

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-4-41-50

Захаров Дмитрий Александрович,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия, zaharovda@tyuiu.ru

Козин Евгений Сергеевич,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия, kozines@tyuiu.ru

Захаров Николай Степанович,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия, zaharovns@tyuiu.ru

Шепелев Владимир Дмитриевич,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Россия, shepelevvd@susu.ru

Manuscript received 23 January 2026;
Accepted 27 March 2026

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 25-29-000288 "Автоматизация
процесса обработки и анализа параметров
транспортной макромоделли города", <https://rscf.ru/project/25-29-000288>

Ключевые слова: улично-дорожная сеть,
интенсивность движения, параметры транспортного
потока, пространственно-временная неравномерность,
светофорный объект, сигнальный план

В статье рассматривается пространственно-временная неравномерность транспортных потоков на улично-дорожной сети города. Показано неравномерное распределение интенсивности движения автомобилей в течение суток как в целом по перекрестку, так и по отдельным направлениям на примере ключевого пересечения улиц в городе Тюмень. Приведена кластеризация интенсивности движения автомобилей по направлениям методами машинного обучения. Результаты показали наличие 4 различных классов, для которых целесообразно разрабатывать отдельный сигнальный план работы светофора. При этом границы кластеров могут не соответствовать началу нового часа в сутках. Для практического внедрения требуется настройка шаблонов баз данных систем мониторинга интенсивности движения автомобилей. Корректировка моментов переключения сигнальных планов с учетом часовой неравномерности интенсивности движения позволяют снизить время задержки автомобилей до 15% в отдельные временные интервалы. Результаты исследования неравномерности интенсивности движения автомобилей могут быть использованы при выборе методов повышения эффективности организации движения на перекрестках за счет корректировки сигнальных планов, очередности движения автомобилей по направлениям и количества фаз светофорного регулирования. Анализ пространственно-временной неравномерности интенсивности движения необходим при совершенствовании транспортной макромоделли города для решения задач транспортного планирования, развития цифровых двойников города и Интеллектуальных транспортных систем.

Информация об авторах:

Захаров Дмитрий Александрович, Тюменский индустриальный университет, заведующий кафедрой "Эксплуатация автомобильного транспорта", канд. техн. наук, доцент. ORCID 0000-0001-9594-9144

Козин Евгений Сергеевич, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры "Сервис автомобилей и технологических машин", канд. техн. наук, доцент. ORCID 0000-0002-6774-3285

Захаров Николай Степанович, Тюменский индустриальный университет, заведующий кафедрой "Сервис автомобилей и технологических машин", д-р техн. наук, профессор. ORCID 0000-0001-8415-0505

Шепелев Владимир Дмитриевич, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), доцент Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники "Сердце Урала", канд. техн. наук, доцент. ORCID 0000-0002-1143-2031

Для цитирования:

Захаров Д. А., Козин Е. С., Захаров Н. С., Шепелев В. Д. Анализ пространственно-временной неравномерности дорожного движения на перекрестке с использованием методов машинного обучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №4. С. 41-50.

For citation:

D. A. Zakharov, E. S. Kozin, N. S. Zakharov, V. D. Shepelev, "Analysis of some parameters of the city's public transportation using machine learning methods," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 4, pp. 41-50. (in Russian)

Введение

Повышение качества жизни и активностей жителей городов также приводят к увеличению транспортной подвижности (количества поездок на одного жителя) и суточного пробега автомобиля. При этом увеличивается нагрузка на улично-дорожную сеть. Поэтому проблемы в управлении городским трафиком сохраняются и требуется постоянное совершенствование схем организации движения и режимов работы светофоров с учетом пространственно-временных изменений и воздействия внешних факторов [1]. В работе отмечается, суточная неравномерность интенсивности движения автомобилей, сформированная рабочими и учебными целями передвижений вызванный и неравномерное пространственное распределение транспортного спроса создают мгновенный мегатрафик, который усложняет процессы управления крупным городом.

Проблема транспортных заторов усиливается при реактивной стратегии развития транспортной инфраструктуры, когда новые участки улично-дорожной сети строятся позже ввода в эксплуатацию жилых объектов. Постепенное и поэтапное развитие крупных новых районов города формирует временную неравномерность транспортного спроса.

Для повышения устойчивой мобильности и эффективности управления трафиком в городах активно внедряются интеллектуальные транспортные системы (ИТС). ИТС применяется как для оперативного управления в режиме реального времени, так и перспективного планирования. Важнейшим управляемым объектом в ИТС при оперативном управлении являются светофоры [2]. Авторы работы [3] предложили использовать показатель занятости полосы для оценки эффективности работы светофорных объектов и последующей оптимизации.

Также нейросетевые технологии активно используются для определения оптимальных режимов работы светофорных объектов при управлении дорожным движением [4]. Это особенно актуально при переходе от локального адаптивного управления на одном перекрестке к сетевому адаптивному управлению на большой территории города и в будущем при создании ИТС верхнего уровня. В этом случае каждый светофорный объект на перекрестке является отдельным агентом и управляется в системе отдельно с учетом рабочих параметров других агентов.

Опыт обучения и использования искусственной нейронной сети (ANN) в управлении светофором на перекрестке представлен в работе [5]. Для решения оптимизационной задачи обученная нейросетевая модель прогнозировала среднее время задержки для более чем 11 тысяч комбинаций фазовых коэффициентов и длительности цикла (brute force) при заданной интенсивности движения, после чего выбирался сигнальный план с наименьшим значением времени задержки. Оптимизация сигнального плана за счет применения ANN позволило сократить среднее время задержки транспортных средств на перекрестке на 22,4 % для периода с 7:00 до 8:00 и на 20,6 % для периода с 8:00 до 9:00 и является альтернативой традиционному адаптивному управлению с детекторами, работающими на разрыв потока. Предложенный авторами [6] метод адаптивного управления светофорами на основе нечеткой кластеризации (Fuzzy C-means) структуры транспортного потока демонстрирует большую эффективность в сравнении

с известными методами коллективного воздействия и локального («слабоадаптивного») управления.

Сложность и трудоемкость управления светофорами определяется пространственной и временной неравномерностью транспортного потока. В статье [7] авторы отмечают, что транспортный поток на автомагистралях изменяется как во времени, так и в пространстве, а закономерности изменения определяются не только временными и пространственными факторами, но и внешними условиями, такими как праздники, погодные условия, плотность расселения и динамика изменения численности жителей.

