

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАТРАТ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ И ПЕШЕХОДНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ В КРУПНОМ ГОРОДЕ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-6-43-51

Фадюшин Алексей Александрович,
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень,
Россия, fadyush72@gmail.com

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

Игнатьюгин Владислав Александрович,
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень,
Россия, transportnik91@gmail.com

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

Manuscript received 22 April 2025;
Accepted 26 May 2025

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 24-79-00192 "Цифровой двойник
городского пассажирского транспорта общего пользования",
<https://rscf.ru/project/24-79-00192/>

Ключевые слова: транспортное моделирование,
мобильность, затраты при реализации
корреспонденции, городской пассажирский транспорт
общего пользования, теория графов, цифровой
двойник

В статье рассмотрены вопросы пространственной неравномерности структуры подвижности жителей города. Цель исследования - повышение точности прогнозирования параметров транспортной системы на основе анализа данных и дифференциации корреспонденций жителей города с применением методов машинного обучения. В исследовании выдвигается гипотеза, что структура транспортного спроса распределена неравномерно на территории города и зависит от затрат при реализации корреспонденций. Для изучения корреспонденций жителей города в статье применяется транспортная макромоделю города Тюмень. Приводится анализ условий формирования затрат на реализацию корреспонденций, которые фиксируются в макромоделе. Для анализа корреспонденций и оценки влияния параметров транспортной системы города с применением машинного обучения проведена кластеризация корреспонденций, которые сгруппированы на 5 кластеров. Результаты обработки данных в транспортной модели показали, что наибольшее влияние на долю передвижений на индивидуальном и общественном транспорте оказывает длина и время поездки. Для двух кластеров при увлечении расстояния и времени поездки доля поездок на общественном транспорте снижается, для двух других – наоборот увеличивается. При этом общий вид зависимости для всех корреспонденций описывается уравнением параболы. Формирование 5 кластеров корреспонденций обусловлено различным уровнем транспортного обслуживания, которое определяется уровнем развития дорожной сети, общественного транспорта и его инфраструктуры с учетом и фактического разделения города на 4 части рекой, Транссибирской железной дорогой и ул. Федюнинского. Дальнейшее направление исследований связано с определением наиболее значимых факторов для каждого кластера и повышением произвольности работы с транспортными макромоделями за счет развития цифровых двойников городского транспорта.

Информация об авторах:

Фадюшин Алексей Александрович, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры "Эксплуатация автомобильного транспорта", канд. техн. наук, г. Тюмень, Россия, ORCID 0000-0001-7276-4315.

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

Игнатьюгин Владислав Александрович, Тюменский индустриальный университет, аспирант, г. Тюмень, Россия, transportnik91@gmail.com.

Шепелёв Владимир Дмитриевич, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), доцент кафедры "Автомобили и автомобильный сервис", канд. техн. наук, доцент, г. Челябинск, Россия, ORCID 0000-0002-1143-2031.

Для цитирования:

Фадюшин А.А., Захаров Д.А., Игнатьюгин В.А., Шепелёв В.Д. Пространственная неравномерность формирования затрат при реализации транспортных и пешеходных корреспонденций в крупном городе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №6. С. 43-51.

For citation:

A.A. Fadyushin, D.A. Zakharov, V.A. Ignatiugin, V.D. Shepelev, "Spatial unevenness of costs formation in the implementation of transport and pedestrian correspondences in large city," T-Comm, 2025, vol. 19, no.6, pp. 43-51. (in Russian)

Введение

Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года в качестве одного из основных направлений оптимизации систем транспортного обслуживания населения городских агломераций рассматривается приоритет движению пешеходов, средств индивидуальной мобильности и городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПОТ) над индивидуальным транспортом (ИТ) [1].

Исследование [2] показывают, что выбор способа передвижения пользователями городской транспортной системы основан на нескольких критериях. Одним из важнейших факторов, определяющих выбор людьми ГПОТ для передвижения в городах, является время на совершение поездки. Во многих крупных городах для обеспечения качества транспортного обслуживания населения реализуется концепция приоритета ГПОТ. Мероприятия по предоставлению приоритета ГПОТ повышают скорость сообщения на маршрутах и снижают временные затраты пользователей ГПОТ. Однако, такие мероприятия, реализуемые без увязки с комплексом других мер в рамках комплексной транспортной политики города, могут повысить временные задержки для пользователей ИТ и общий эффект будет незначительным [3].

В документах транспортного планирования Тюменской агломерации, при росте численности населения и пользователей ИТ к 2040 году требуется сохранение качества транспортного обслуживания населения за счет повышения доли передвижений на ГПОТ. Из-за ограничений в развитии дорожной сети, существующих задержек на регулируемых перекрестках и на маршрутах ГПОТ реализация мер по управлению структурой транспортного спроса (доли передвижений по видам транспорта и способам) требует значительных затрат для создания новой или реконструкции существующей дорожно-транспортной инфраструктуры [4]. Одним из способов повышения эффективности работы наземного ГПОТ и снижения потерь времени пассажиров является система Bus Rapid Transit (BRT). При внедрении BRT возможно изменение маршрутной сети ГПОТ, необходимо внедрение мероприятий по обеспечению приоритета ГПОТ [5]. Такие изменения в одной подсистеме городского транспорта могут повлиять на другие подсистемы и всю систему в целом и поэтому необходима комплексная оценка изменений с применением макро- и микромоделирования.

