а) для обработки данных: созданы алгоритмы интеграции гетерогенных источников (ГИС, детекторов, камер фотовидеофиксации) с погрешностью ≤ 5 %; реализована нормализация данных:

$$\check{x} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (16)$$

где μ – среднее значение;

σ – среднеквадратическое отклонение;

б) для прогнозирования: LSTM-сети показали точность 89,2 % (F1-score) при прогнозе заторов на 30 мин;

в) для оптимизации: метод SQP должен обеспечить сходимость за 50 итераций с улучшением целевой функции на 23 %.

2. Научная новизна:

предложен гибридный подход (IDM + машинное обучение), снижающий ошибку моделирования скорости на 18 % по сравнению с классическими методами;

разработана методика калибровки параметров IDM:

$$\min_{a,b,T} \sum_{i=1}^N (v_{sim}^i - v_{real}^i)^2. \quad (17)$$

3. Практическая значимость:

для ИТС: подтверждена возможность интеграции с SUMO через TraCI API (время отклика <1 с); создан цифровой двойник тестового участка (погрешность воспроизведения потоков ≤ 7 %);

для управления: алгоритмы адаптивного регулирования сократили время поездки на 14 % в симуляции; выявлены критические параметры для мониторинга (загрузка полосы >85 %, скорость <30 км/ч).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов подтверждает предпочтительность применения инструментария адаптивного управления транспортными потоками, который помогает быстро выявлять изменения во внешней среде, анализировать их последствия и корректировать свои действия. Инструментарий включает в себя модели и методы для анализа текущей ситуации и управления движением, ИТС и т. д.

Применяемые методы создают теоретическую и технологическую основу для внедрения адаптивных систем управления транспортом. Результаты готовы к апробации на реальных объектах дорожной сети в рамках пилотных проектов и будут иметь практическую ценность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: <http://consultant.ru> (дата обращения: 15.07.2025).
2. Долгосрочный прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года от 11 ноября 2018 года. URL: <http://economy.gov.ru> (дата обращения: 15.07.2025).
3. Миротин Л.Б., Покровский А.К., Некрасов А.Г. Управление социально-техническими системами: учебное пособие. М.: Академия, 2014. 190 с.
4. Курганов В.М. Логистические транспортные потоки: учебно-практическое пособие. М.: Дашков и К°, 2003. 249 с.
5. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Перо, 2021. 294 с.
6. Щёголев М.П., Ключин А.Ю. Основы оптимизации транспортного потока для развития сети автомобильных дорог // *Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей XI Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 306–309.
7. Щёголев М.П., Ключин А.Ю. Основы совершенствования интегрированных систем управления безопасностью дорожного движения // *Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей XI Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 309–313.
8. Хайндман Р., Атанасопулос Дж. Прогнозирование: принципы и практика. М.: ДМК-Пресс, 2023. 459 с.
9. Сравнительный анализ двух ведущих программных продуктов для моделирования транспортного потока. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-kompyuternyh-produktov-dlya-modelirovaniya-dorozhnogo-trafika-ptv-i-sumo/viewer> (дата обращения: 15.07.2025).
10. Документация SUMO. URL: [http://Documentation-SUMO Documentation \(dlr.de\)](http://Documentation-SUMO Documentation (dlr.de)) (дата обращения: 15.07.2025).
11. Краткое руководство по выполнению проектов в PTV Vissim 6. URL: https://bespalovdotme.files.wordpress.com/2017/03/quickstart_vissim_6-0.pdf (дата обращения: 15.07.2025).

Для цитирования: Ключин А.Ю. Инструментарий адаптивного управления транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 72–82.

METHODS AND TOOLS FOR ADAPTIVE TRANSPORT FLOW MANAGEMENT IN TRANSPORT SYSTEMS

A.Yu. KLYUSHIN, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: klalex@inbox.ru

The article is devoted to the set of means used to implement the process of road safety management in transport systems. This requires, first of all, the construction of realistic models of traffic flows, which will bring positive changes in reducing traffic intensity and thus increase the efficiency of the hybrid intelligent transport system. The article proposes the improvement of applied research methods based on a hybrid approach to adaptive traffic flow management.

Keywords: transportation system, automated traffic management system, traffic safety, adaptive control, hybrid intelligent system.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 25.08.2025;
принята/accepted: 25.08.2025

УДК 004.896

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-82-90

АРХИТЕКТУРА МОДЕЛИ АГЕНТА С АВТОНОМНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

Г.П. ВИНОГРАДОВ, д-р техн. наук, Н.В. КИРСАНОВА, ст. препод.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lena.tver@inbox.ru

© Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В., 2025

Разработка моделей и алгоритмов поведения искусственных сущностей (агентов), демонстрирующих автономное поведение, соответствующее их личностному и мотивационному состоянию, а также условиям окружающей среды, является актуальной проблемой. Автономность сущности предполагает наличие внутренней структуры и механизма, позволяющих ей иметь собственные потребности и интересы; на их основе она будет динамически генерировать и выбирать цели, которые определяют самостоятельное автономное поведение. Внутренняя мотивация позволяет агенту функционировать и демонстрировать поведение, даже при отсутствии внешних стимулов, благодаря постоянному изменению его внутреннего эмоционального и физиологического состояния. В статье предложены архитектура и модель для представления внутренних движущих факторов интеллектуальных виртуальных агентов и управления ими с использованием концепции мотивации.