Существенное влияние на параметры транспортного потока оказывают доля и количество автомобилей, выполняющих левый поворот, а также длина накопительной полосы для данного маневра [8]. Неравномерность интенсивности движения по отдельным направлениям вызывает необходимость дифференцированного учета транспортного потока не только по подходам к перекрестку и узлу в целом, но и по отдельным направлениям. Также время задержки транспортных средств при проезде перекрестка зависит от наличия полосы для маршрутных транспортных средств и интенсивности движения пешеходов при отсутствии выделенной пешеходной фазы светофорного регулирования [9].

В статье [10] отмечается значительные колебания интенсивности движения автомобилей в течение суток. Наибольшие пики, а следовательно и максимальная загрузка автомобильных дорог приходится на периоды с 7 до 9 утра, и с 17 до 19 ч вечера. При этом по территории города максимальные пики могут отличаться и зависят от удаления района города от центра. Для удаленных районов утренние пики начинаются раньше, чем в центральных районах. В вечернее время наоборот, сначала пики формируются в центральной части – и далее смещаются по времени к периферийным районам.

Прогнозирование является одной из важнейших функций в создаваемых в городах РФ ИТС. Для учета пространственных и временных паттернов в движении при прогнозировании транспортного потока в работе [11] используются матрицы смежности и временные матрицы. При этом интенсивность движения определялась за 15-ти минутные интервалы, что позволило исследователям обеспечить достаточное количество данных для обучения и тестирования модели.

При прогнозировании интенсивности движения автомобилей важно учитывать специфику города. Для курортных городов часы пик отличаются от обычных городов [12]. В исследовании [13] отмечается, что для краткосрочного прогнозирования изменения в дорожном движении наиболее оптимальным является период в 1 час. При меньшем периоде увеличивается погрешность в расчетах, при большем – трудоемкость на обработку данных. Период с данными по интенсивности движения ТС в 1 час для анализа обеспечивает наилучший компромисс между точностью прогнозирования и вычислительной эффективностью. Также в исследовании отмечается целесообразность учета временных и пространственных изменений параметров транспортного потока при прогнозировании его состояния. Авторы работ [14, 15] отмечают сложность прогнозирования параметров работы транспортных систем с высоким уровнем точности из-за динамического взаимодействия и взаимного влияния между пространственными и временными характеристиками.

Андронов Р.В. отмечает [16], что способ моделирования и

работу светофорных объектов на основе теории транспортных потоков возможно применять для изолированных перегонов, для которых автокорреляция не значима. Наличие автокорреляции показывает синхронный групповой характер движения (в том числе «пачками») и моделирование должно производиться раздельно. В работе интенсивность движения изучается с постоянным шагом 5 сек, так как это соответствует значению критерия о принятии решения о переключении сигнала светофора при адаптивном управлении.

В работе [17] для кластеризации участков улично-дорожной сети крупного города по уровню загрузки в условиях изменяющейся интенсивности движения автомобилей применяется алгоритм Лейдена. Исследование показало, что с ростом загрузки УДС кластеры распадаются, а узлы вблизи участков с перегрузкой образуют границы между кластерами. Это доказывает необходимость изучения узлов в дорожной сети как отдельных объектов. Автоматизация процесса анализа позволяет повысить эффективность работ по оптимизации транспортных систем.

Целью данного исследования является разработка метода определения оптимального времени переключения сигнальных планов светофора с помощью методов машинного обучения и установленных закономерностей пространственно-временной неравномерности дорожного движения на перекрестке крупного города с числом жителей до 1 млн. чел.

Достижение данной цели позволит снизить время задержки автомобилей и ОТ при движении на перекрестках в городских условиях с учетом пространственно-временной неравномерности интенсивности движения транспортных средств. Значимость исследования заключается в совершенствовании прогнозного метода управления светофорами за счет повышения уровня соответствия сигнального плана фактическим условиям движения автомобилей.

2 Теоретическая часть

При проведении исследований применяются методы: гипотетический методы, системный подход, натурные наблюдения, математическое моделирование, корреляционно-регрессионный анализ, машинное обучение. Учитывая, что наибольшая доля в составе транспортного потока приходится на легковые автомобили жителей города и большинство транспортных заторов формируется на регулируемых перекрестках улиц со светофорами в исследовании изучается транспортный поток на перекрестке.

Изучение неравномерности параметров работы в системе управления дорожным движением проводится по интенсивности движения автомобилей с учетом направлений движения.

За период измерения выбран интервал 15 мин. Выбор интервала обусловлен двумя причинами. Во-первых, в течение часа существует неравномерность движения, особенно в часы пик. Для учета этой неравномерности необходимо делить интервал в 1 час на несколько частей. Во-вторых, необходимо снизить погрешность измерений. Проезд сложного перекрестка с многофазным режимом управления в час пик может занять 2-3 цикла светофорного регулирования с длительностью цикла до 3-4 мин. Изучение неравномерности движения в интервалах до 10-12 мин может привести к погрешности измерений, так как один и тот же объект (автомобиль) может

быть посчитан два-три раза. Поэтому принято решение исследовать неравномерность движения в интервалах 15 мин. Мониторинг интенсивности движения автомобилей в сечении стоп-линии перекрестка за один работы светофора (до 2-4 мин) актуален при адаптивном управлении с возможностью изменения параметров в каждом цикла работы светофора.

Изучение неравномерности параметров системы управления дорожным движением в течение дня вызвано необходимостью оценки эффективности работы системы и определения управляющих воздействий для улучшения качества работы для наиболее проблемных периодов времени. Такие периоды в крупных городах достаточно явно проявляются в утреннее и вечернее время при совершении поездок с рабочими и учебными целями утром и обратно в вечернее время. Управляемыми воздействиями на качество работы системы является оптимизация прогнозного режима работы светофорного объекта в заданное время. Это, как правило, начало очередного часа суток (например, 7:00). Реже встречается включение нового режима в течение часа (например, 7:30).

В исследовании проводилась оценки неравномерности интенсивности движения транспортных средств в течение суток. Проводилась кластеризация автомобильного трафика (интенсивность движения) и оценка соответствия сформированных классов и режимов работы светофорного объекта на примере пересечения улиц в центральной части крупного города.