Для оценки эффективности и экономической целесообразности мероприятий по совершенствованию городской транспортной системы требуется моделирование транспортных, пассажирских и пешеходных потоков. Для поиска оптимальных решений при реализации транспортной политики крупного города необходим анализ больших данных [6]. В работе [7] авторы отмечают, что макромоделю города в программе PTV VISUM применяется не только для имитационного моделирования, но также содержит достаточно большой массив информации о различных городских (транспортных, дорожных, инфраструктурных, социально-экономических) объектах и по сути, является базой данных.

Слабая связь транспортной модели с постоянно обновляющимися данными в реальном времени в условиях динамично развивающегося города, изменяющимися запросами

жителей и параметрами бюджета, планами застройщиков, неравномерностью транспортных потоков во времени, вызывает необходимость актуализации документов и формирует большую вариативность мероприятий в муниципальных программах развития дорожно-транспортной инфраструктуры. Постоянное обновление статических макромоделей городов имеет высокую трудоемкость, поэтому данный процесс необходимо автоматизировать, для чего применяются операционные цифровые двойники [8]. Самыми сложными и совершенными инструментами управления являются пока мало распространенные расчетные цифровые двойники города и их применением в интеллектуальных транспортных системах. На сегодняшний день, данные задачи и инструменты являются актуальными для решения проблем в дорожно-транспортном комплексе городских агломераций, с населением более 300 тыс. чел. [9].

Изучение эластичности транспортного спроса с учетом расходов домохозяйств и тарифов на транспорте, формирование баз данных в транспортной макромоделе позволяет прогнозировать параметры транспортной системы при изменении экономических факторов [10]. Эта методика позволяет осуществлять переход от статических транспортных моделей к расчетным цифровым двойникам транспортного комплекса.

Для прогностических моделей в расчетных цифровых двойниках города можно применять искусственные нейронные сети или интеллектуальный анализ данных. В работе [11] показаны примеры применения нейросетевых технологий для снижения затрат на мониторинг транспортных потоков и последующего прогнозирования количества выбросов вредных веществ в атмосферу. Авторы отмечают, что перспективным является развитие информационной среды на основе концепции модели облачных вычислений.

В работе [12] отмечается, что главной функцией полноценных цифровых двойников является отображение работы конкретных объектов (симулятор) в их реальных условиях, отражающих их полную эволюцию жизненного цикла в режимах практически реального времени. Цифровые двойники городов являются неотъемлемой частью такой предметной области как иммерсивное созидание, объединяющей сути технологических и социальных изменений действительности с их инфраструктурой. В данной деятельности очень важна роль общества в целом и отдельного человека в частности [13]. Цифровые двойники позволяют жителям города активнее участвовать в обсуждении планов развития городов и принятии решений, в том числе применительно к развитию ГПОТ и транспортной инфраструктуры.

В работах [14, 15] отмечается, что цифровая характеристика дорожной сети и данные о транспортном потоке являются важными параметрами цифрового двойника города.

Одной из функций транспортной макромоделю в составе цифрового двойника города является хранение обобщенных и обработанных данных о работе транспортного комплекса, которые используются для валидации, калибровки и расчета оценки адекватности модели. После создания транспортной модели появляются новые расчетные данные, формирующие большие данные о работе транспортного комплекса на основе имитационного моделирования.

Повышение качества прогнозирования транспортных потоков в настоящее время возможно с использованием преимуществ

шеств искусственного интеллекта, развивающегося стремительными темпами и применяемого в различных сферах экономики [16]. В работе [17] для анализа результатов имитационного моделирования при изучении структуры подвижности населения с учетом пространственного размещения мест проживания и рабочих мест на примере крупного города применяется машинное обучение и искусственные нейронные сети. Все районы города разделены на девять кластеров, в которых существенно отличаются доли поездок на ИТ и ГПОТ, зависящие от среднего расстояния поездок с рабочими и учебными целями.

В работе [18] для прогнозирования интенсивности транспортных потоков применяется метод машинного обучения – ансамбль случайных деревьев и описано, что применение глубокого обучения или нейросетевых моделей возможно для других задач. Ансамбль случайных деревьев применяется в целях разделения прогнозов, повышения обучающей способности модели и снижения влияния выбросов в данных. Это доказывает, что необходимо дифференцировать проблемы в транспортной системе в пространстве и во времени, устанавливая закономерности функционирования для групп внутри системы и формировать мероприятия по развитию отдельных подсистем.

Цель исследования – повышение точности прогнозирования параметров транспортной системы на основе анализа данных и дифференциации корреспонденций жителей города с применением методов машинного обучения.

Методы

В работе применяются следующие методы: системный анализ, теория графов, математическое и имитационное моделирование, теории транспортных потоков, математическая статистика, машинное обучение.

Для расчетных функций в программном коде на Python используются открытые библиотеки Pandas, NumPy, Matplotlib и NetworkX. Функции Pandas используется для анализа данных в табличной форме и формирования таблиц (списков, словарей) всех элементов графа. NumPy используется для формирования векторов, матриц и математических операций. Matplotlib для визуализации и отображении графа. Пакет NetworkX используется для создания, управления структурой и функциями графов. Для машинного обучения используется библиотека Scikit-Learn.

Изучаемая транспортная система состоит из двух подсистем: транспортных предложения и спроса. Транспортное предложение – совокупность путей сообщения и дорожно-транспортной инфраструктуры предназначенных для передвижения людей и грузов. Транспортный спрос – потребность населения и экономики в перемещении, отображаемая корреспонденциями. Спрос на передвижение генерируется в источниках и целях поездки (районах), у которых есть свои параметры: количество рабочих мест, численность трудящихся, населения и др.

Исходя из этих параметров формируются матрицы корреспонденции, которые разделяются на способы передвижения (ИТ и ГПОТ). Матрица корреспонденций ГПОТ распределяется через сеть остановочных пунктов на маршрутную сеть ГПОТ с учетом ограничений в дорожной сети. Параллельно этому процессу матрица корреспонденции ИТ распределяется на ту же дорожную сеть, где формируются параметры движения транспортных потоков ИТ и ГПОТ.

Параметры при реализации корреспонденций формируются из разных составляющих. Общее время реализации корреспонденции (или время в пути) на ГПОТ или ИТ состоит из следующих временных затрат: время поездки в транспортном средстве (ТС), время ожидания ТС, время совершения пересадки и длительность пешеходных проходов от и до остановочных пунктов или транспортно-пересадочных узлов.

При реализации корреспонденций на ГПОТ, ИТ и мультимодальных поездках (каршеринг, Park&Ride и др.) затраты на передвижения отличаются на отдельных составных участках пути. Для точности моделирования необходимо учитывать изменение затрат на отдельных объектах графа дорожной сети и/или маршрутной сети ГПОТ, формирующих пути следования. Разные затраты на участках путей увеличивают объем данных в транспортной модели. В крупном городе из 400 районов в транспортной макромодели формируются свыше 150 тыс. корреспонденций, которые при дифференциации поездок по способам передвижений (ГПОТ, ИТ, велосипедные и пешеходные передвижения) и целям поездки (рабочие, учебные, бытовые, культурные и пр.) превращаются в 3 млн корреспонденций. При этом каждая корреспонденция характеризуется несколькими видами затрат (временные, финансовые, физические) и более 10 параметрами (длина поездки, длина пешеходного подхода к/от остановочных пунктов, количество пересадок, время в пути и др.). Таким образом, количество учитываемых параметров в транспортной модели в данном случае может достигать 30 млн.

Для цифрового двойника транспортной системы используется ориентированный взвешенный граф. Граф дорожной сети состоит из множества вершин и множества линий (или ребер, дуг), соединяющих между собой вершины. При генерации графа вершины и линии делятся на несколько объектов. Определения объектов графа дорожной сети представлены в таблице 1.

Таблица 1

Элементы графа и объекты

Объекты	Определение	Элемент графа
Узлы	Точечное представление перекрестков, въездов/выездов и границ изменения параметров отрезков. Например, регулируемые перекрестки, транспортные развязки, остановочные пункты ГПОТ, искусственная неровность и др.	Вершина
Отрезки	Связи между узлами. Например, автомобильные дороги, железнодорожные пути, пешеходные улицы и др.	Ребро
Точки	Внутренний элемент узла для формирования поворотов.	Вершина
Повороты	Внутренний элемент узла, предназначенный для разделения направлений движения на перекрестке/развязке и др.	Ребро
Районы	Источники и цели поездок, транспортно-пересадочные узлы.	Вершина
Соединители	Ребро, которое предназначено для связи района с графом дорожной сети (узлами и отрезками).	Ребро

При создании цифрового двойника, граф формируется (или импортируются) в упрощенном виде – из узлов, отрезков, районов и соединителей. Граф необходимо совершенствовать, так как узлы являются сложными элементами, состоящими из поворотов со своими характеристиками и параметрами. Например, на Х-образном перекрестке образуется 16 поворотов, на которых установлены разные значения параметров. Несмотря на незначительные размеры поворотов внутри узла, параметры на поворотах могут быть сопоставимы по значениям на отрезках.

Для всех объектов в модели генерируются и рассчитываются характеристики и параметры движения. Некоторые характеристики и параметры движения объектов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры объектов графа

Объекты	Параметры
Узлы	Координаты (X, Y, Z координаты WGS 84), типы, веса
Отрезки	Начальный и конечные узлы, множество координат, типы, веса
Повороты	№ узла, со стороны узла №, в сторону узла №, ID начальной точки, ID конечной точки, направление поворота, типы, веса
Районы	Координаты центра района, координаты полигона, типы, веса
Соединители	Район и узлы, типы, веса

В качестве типов объектов могут выступать разные качественные переменные. Узлы могут делиться по типу регулирования, типу расположения (внутренний, внешний), типу, предусмотренному пользователем и др. Районы делятся на типы расположения (внутренний и внешний районы), типу предусмотренному пользователем и др. Внутренние районы – районы, расположенные в системе, а в качестве внешних районов выступают районы на границах системы (например, загородные трассы для модели города). Типы отрезков могут делиться на типы и классы автомобильных и железных дорог, других видов путей сообщения и др.

В качестве весов могут выступать количественные переменные. Для отрезков и поворотов допускается использование следующих параметров:

- длина и длина по воздушной линии (манхэттенское и евклидово расстояния);
- количество полос (или рядов) по направлению автомобильной дороги;
- длительность разрешающего сигнала светофора, длительность цикла светофорного регулирования и фазовый коэффициент (для поворотов внутри узла регулируемого перекрестка);
- пропускная способность на ребре;
- максимальная (разрешенная) скорость транспортного потока для каждого способа передвижения (легковые ТС, автобусы, трамваи, метро, электрички, поезда, авиасообщение, пешеходы и др.);
- среднее время в пути в свободном транспортном потоке для каждого способа передвижения;
- стоимость проезда (например, для платной автомобильной дороги, въезда на платное парковочное пространство или стоимость проезда на ГПОТ);

- продольный уклон дороги;
- параметры, определенные пользователем и др.