В рамках набора данных по трафику на перекрестке в центральной части города определены значения интенсивности движения автомобилей (зависимая переменная) за 16 ч в утреннее, дневное и вечернее время с шагом 15 мин по 12 направлениям движения (независимая переменная) на регулируемом X-образном перекрестке в будний день. Общий объем данных в этом случае составил 768 значений.

Для оценки эффективности организации дорожного движения и уровня обслуживания в указанные интервалы времени использовалось имитационное моделирование на специализированном программном обеспечении для определения параметров транспортного потока. Имитационное моделирование позволило существенно увеличить перечень расчетных параметров для анализа по сравнению с натурными наблюдениями и использованием только измеряемых показателей.

Кластеризация интенсивности движения автомобилей по автомобильной дороге производилась методом k-средних (kMeans) с использованием фреймворка sklearn языка программирования Python.

Все направления движения автомобилей на перекрестке были разделены на 2 части: в центр, куда входят восемь и из центра, куда входят 5 полос движения по 3 направлениям. Интенсивность движения автомобилей по каждой полосе выражается количеством прошедших по ней автомобилей с интервалом в 15 минут за временной промежуток с 6.00 до 22.00. В ходе исследований производилась кластеризация для направления «в центр», «из центра» и для общей интенсивности движения по всем направлениям.

Наблюдаемая динамика интенсивности движения автомобилей на перекрестке двум магистральным улиц города характеризуется выраженной пространственно-временной неоднородностью.

Пусть $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ – множество направлений движения автомобилей на перекрестке, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ – временной интервал анализа (в 15-ти минутных интервалах),

$N_r(t)$ – интенсивность движения автомобилей (количество проезжающих транспортных средств в сечении дороги за временной интервал) по направлениям $r \in R$ в момент времени $t \in T$.

Длительность временного интервала анализа может варьироваться от 15 минут до суток, что соответствует следующим значениям k :

- $k=96$ при интервале 15 мин,
- $k=24$ при интервале 1 ч,
- $k=1$ при суточном агрегировании.

Для типичного X образного перекрёстка с четырьмя подходами и четырьмя направлениями движения на каждом подходе максимальное число направлений составляет $m=16$ (по 4 направления на подход: два прямых, один левый и один правый поворот, где допустимы).

Интенсивность движения автомобилей на перекрестке может быть представлена следующим образом:

- по одному направлению за весь период $N_r(T) = (N_r(t_1), N_r(t_2), \dots, N_r(t_k))$;
- по всем направлениям в один момент времени $N_r(t_i) = (N_{r1}(t_i), N_{r2}(t_i), \dots, N_{rm}(t_i))$;
- по всем направлениям за весь период $N_r(T) = \{N_{rj}(t_i) \mid r_j \in R, t_i \in T\}$.

Суммарная интенсивность движения транспортных средств (транспортный поток) на перекрёстке за сутки определяется по формуле:

$$N_r(T) = \sum \sum N_{rj}(t_i). \quad (1)$$

В общем виде суточная интенсивность движения транспортных средств на перекрестке можно описать условием $N_r(t) = \{N_{r1}(t), N_{r2}(t), \dots, N_{rm}(t)\}$.

Это свидетельствует о значительной пространственно-временной неравномерности при движении транспортных потоков.

В отличие от маршрутной сети и системы ГПОТ, где возможно только планирование от нескольких месяцев до 3-5 лет, управление дорожным движением на городской улично-дорожной сети допускает оперативное регулирование транспортными потоками как во времени (через изменение режимов светофорного регулирования), так и в пространстве (с помощью временных ограничений движения по направлениям и динамических схем организации движения (реверсивных полос, знаков переменной информации)). Однако в большинстве городов схемы организации движения на перекрёстках остаются фиксированными во времени из-за недостаточного внедрения знаков переменной информации. Следовательно, пространственные управляющие воздействия фактически отсутствуют:

$$\Delta m_r = 0, \Delta n_r = 0, \Delta L_r = 0, \quad (2)$$

где:

Δm_r – изменение числа допустимых направлений движения (например, запрет отдельных поворотов с использованием динамических знаков переменной информации),

Δn_r – изменение числа полос по направлению r (реверсивное движение),

ΔL_r – изменение длины маршрута при повороте вследствие временного ограничения (отнесенный поворот).

В этих условиях множество реально доступных управляющих воздействий сводится к параметрам светофорного регулирования:

$$U_r \{ \Delta \varphi(t), \Delta \tau_{ци}(t), \Delta \tau_3(t) \}, \quad (3)$$

где:

U_r – множество допустимых управляющих воздействий,

$\Delta \varphi(t)$ – изменение количества фаз в цикле,

$\Delta \tau_{ци}(t)$ – изменение длительность цикла,

$\Delta \tau_3(t)$ – изменение времени разрешающего (зеленого) сигнала светофора по каждому направлению (т.е. фазовых коэффициентов).

Изменение цикла $\tau_{ци}$ влияет на количество возможных сигнальных планов в течение суток, а также на частоту их переключения. Оптимизация φ и τ_3 при фиксированном $\tau_{ци}$ представляет собой классическую инженерную задачу синтеза светофорных режимов. На практике наиболее распространён подход, при котором оптимальные режимы разрабатываются на основе средней интенсивности движения автомобилей за 1 час. Дальнейшее развитие методов управления связано с переходом к 15 минутной дифференциации интенсивности движения транспортных средств и учётом внутрисуточной неравномерности.

Целью настоящего исследования является развитие адаптивного аспекта прогнозного управления светофорным объектом посредством:

- уточнения временной гранулярности анализа транспортных потоков,
- идентификации оптимальных моментов переключения сигнальных планов.

Оптимальный момент переключения определяется по критерию минимизации среднего времени задержки транспортных средств при проезде перекрёстка $\delta \rightarrow \min$.

Таким образом, множество реально реализуемых воздействий ограничено возможными изменениями сигнальных планов:

$$U_{real} = \{u \in U_r \mid t \geq t_0, T_{min} \leq \Delta t \leq T_{max}\}, \quad (4)$$

где:

U_{real} – подмножество допустимых и реализуемых управляющих воздействий,

t_0 – момент начала адаптивного регулирования в течение суток,

T_{min} – минимально допустимая длительность одного сигнального плана,

T_{max} – максимально допустимый интервал между переключениями.