В случае запрета движения определенного способа передвижения на ребре среднее время в пути в свободном транспортном потоке для этого способа передвижения приравнивается к максимальному (999999 секунд).

В транспортном моделировании для отрезков и поворотов важными расчетными параметрами являются:

- интенсивность транспортного потока для каждого способа передвижения;
- объем перевезенных пассажиров для каждого способа передвижения;
- суммарная интенсивность транспортных потоков (например, ИТ и ГПОТ);
- уровень загрузки;
- среднее время в пути для каждого способа передвижения;
- уровень обслуживания LOS для каждого способа передвижения;
- добавочное сопротивление, необходимое при калибровке модели.

Расчет параметров движения на отрезках и поворотах графа дорожной сети основан на модели M.J. Beckmann, C.B. McGuire, C.B. Winsten (B.M.W. или функция Bureau of Public Road) времени в пути. На время в пути влияют время в пути в свободном транспортном потоке, суммарная интенсивность транспортных потоков и пропускная способность на ребре (формула 1).

$$t = t_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (N/N_{max})^\beta] = t_0 + t_0 \cdot \alpha \cdot z^\beta \quad (1)$$

где t – среднее время в пути ТС на ребре, с;

t_0 – среднее время в пути ТС в свободном транспортном потоке на ребре, с;

N – суммарная интенсивность транспортных потоков, ТС/ч;

N_{max} – пропускная способность на ребре, ТС/ч;

z – уровень загрузки ребра;

α, β – параметры чувствительности математической модели.

Выбор способа передвижения и пути следования зависит от нескольких параметров: время в пути, стоимость проезда, комфорт поездки и др. Из-за разных критериев выбора пользователями способа передвижения и пути, разной размерности этих параметров необходимо использовать математическую модель расчета обобщенных затрат – сопротивление. Функция сопротивления рассчитывается для всех объектов графа. Сопротивление может включать в себя суммарное значение разных типов затрат (время в пути, стоимость проезда, комфортабельность поездки, добавочное сопротивление и др.). Один из возможных вариантов расчета сопротивления на объекте графа представлен в формуле 2.

$$I_o^m = k_t \cdot t_o^m + k_f \cdot f_o^m + k_c \cdot c_o^m + k_a \cdot a_o^m \quad (2)$$

где I_o – сопротивление на объекте, ед.;

m – способ передвижения на объекте;

t_o – время в пути на объекте, с;

f_o – стоимость проезда на объекте, руб.;

c_o – величина отображаемая комфорт проезда на объекте, ед.;

a_o – добавочное сопротивление на объекте, ед.;

k_t, k_f, k_c, k_a – параметры математической модели.

Стоимость проезда на объекте зависит от разных способов передвижения в пространстве и во времени. Например, пешие

передвижения на дорожной сети бесплатны, но имеют ограничения по длине маршрута из-за физических возможностей человека. На большинстве маршрутов ГПОТ действует один тариф и фиксированная стоимость проезда, однако для некоторых маршрутов дальность поездки может влиять на стоимость проезда. Для такси и каршеринга стоимость проезда зависит от длины и времени поездки, внешних условий, времени суток, расположения объекта и др. Для пользователей ИТ в стоимость проезда входит несколько составляющих: стоимость владения автомобилем, стоимость проезда по платной автомобильной дороге, стоимость платной парковки.

Одним из представлений модели транспортного предложения являются матрицы затрат. Для каждого пути (последовательность вершин и ребер для каждой корреспонденции между районами) и для каждого способа передвижения рассчитывается величина затрат на пути (время в пути, стоимость поездки, время задержки, длина поездки, сопротивление и/или др.) на основе алгоритма поиска кратчайшего пути. Для каждого пути величины затрат определяются как суммарное значение величин затрат на объектах графа, принадлежащих кратчайшему пути (множеству объектов) между районом источника i и районом цели j .

Для разделения и изучения разных способов передвижения используется дифференциация подграфов. При создании графа формируется два подграфа – для движения ИТ на автомобилях (Car) и пешеходного движения (Walk).

Подграф Walk предназначен для пешеходного движения и связи дорожной сети с маршрутной сетью ГПОТ. Маршрутная сеть ГПОТ – совокупность связей между остановочными пунктами ГПОТ (ОП) и транспортно-пересадочными узлами (ТПУ). ОП создаются узлами, внутри которых имеются вершины и ребра (аналогично поворотам) для связи между маршрутами ГПОТ и подграфами Walk и через районы ТПУ с подграфом Car.

Маршруты ГПОТ формируются как последовательность узлов, ОП, так как некоторые маршруты ГПОТ могут не осуществлять посадку/высадку на определенных ОП на пути следования. Подграф маршрутной сети ГПОТ PuT включает в себя подграфы автобусных маршрутов Bus, трамвайной сети Tram и др.

Расчет затрат на пути с использованием ГПОТ (подграфа PuT) основан на подграфах ИТ Car и Walk. Время в пути пешком от района источника до ОП, от конечного ОП до района цели и между ОП (в случае пересадки) происходит по подграфу Walk. Время в пути на ребре маршрута ГПОТ определяется исходя из функции заимствования времени в пути ТС от отрезков подграфа Car в программном коде. Время ожидания маршрутных ТС на ОП рассчитывается исходя из интервала движения подвижного состава определенных маршрутов ГПОТ.