Любое воздействие $u \in U_r$ подлежит процедуре принятия решения, формализуемой условием:

$$u \in U_{rex} \Leftrightarrow \Phi(u, r, R_{conn}) \geq \Theta, \quad (5)$$

где:

$\Phi(\cdot)$ – функция обоснования, агрегирующая оценку снижения задержек транспортных средств, социально-экономические эффекты и другие критерии,

$R_{conn} \subset R$ – подмножество направлений, связанных с данным воздействием (например, безопасность движения и аварийность, движение общественного транспорта и пешеходов, и т.д.),

3 Результаты

Θ – порог допустимости, устанавливаемый регулирующим органом (муниципалитетом).

Для минимизации влияния краткосрочных аномалий и обеспечения статистической устойчивости в настоящем исследовании используется 16 часовой интервал наблюдений с временным шагом Δt=15 минут.

Несмотря на высокую пространственно-временную изменчивость интенсивности движения {Nr(t)}, система управления движением на перекрестке обладает значительной инерционностью и ограниченной степенью свободы в пространстве управляющих воздействий U_r. Это обуславливает необходимость следующих мероприятий:

- внедрение технических средств системы мониторинга (при ее отсутствии);
- разработка алгоритмов проактивного адаптивного управления светофорами;
- установление часовых и суточных изменений и неравномерности интенсивности движения автомобилей по направлениям во времени и пространстве;
- создание механизмов гибкого оперативного реагирования в рамках допустимого подмножества U_{real};
- интеграция прогнозных моделей в процессы светофорного регулирования.

Анализ проводится на агрегированной 15-ти минутной сетке за 16 часов, что обеспечивает статистическую надежность выводов и позволяет формализовать ограничения при синтезе управляющих решений в условиях жёсткой институциональной среды.

В строгой постановке гипотеза формулируется следующим образом: движение транспортных потоков на перекрестке магистральных улиц характеризуется временной X(t) и пространственной X(r) неравномерностью параметров состояния. Применение адаптивной стратегии управления U_{ad}(t,r), дифференцированной по пространственно-временным сегментам, обеспечивает существенное снижение значение функционала эффективности J (например, средней задержки δ) по сравнению со статической (U_{st}(t,r)=const или унифицированной (U_{un}(t,r)=f(t)) стратегиями, не учитывающими локальные особенности транспортных потоков по направлениям и временным интервалам.

В статье рассматривается гипотеза о пространственно-временной неравномерности интенсивности движения транспортных средств на перекрестках и возможности снижения времени задержки за счёт адаптивного управления режимами работы светофоров и пофазными схемами движения по направлениям.

В общем виде временные ряды для интенсивности движения транспортных средств на перекрестке магистральных улиц описываются уравнением:

$$Y_i = Y_0 + \sum A_{Yk} \cdot \sin(m \cdot (k \cdot T_i - T_{0k})), \quad (6)$$

Где Y₀ – среднее значение Y за цикл;

k – номер гармоники;

g – количество гармоник;

A_{Yk} – полуамплитуда колебания k-той гармоники;

m – интервал между T_i и T_{i+1} в градусах;

T_{0k} – начальная фаза колебания в градусах.

Для проверки гипотезы и подтверждения адекватности предложенной гармонической модели проведены экспериментальные исследования.

Временная (суточная) неравномерность интенсивности движения ТС на участке УДС оценивалась в два этапа: оценка стационарности, суточной неравномерности. Анализ интенсивности движения на перекрестке в течение дня (рис. 1) показал, что данный параметр изменяется как во времени, так и в пространстве.

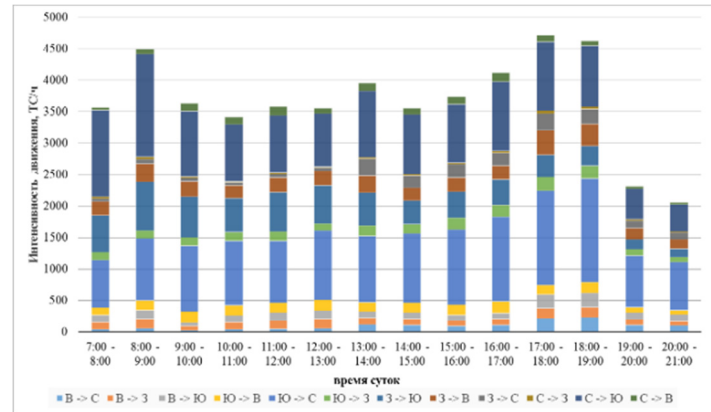


Рис. 1. Интенсивность движения ТС по направлениям на перекрестке

В утренние часы наибольшее количество автомобилей движется в центр города по направлению «север-юг». Утреннее время наибольшая интенсивность движения отмечается в период с 08:00 до 09:00 часов. Интенсивность движения в этот период на 27% выше, чем в периоды с 07:00 до 08:00 и с 09:00 до 10:00 ч.

В вечернее время пик интенсивности движения длится 3 часа с 16 до 19 ч, с максимальной интенсивностью в последние два часа. Интенсивность движения в этот период на 34 % выше, чем в дневное время. При этом основная нагрузка улично-дорожной сети формируется по направлению «юг-север». Различия между значениями минимальной и максимальной интенсивности движения по каждому направлению достигают до 400%.

Методом кубической интерполяции масштабировали временной ряд из 16 временных интервалов (с 06:00 до 22:00) продолжительностью в 1 час до 12 интервалов в том же диапазоне времени, но увеличенных по продолжительности. Затем обработали временной ряд с помощью гармонического анализа для выявления часовых колебаний в течение суток (в пределах измеряемого диапазона времени с 06:00 до 22:00) методом линеаризации гармоник. Определение часовой составляющей временного ряда для интенсивности движения в узле производилось методом линеаризации гармоник (рис. 2). Номер статистически значимой гармоники соответствует периоду колебаний временного ряда. Оценка статистической значимости линеаризованных гармоник производилась по критерию Стьюдента.

После обработки результатов временной ряд (6) изменения интенсивности движения транспортных средств на перекрестке описывается уравнением (6) при Y₀=3267.

$$Y_i = Y_0 + 1020,6 \cdot \cos(30 \cdot (T_i - 6,64)) + 967,4 \cdot \cos(30 \cdot (2 \cdot T_i - 6,26))$$

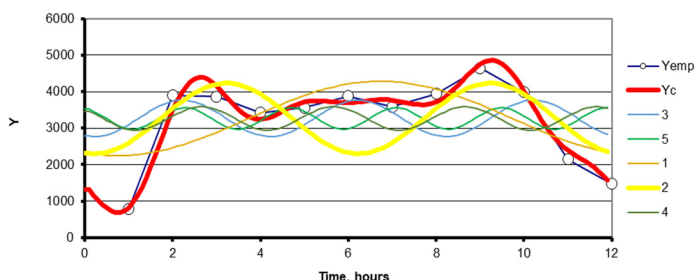


Рис. 2. Гармонический ряд суммарной интенсивности движения ТС на перекрестке

Учитывая неравномерность интенсивности движения ТС во времени был выполнен расчет оптимальной длительности цикла светофорного регулирования и параметров дорожного движения по средней интенсивности движения в час в программе Lisa+ (табл. 1).

Таблица 1

Параметры дорожного движения и длительность цикла светофорного регулирования в течение дня

Время суток	Интенсивность движения, ТС/ч	Среднее время задержки ТС, с	Оптимальная длительность цикла, ч	Уровень загрузки в узле/отдельному направлению
7:00 - 8:00	3565	46,0	128	0,56/0,76
8:00 - 9:00	4489	62,6	186	0,67/0,86
9:00 - 10:00	3630	51,1	138	0,66/0,81
10:00 - 11:00	3410	44,9	122	0,61/0,79
11:00 - 12:00	3577	47,7	133	0,63/0,79
12:00 - 13:00	3555	47,7	136	0,61/0,81
13:00 - 14:00	3948	52,5	139	0,67/0,81
14:00 - 15:00	3551	46,7	125	0,63/0,79
15:00 - 16:00	3735	48,3	128	0,64/0,81
16:00 - 17:00	4115	50,0	136	0,66/0,82
17:00 - 18:00	4706	80,9	191	0,72/0,95
18:00 - 19:00	4623	81,4	195	0,71/0,95

Учитывая условия формирования транспортного затора при уровне загрузки более 0,85 можно сделать вывод о формировании транспортных заторов на отдельных направлениях перекрестка в утреннее (8:00 – 9:00) и особенно в вечернее время (17:00 – 19:00). При расчете оптимальной длительности цикла работы светофора для периода времени с максимальной интенсивностью движения в программе Lisa+ введено ограничение по максимальному значению в 200 с. С увеличением интенсивности движения увеличивается оптимальная расчетная длительность цикла (рис. 3).

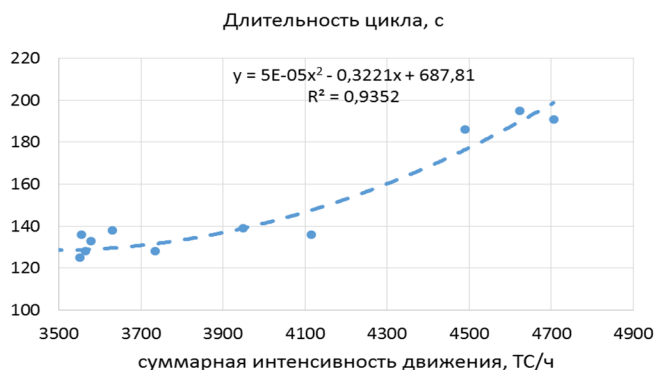


Рис. 3. Влияние суммарной интенсивности движения на перекрестке на оптимальную длительность цикла

Несмотря на оптимизацию длительности цикла с ростом интенсивности движения увеличивается среднее время задержки ТС (рис. 4) при проезде перекрестка с учетом действующих сигнальных планов.

Для оценки неравномерности транспортного потока во времени и по направлениям (в пространстве) проведена кластеризация интенсивности движения по двум направления «в центр» и «из центра» города.

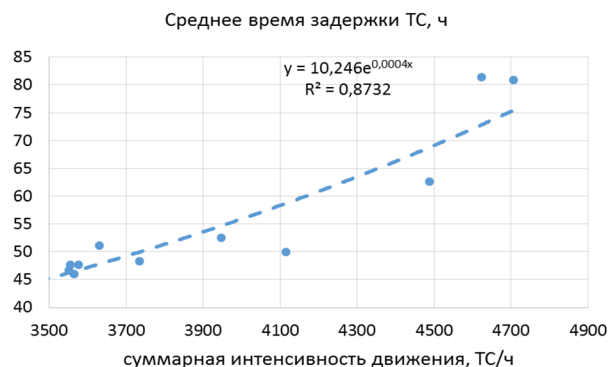


Рис. 4. Влияние суммарной интенсивности движения на перекрестке на среднее время задержки

Изменение оптимальной длительности цикла и уровня загрузки в течение дня показано на рис. 5 и 6. Максимальная нагрузка на УДС приходится на утреннее и вечернее время.



Рис. 5. Изменение оптимальной длительности цикла светофорного регулирования в течение дня

Согласно графику каменной осыпи (инерции) все данные по интенсивности движения на перекрестке в течение дня можно разделить на 2 либо на 4 кластера (рис. 7).



Рис. 6. Изменение уровня загрузки узла в течение дня

Разделение на два кластера существенно упрощает фактическую вариацию интенсивности движения в течение дня, что может привести в погрешности в расчетах при формировании оптимальных режимов работы светофоров. Поэтому принято решение разделить данные на четыре кластера.

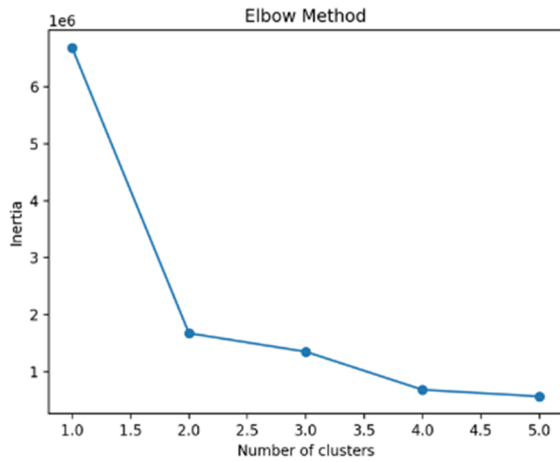


Рис. 7. Определение количества кластеров по интенсивности движения на перекрестке

Результаты кластеризации суммарной интенсивности движения ТС в узле по всем 12 направлениям движения показаны на рис. 8.