Существенную роль в выборе способа передвижения и пути играет комфорт поездки. Для расчета величины, отображаемой комфорт на ребре маршрута ГПОТ используется формула 3, аналогичная функции Bureau of Public Road расчета времени в пути на ребре. Подобная модель может использоваться на ребрах других подграфов, например, для повышения привлекательности (снижения затрат) пешеходной дорожки, по сравнению с соседними улицами подграфа Walk.

$$c_o = t_o \cdot [1 + \alpha \cdot (N/N_{max})^\beta] \quad (3)$$

где c_o – величина, отображаемая комфорт проезда на ребре маршрута ГПОТ, ед.;

t_o – время в пути на ребре маршрута ГПОТ, час;

N – количество пассажиров на ребре маршрута ГПОТ, пасс./час;

N_{max} – провозная способность на ребре маршрута ГПОТ, пасс./час;

α, β – параметры чувствительности математической модели.

Наличие альтернативных маршрутов и небольшие интервалы движения подвижного состава на маршрутах ГПОТ влияют на параметры чувствительности модели 3. Соответственно в модели цифрового двойника необходима дифференциация параметров чувствительности моделей на объектах графа (рис. 1).

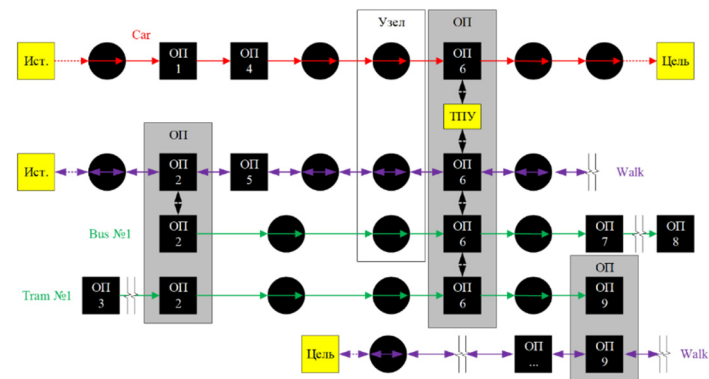


Рис. 1. Связи подграфов дорожной сети и маршрутной сети ГПОТ

ТПУ создаются в графе отдельными объектами, для смены способа передвижения, как промежуточный пункт поездки в составе корреспонденции между источником и целью поездки. В качестве ТПУ могут выступать районы для моделирования системы Park&Ride (перехватывающие парковки), когда поездка совершается частично на ИТ и частично на ГПОТ (или пешком), когда в течении поездки совершается изменение способами передвижения (между Car – Walk – PuT). В данной модели возможна мультимодальность с помощью ТПУ. Корреспонденция на ИТ в такой системе может реализовываться частично на подграфе Car и др. Например, пользователь ИТ доезжает на доступную и свободную парковку (ТПУ) и после доходит пешком (Walk) или доезжает на ГПОТ (PuT) до цели поездки, и наоборот. Также при использовании систем каршеринга поездка разделяется на два способа передвижения: пешком до ТС (Walk) и на ТС до района цели (Car).

Таким образом, затраты (сопротивление и др.), реализуемые на корреспонденциях (на путях), формируются на нескольких подграфах и из нескольких составляющих (формулы 4).

$$I_{ij} = \sum_n k_{ped\ to\ n} \cdot \sum_{o \in O_{ped\ to\ n}} I_o + \sum_n k_{wait\ n} \cdot \sum_{o \in O_{wait\ n}} I_o + \sum_n k_{veh\ n} \cdot \sum_{o \in O_{veh\ n}} I_o + k_{ped\ to\ j} \cdot \sum_{o \in O_{ped\ to\ j}} I_o \quad (4)$$

где I_{ij} – сопротивление пути между районами i и j , ед.;

n – количество ОП, пересадок или используемых ТС на пути, ед.;

$O_{ped\ to\ n}$ – путь пешком до n -ой пересадки (при $n = 1$ от района i);

$O_{wait\ n}$ – последовательность из n -ых ОП или пунктов пересадки на ТС;

$O_{veh\ n}$ – путь в n -ом ТС;

$O_{ped\ to\ j}$ – путь пешком от n -ого ОП или пункта пересадки до района j .

I_o – сопротивление объекта встречающегося на пути между районами i и j ;

k – параметры чувствительности в математической модели.

Для оценки эффективности городской транспортной системы в целом, возможно использование параметра общее время в пути всех пользователей транспортной системы рассчитываемого по формуле 5. Аналогично, возможен расчет подобных величин затрат: длины, стоимости, сопротивления в пути и др.

$$T = \sum_{m=1}^M T_m = \sum_{m=1}^M \sum_{ij=1}^{N_m} (t_{ijm} \cdot N_{ijm}) \quad (5)$$

где T – общее время в пути всех пользователей транспортной системы, ч;

T_m – общее время в пути пользователей m -ого способа передвижения, ч;

M – количество способов передвижения в системе;

t_{ijm} – время в пути между районами i и j для m -ого способа передвижения, ч;

N_{ijm} – объем передвижений между районами i и j для m -ого способа передвижения, поездок.

В центральной части города, с высокой плотностью маршрутной сети ГПОТ, большим количеством ОП в пешей доступности, низким временем ожидания маршрутного ТС эффективность отдельных мероприятий по повышению доли поездок ГПОТ (например, повышение вместимости подвижного состава на маршрутах ГПОТ) гораздо выше, чем для районов, находящихся на периферии города.