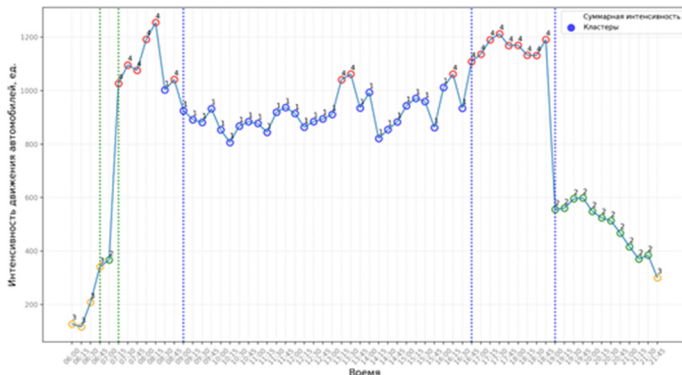


Рис. 8. Суммарная интенсивность движения по всем направлениям движения с разделением данных на кластеры

В результате для каждого временного промежутка в 15 минут был определен соответствующий ему кластер. Таким образом, для каждой временной точки в указанный период с 6.00 до 22.00 был определен кластер, которому она соответствует.

Детализация интенсивности движения автомобилей до 15-ти минутных интервалов позволила уточнить периоды пиковых нагрузок. На рис. 8 явно выделяются два пиковых периода с высокой интенсивностью движения более 1000 автомобилей: с 7:15 до 8:45 и с 16:45 до 19:00. Они соответствуют утреннему и вечернему часу пик и принадлежат к кластеру №4. Точки кластера №1 соответствуют интенсивности движения в 900 автомобилей в час и в остальное время рабочего дня с 9:00 до 16:30 и не содержат существенных скачков. Кластеру №3 соответствует низкая интенсивность движения менее 300 автомобилей в час в утреннее время до 6:45 и после

21:30. Точки кластера №2 расположены между значениями первого и третьего кластеров и соответствуют средней интенсивности движения в 500 автомобилей.

Тренды и пиковые значения изменения интенсивности движения по направлениям существенно отличаются (рис. 9).

По направлению в центр интенсивность движения автомобилей снижается в течение дня, по направлению «из центра» наоборот, увеличивается и достигает максимального значения вечером. Максимальные значения интенсивности движения на перекрестке и загрузка улично-дорожной сети соответствует кластеру №4.

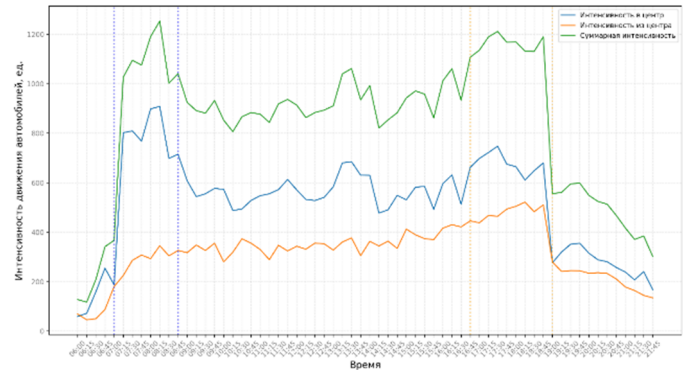


Рис. 9. Изменение суммарной интенсивности движения на перекрестке по всем направлениям в течение дня

Для кластеризации параметров интенсивности движения в периоды максимальной нагрузки применялся метод k-средних. Для этого методом каменной осыпи было определено количество кластеров, на которые можно разбить данные пиковой интенсивности движения (рис. 10).

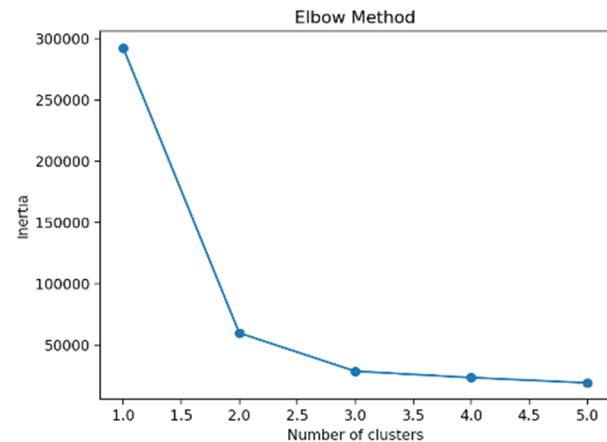


Рис. 10. График инерции для определения количества кластеров для временных интервалов интенсивности движения автомобилей

В результате разделения параметров интенсивности движения на перекрестке в период максимальной загрузки было определено, что они могут быть разделены на три кластера (рис. 11).

Первый кластер соответствует утреннему часу пик с 7:15 до 8:45. Второй кластер соответствует вечернему часу пик с 16:45 до 18:45. Третий кластер – дневное увеличение интенсивности движения и время, предшествующее вечернему часу пик.

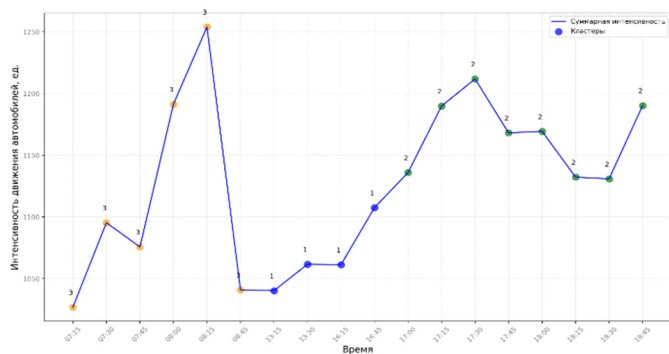


Рис. 11. Кластеризация пиковых значений суммарной интенсивности движения по всем направлениям

Применение кластеризации по интенсивности движения позволило определить временные интервалы для введения отдельных режимов работы светофорного объекта. Результаты показывают целесообразность перехода с утреннего к дневному и далее к вечернему режиму работы светофора не с начала очередного часа, а в момент существенного изменения интенсивности движения. Доказана необходимость большей детализации при определении оптимальных параметров управления транспортным потоком с учетом неравномерности в течение каждого часа.

На основе полученной кластеризации интенсивности движения с помощью имитационного моделирования в программе PTV Vissim были определены параметры транспортных потоков для фактического и скорректированного режима работы светофора. Корректировка режима работы светофора с учетом часовой неравномерности позволяет в период введения адаптированного режима снизить среднее время задержки на 15% и улучшить другие параметры транспортного потока (среднюю скорость, количество остановок и др.).