В то же время, введение нового маршрута ГПОТ окажет большее влияние на транспортный спрос в периферийных районах города с малым количеством маршрутов ГПОТ по сравнению с центральными районами агломерации. Одинаковые мероприятия по изменению структуры транспортного спроса могут влиять с разной степенью эффективности на затраты для пользователей, перемещающихся в разных частях города.

В исследовании выдвигается гипотеза, что структура транспортного спроса распределена неравномерно на территории города и зависит от затрат при реализации корреспонденций (длина пути, составляющие времени в пути, сопротивление и др.).

Результаты

При разработке документов транспортного планирования Тюменской агломерации ранее были созданы актуальные транспортные модели на макроуровне в PTV VISUM. В макромоделю большинство характеристик транспортного предложения формируются исходя из ГИС-данных о дорожной сети, маршрутной сети ГПОТ. В рамках исследования была сформирована база данных затрат при реализации корреспонденций по всей сети. С помощью предобработки данных (ABC анализ, визуализация графиков распределений) были

исключены аномалии в данных (время в пути равно нулю или более 999999 минут), и корреспонденции с минимальными значениями поездок (до 0,5). В качестве обучающей выборки для кластерного анализа и модели машинного обучения использовались параметры:

- время в пути на ГПОТ и ИТ;
- время в пути внутри маршрутного ТС ГПОТ;
- время ожидания при пересадке между маршрутными ТС ГПОТ;
- время пешком при пересадке между ОП ГПОТ;
- время в пути начального и конечного пешеходного подхода до/от ОП;
- длина пути на ГПОТ и ИТ;
- дл на пути внутри маршрутного ТС ГПОТ;
- длина по воздушной линии;
- время в пути пешком в поездке на ГПОТ;
- дл на пешеходных подходах к ОП;
- скорость поездки на ИТ и ГПОТ (с учетом пеших подходов к/от ОП);
- скорость поездки в ТС на ГПОТ;
- отношение длины поездки на ГПОТ к длине по воздушной линии;
- отношение длины поездки в маршрутном ТС на ГПОТ к длине поездки;
- отношение длины поездки на ИТ к длине по воздушной линии;
- отношение времени поездки на ГПОТ к времени поездки на ИТ;
- отношение длины поездки на ГПОТ к длине поездки на ИТ;
- количество и доля поездок на корреспонденции по способам передвижения (ИТ, ГПОТ, пешком, велосипед).

С применением метода кластерного анализа K-means и «метода локтя» корреспонденции разделены на пять кластеров, в которых влияние затрат на передвижение на структуру транспортного спроса имеет разный вид (рис. 2-3).

Для кластера №1-2 зависимость описывается линейной регрессией (табл. 3), при увеличении основных затрат пути на ГПОТ и ИТ (времени T_{put} , T_{prt} и длины L_{put} , L_{prt}) доля поездки на ГПОТ S_{put} или ИТ S_{prt} увеличивается.

Таблица 3

Параметры моделей доли поездок от длины пути

$y = f(x)$	Cluster	a	b	R^2	MAE
$S_{put} = a + b \cdot L_{put}$	1	0,133	-0,123	0,65	0,06
$S_{prt} = a + b \cdot L_{prt}$	1	0,075	0,063	0,74	0,03
$S_{put} = a + b \cdot L_{prt}$	1	0,152	-0,131	0,77	0,05
$S_{prt} = a + b \cdot L_{put}$	1	0,084	-0,059	0,84	0,02

Для кластеров №3-5 влияние время и длина пути на ГПОТ обратно пропорционально доле поездке на ГПОТ, а на долю поездок на ИТ – прямо пропорционально. При увеличении времени и длины пути на ГПОТ влияние на долю поездок на ГПОТ до среднего значения затрат значительнее, чем на ИТ. На коротких расстояниях и при быстрых передвижениях (до 35 минут) пользователи предпочитают ГПОТ (до 55%). При повышении времени в пути на ГПОТ более 45 минут наблюдается снижение доли поездок на ГПОТ (от 60 до 10%) и значительное повышение на ИТ (от 40 до 80%). В интервале от 35 до 45 минут влияние затрат на структуру транспортного спроса незначительное.

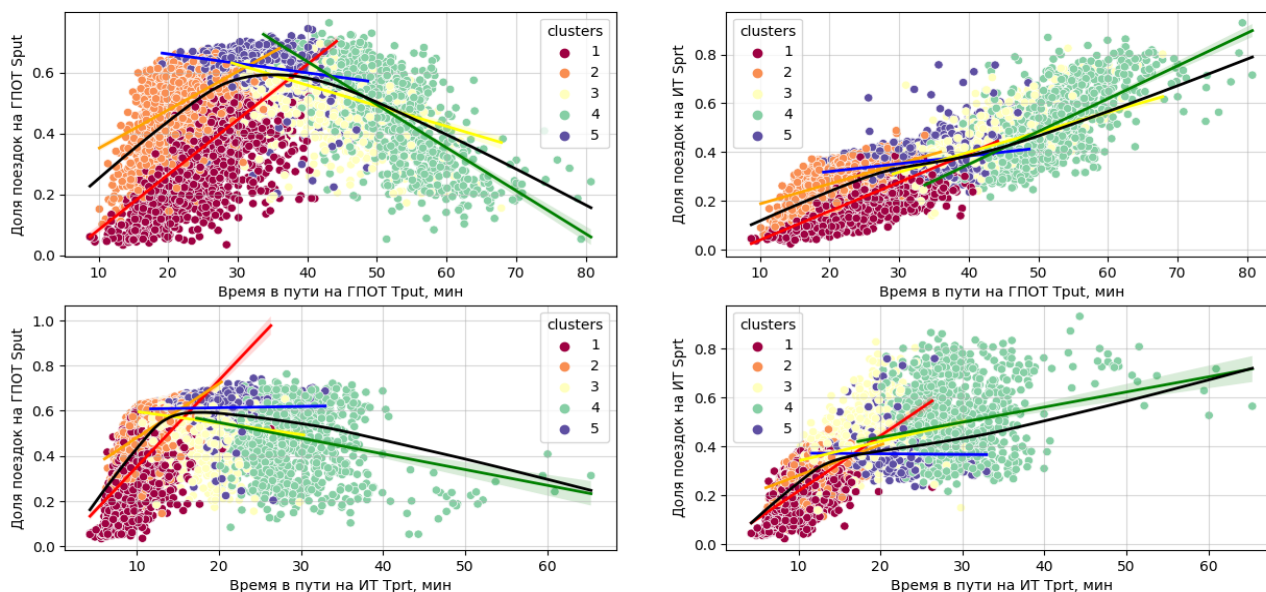


Рис. 2. Влияние времени в пути на ГПОТ или ИТ на выбор способа передвижения

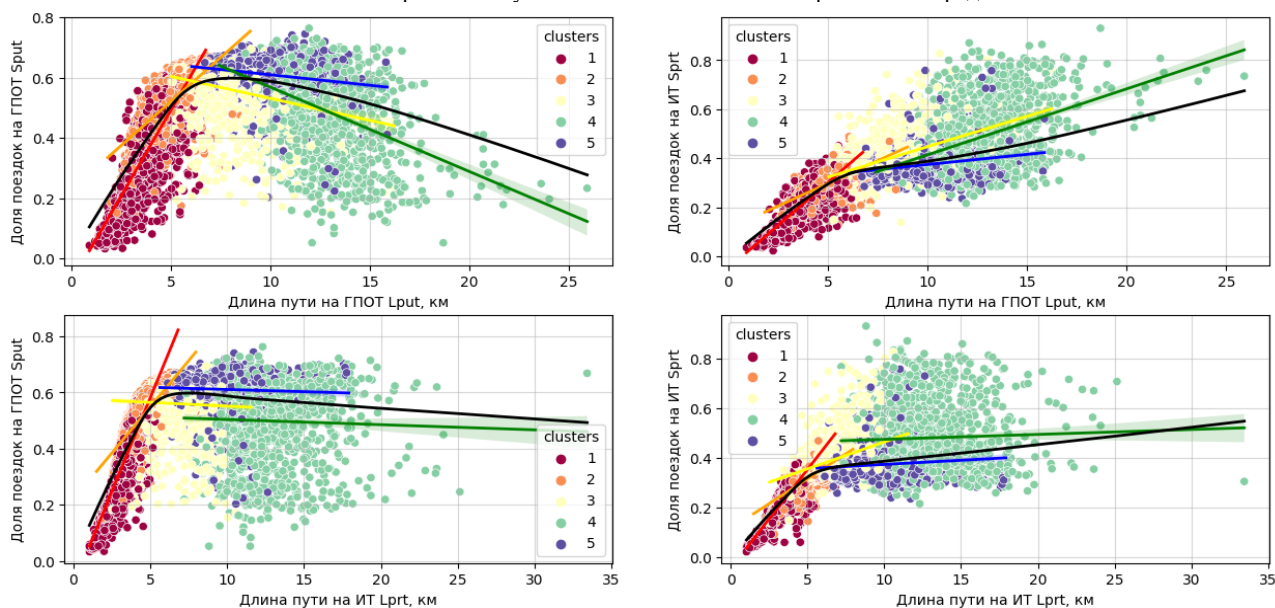


Рис. 3. Влияние длины пути на ГПОТ или ИТ на выбор способа передвижения

При минимальных значениях времени и длины пути пользователи отдадут предпочтения вело- и пешеходным передвижениям, поэтому при уменьшении значений этих факторов доля поездок на ИТ и ГПОТ снижается.

Для расщепления матриц корреспонденций на способы передвижения и определения структуры транспортного спроса в цифровом двойнике планируется использовать модель машинного обучения (МО) решающее дерево с максимальной глубиной дерева 5. Обучающей выборкой для модели МО являются затраты и их составляющие на разных способах передвижения. Количество строк в обучающей выборке 10% от общего количества строк в данных, т.е. менее 1600 корреспонденций. Средняя абсолютная ошибка MAE модели МО структуры транспортного спроса составляет 3%, что показывает адекватность результатов.

В результате анализа модели МО решающее дерево основные параметры, которые влияют на структуру транспортного

спроса являются длина поездки на ИТ (87%) и время в пути на ГПОТ (9%).

Обсуждение

Представленные в работе результаты теоретических исследований описывают влияние различных затрат на передвижение формирующих сопротивление при реализации корреспонденций. Данный подход может быть применен к любым транспортным системам, модели которых включают в себя модель транспортного предложения.

Для повышения точности прогнозирования и моделирования на макроуровне необходимо более детально учитывать затраты на разных объектах графа дорожной сети и маршрутной сети ГПОТ. Детализация затрат позволяет внедрить мультимодельность при реализации корреспонденций в транспортную макромоделю.