Таким образом доказана гипотеза о пространственно-временной неравномерности параметров транспортного потока и возможности их оптимизации при адаптивном управлении подсистемой дорожного движения при корректировке моментов перевода на другие режимы с учетом часовой неравномерности движения автомобилей.

Заключение

Решена научная задача по определению пространственно-временной неравномерности транспортного спроса, реализуемого жителями города с помощью личного автотранспорта. Установлено наличие 2 пиковых значений интенсивности движения автомобилей в течение суток, а также изменение интенсивности движения в течение каждого часа по отдельным направлениям движения на перекрестке, а также по узлу в целом. Знание о наличии различных пиковых значений интенсивности движения ТС позволяют дифференцировать режимы работы светофоров при прогнозном управлении и усовершенствовать данный метод. Адаптация сигнального плана под изменяющиеся условия движения и трафик позволяет повысить эффективности управления дорожным движением за счет снижения времени задержки ТС на перекрестках за счет более частой и оперативной смены сигнального плана, соответствующего фактическим условиям. В комплексе с оптимизацией схем дорожного движения это повышает качество транспортного обслуживания населения городов.

Знание закономерностей изменения интенсивности движения автомобилей в течение суток с учетом неравномерности движения в пространстве могут применяться по нескольким направлениям.

Во-первых, при формировании режимов работы светофоров, установлении количества режимов с отдельными сигнальными планами, времени переключения на сигнальные планы, адаптированные под изменяющуюся интенсивность движения.

Во-вторых, при формировании пофазных разъездов транспортных средств на перекрестке для каждой фазы цикла светофорного регулирования. В-третьих, при разработке оптимальных схем дорожного движения, в т.ч. с учетом требований по обеспечению безопасности движения.

Определены пути дальнейших исследований, которые заключаются в использовании установленных закономерностей для разработки методики адаптивного многорежимного управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным объектом. Данная методика и алгоритмы актуальны для Интеллектуальных транспортных систем.

Цикличность параметра интенсивности движения ТС на перекрестке может являться одним из критерием выбора способа управления светофорными объектами на ограниченный период времени (несколько часов) в течение дня с возможностью перехода на разные способы с учетом фактического состояния.

Анализ пространственно-временной неравномерности интенсивности движения необходим при совершенствовании транспортной макромоделей города для решения задач транспортного планирования. Изучение пространственно-временной неравномерности работы интенсивности движения ТС на перекрестках позволят дифференцировать мероприятия по повышению эффективности организации движения. Применяемый метод формирования режимов работы должен быть скорректирован при внедрении приоритета проезда перекрестков для транспортных средств наземного городского пассажирского транспорта за счет адаптивного управления светофорами. В дальнейших исследованиях к оценке нестационарности и суточной неравномерности необходимо добавить сезонную неравномерность в течение года, тренды на основе данных за несколько лет и прогноз на изменение интенсивности в будущие периоды.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-000288 "Автоматизация процесса обработки и анализа параметров транспортной макромоделей города", <https://rscf.ru/project/25-29-000288/>

Литература

1. Zheng H.; Zhang X.; Chen J. Study on Customized Shuttle Transit Mode Responding to Spatiotemporal Inhomogeneous Demand in Super-Peak. Information, 2021, 12(10), 429.
2. Sussman J. M. Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS). Berlin: Springer, 2005. 232 p.
3. Morozov V.; Petrov A. I.; Shepelev V.; Balfaqih M. Ideology of Urban Road Transport Chaos and Accident Risk Management for Sustainable Transport Systems // Sustainability. 2024. 16(6). 2596.
4. Zhenning L.; Hao Y.; Guohui Z.; et al. Network-wide traffic signal control optimization using a multi-agent deep reinforcement learning 2021.

5. Pistsov A.V.; Petrov A.I. Training and Applying Artificial Neural Networks in Traffic Light Control: Improving the Management and Safety of Road Traffic in Tyumen // *Automotive Experiences*. 2023. 6(3). pp. 528-550.

6. Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С. Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечеткой кластеризации // *Бизнес-информатика*. 2023. Т. 17. № 3. С. 70-86.

7. Zhang Y.; Chen J.; Rao J. A Deep Multi-Task Learning Model for OD Traffic Flow Prediction Between Highway Stations. *Appl. Sci.* 2025, 15(2), 779.

8. Морозов В.В., Морозов Г.Н., Шепелев В.Д. Моделирование процесса формирования автотранспортной очереди на городских регулируемых пересечениях // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19. №3. С. 61-68.

9. Elnaggar G.R.; Al-Hourani S.; Abutaha R. Real-Time Urban Congestion Monitoring in Jeddah, Saudi Arabia, Using the Google Maps API: A Data-Driven Framework for Middle Eastern Cities. *Sustainability* 2025, 17(18), 8194.

10. Пугачев И.Н., Тормозов В.С., Евтюков С.С., Смокталь Н.Н., Золкин А.Л. Многовидовая пространственно-временная свертка для повышения точности прогнозирования транспортных потоков // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19. №2. С. 31-37.

11. He B.; Liu K.; Xue Z.; Liu J.; Yuan D.; Yin J.; Wu G. Spatial and Temporal Characteristics of Urban Tourism Travel by Taxi—A Case Study of Shenzhen // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10, 445.

12. Albaloooshi F.A. Advancing Urban Planning with Deep Learning: Intelligent Traffic Flow Prediction and Optimization for Smart Cities // *Future Transp.* 2025, 5(4), 133.

13. Cui X.; Lv H. STEFT: Spatio-Temporal Embedding Fusion Transformer for Traffic Prediction // *Electronics* 2024, 13(19), 3816.

14. Ma X.; Yu H.; Wang Y. Large-Scale Transportation Network Congestion Evolution Prediction Using Deep Learning Theory // *PLOS ONE*, 2015, 10(3), e0119044.

15. Андронов Р.В., Леверенц Е.Э., Ченур П.В. Отсутствие автокорреляции временного ряда транспортного потока как критерий изолированности регулируемого пересечения // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19. №3. С. 54-60.

16. Поваляев Н.Д., Крылатов А.Ю., Шаталов Н.В. Методы кластерного анализа дорожных сетей для выявления узких мест и оптимизации движения // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2025. Т. 19. №7. С. 34-40.

17. Поспелов П.И., Яшина М.В., Таташев А.Г., Ле Дык Лонг. Задержки транспортных средств на нерегулируемом пешеходном пересечении с выделенной полосой // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Т. 16. №11. С. 35-42.

ANALYSIS OF SOME PARAMETERS OF THE CITY'S PUBLIC TRANSPORTATION USING MACHINE LEARNING METHODS

Dmitrii A. Zakharov, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, zaharovda@tyuiu.ru

Evgeniy S. Kozin, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, kozines@tyuiu.ru

Nikolay S. Zakharov, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, zakharovns@tyuiu.ru

Vladimir D. Shepelev, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, shepelevvd@susu.ru

Abstract

This article examines the spatial and temporal unevenness of traffic flows on a city's road network. It demonstrates the uneven distribution of vehicle traffic volumes throughout the day, both at the intersection as a whole and in specific directions, using a key street intersection in Tyumen as an example. Machine learning methods are used to cluster vehicle traffic volumes by direction. The results reveal four distinct classes for which it is advisable to develop a separate traffic signal plan. However, cluster boundaries may not correspond to the beginning of a new hour of the day. Practical implementation requires customization of database templates for vehicle traffic monitoring systems. Adjusting the timing of signal plan switches to account for hourly unevenness in traffic volumes can reduce vehicle delays by up to 15% in certain time intervals. The results of the traffic unevenness study can be used to select methods for improving traffic management at intersections by adjusting signal plans, vehicle traffic order by direction, and the number of traffic signal phases. Analysis of spatiotemporal unevenness of traffic intensity is necessary for improving the city's transport macromodel to solve transport planning problems, develop digital twins of the city, and intelligent transport systems.

Keywords: street and road network, traffic intensity, traffic flow parameters, spatial and temporal unevenness, traffic light, signal plan

References

- [1] H. Zheng, X. Zhang, J. Chen, "Study on Customized Shuttle Transit Mode Responding to Spatiotemporal Inhomogeneous Demand in Super-Peak," *Information*, 2021, 12(10), 429.
- [2] J. M. Sussman, "Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)," Berlin: Springer, 2005. 232 p.
- [3] V. Morozov, A. I. Petrov, V. Shepelev, M. Balfaqih, "Ideology of Urban Road Transport Chaos and Accident Risk Management for Sustainable Transport Systems," *Sustainability*, 2024, 16(6), 2596.

- [4] L. Zhenning, Y. Hao, Z. Guohui, et al., "Network-wide traffic signal control optimization using a multi-agent deep reinforcement learning," 2021 p.
- [5] A.V. Pistsov, A.I. Petrov, "Training and Applying Artificial Neural Networks in Traffic Light Control: Improving the Management and Safety of Road Traffic in Tyumen," *Automotive Experiences*, 2023, 6(3), pp. 528-550.
- [6] A.L. Beklaryan, L.A. Beklaryan, A.S. Akopov, "Simulation model of an intelligent transportation system for the "smart city" with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering," *Business Informatics*, 2023, vol. 17, no. 3, pp. 70-86.
- [7] Y. Zhang, J. Chen, J. Rao, "A Deep Multi-Task Learning Model for OD Traffic Flow Prediction Between Highway Stations," *Appl. Sci.*, 2025, 15(2), 779.
- [8] V. V. Morozov, G. N. Morozov, V. D. Shepelev, "Modeling the Formation of a Vehicle Queue at Urban Signal-Controlled Intersections," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 61-68.
- [9] G.R. Elnaggar, S. Al-Hourani, R. Abutaha, "Real-Time Urban Congestion Monitoring in Jeddah, Saudi Arabia, Using the Google Maps API: A Data-Driven Framework for Middle Eastern Cities," *Sustainability*, 2025, 17(18), 8194.
- [10] I. N. Pugachev, V. S. Tormozov, S. S. Evtukov, N. N. Smoktal, A. L. Zolkin, "Multi-view spatial-temporal convolution to improve the accuracy of traffic flow forecasting," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.2, pp. 31-37. (in Russian)
- [11] B. He, K. Liu, Z. Xue, J. Liu, D. Yuan, J. Yin, G. Wu, "Spatial and Temporal Characteristics of Urban Tourism Travel by Taxi-A Case Study of Shenzhen ISPRS," *Int. J. Geo-Inf.*, 2021, 10, 445.
- [12] F.A. Albaloooshi, "Advancing Urban Planning with Deep Learning: Intelligent Traffic Flow Prediction and Optimization for Smart Cities," *Future Transp.*, 2025, 5(4), 133.
- [13] X. Cui, H. Lv, "STEFT: Spatio-Temporal Embedding Fusion Transformer for Traffic Prediction," *Electronics*, 2024, 13(19), 3816.
- [14] X. Ma, H. Yu, Y. Wang, "Large-Scale Transportation Network Congestion Evolution Prediction Using Deep Learning Theory," *PLOS ONE*, 2015, 10(3), e0119044.
- [15] R. V. Andronov, E. E. Leverets, P. V. Chepur, "The absence of autocorrelation in the traffic flow time series as a criterion for the isolation of a controlled intersection," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.3, pp. 54-60. (in Russian)
- [16] N.D. Povaliaev, A.Yu. Krylatov, N.V. Shatalova, "Methods of cluster analysis of road networks for bottleneck detection and traffic optimization," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.7, pp. 34-40. (in Russian)
- [17] P.I. Pospelov, M.V. Yashina, A.G. Tatashev, Le Duc Long, "Delays of traffic management at an unregulated pedestrian intersection with a dedicated lane," *T-Comm*, 2022, vol. 16, no. 11, pp. 35-42. (in Russian)

Information about authors:

Dmitrii A. Zakharov, Industrial University of Tyumen, Head of the Department "Road Transport Operation", Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor. ORCID 0000-0001-9594-9144

Evgeniy S. Kozin, Industrial University of Tyumen, associate professor of the Department "Service of cars and technological machines", Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor. ORCID 0000-0002-6774-3285

Nikolay S. Zakharov, Industrial University of Tyumen, Head of the Department "Service of cars and technological machines", Doctor of Technical Sciences, professor. ORCID 0000-0001-8415-0505

Vladimir D. Shepelev, South Ural State University (National Research University), associate professor of the Advanced Engineering School of Engine Building and Special Machinery "Heart of the Urals", Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor. ORCID 0000-0002-1143-2031