Это позволяет оценивать мобильность и точнее учитывать распределение между способами перемещения жителей города. В настоящее время активно развиваются региональные и национальные транспортные модели, для которых данный вопрос также является актуальным.

В экспериментальных исследованиях, анализ результатов изучения мобильности, на примере макромоделей крупного города позволил оценить влияние длины и времени в пути на ГПОТ и ИТ относительно всех корреспонденций в городе, сформированных в виде транспортных и пешеходных связей между каждым из 400 районов города. Результаты показывают наличие пяти четко выраженных групп корреспонденций (кластеров), в которых влияние факторов на параметры работы системы, может принципиально отличаться. Разделение корреспонденций по кластерам зависит от разных значений выходных параметров работы транспортной системы при одинаковых условиях. Это обусловлено разной плотностью дорожной сети в центральной и периферийных частях города, неравномерным распределением полос для маршрутных ТС на маршрутной сети ГПОТ, пешеходной доступностью ОП и маршрутов ГПОТ, разделением искусственными и естественными препятствиями (магистральная дорога Обход города, река и железная дорога) города на четыре части и разной связностью между ними.

Дальнейшие задачи исследования:

- разработка многофакторной математической модели (или моделей машинного обучения), учитывающей разные факторы влияющие на эффективность работы ГПОТ;
- создание алгоритма определения оптимальной маршрутной сети ГПОТ на основе генетического алгоритма искусственного интеллекта.

Заключение

Для анализа результатов моделирования необходимо использование нейронных сетей, искусственного интеллекта и/или МО. Применяя статические имитационные модели не в полной мере, учитываются установившиеся закономерности развития городов и тренды изменения их основных свойств и характеристик. При интеграции данных в цифровой двойник города, отображении динамики развития города по технологическим и социально-экономическим характеристикам возможно установление закономерностей и моделей (математических или МО) для повышения точности прогнозирования и эффективности мероприятий по изменению городской транспортной системы.

Финансирование

Research was funded by grant from the Russian Science Foundation no. 24-79-00192 “Digital twin of urban passenger public transport”, <https://rscf.ru/project/24-79-00192/>

Литература

1. Fadyushin A., Zakharov D. The impact of the cost of paid parking for private cars and public transport fare on the structure of urban mobility // *International Journal of Transport Development and Integration*, 2022. Vol. 6, No. 2. pp. 197-207. <https://doi.org/10.2495/tidi-v6-n2-197-207>.
2. Herath D., Dharmarathna W. R. S. S., Wickramasinghe V., Edirisinghe J. Travel behaviour analysis and exploration of mode choice variability of short-distance travellers // *Engineer Journal of the Institution of Engineers Sri Lanka*, 2023. Vol. LVI, No. 1, pp. 51-62.

<https://doi.org/0.4038/engineer.v56i1.7560>.

3. Захаров Д.А., Писцов А.В. Анализ эффективности способов активного приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков // *Транспорт Урала*, 2023. № 4(79). С. 90-95. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-4-90-95>.
4. Morozov V., Shepelev V., Kostyrchenko V. Modeling the operation of signal-controlled intersections with different lane occupancy // *Mathematics*, 2022. Vol. 10, No. 24. pp. 4829. <https://doi.org/10.3390/math10244829>.
5. Behbahani H., Poorjafari M. Passenger-based adaptive transit signal priority for BRT systems with multiple loading areas // *IET Intelligent Transport Systems*, 2024. Vol. 18, No. 6. pp. 1089-1108. <https://doi.org/10.1049/itr2.12488>.
6. 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. Vol. 16, No. 6. pp. 2596. <https://doi.org/10.3390/su16062596>.
7. Шевилов А.А., Тимофеева Г.А. Этапы создания транспортных моделей и их построение в PTV Visum // *Инновационный транспорт*, 2023. № 2. С. 23-29. <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2023-2-23-29>.
8. Rudskoy A., Ilin I., Prokhorov A. Digital Twins in the Intelligent Transport Systems // *Transportation Research Procedia*, 2021. No. 54. pp. 927-935. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.152>.
9. Андреев Е.О., Жанказиев С.В., Зырянов В.В., Павлов А.С. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2024. Том 18. № 1. С. 38-43. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43>
10. Zakharov D.A., Chikishev E.M., Kapski D.V., Skirkovski S.V. Changing the Parameters of the Urban Transport System with Introduction of Fees from Car Owners for Using the Road Network and Variations in Public Transport Fare // *Science and Technique*, 2024. Vol. 23, No. 4. pp. 336-344. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344>.
11. Иванов С.А., Никольская К.Ю., Радченко Г.И., Соколинский Л.Б., Цымблер М.Л. Концепция построения цифрового двойника города. Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика, 2020. Т. 9. № 4. С. 5-23. <https://doi.org/10.14529/cmse200401>.
12. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Климов А.А., Добрынин А.П., Корзун А.В., Жабицкий М.Г., Выходов Н.Ю., Лысогогорский А.А. Онтологии кибер-физических систем национального цифрового двойника Великобритании и BIM на примерах умных городов, железных дорог и других проектов // *International Journal of Open Information Technologies*, 2021. Vol. 9, No. 3. pp. 91-130.
13. Волков А.А. Умный город 5.0. Часть 1. Таксономия созида- ния: иммерсивное метамоделирование // *Промышленное и граждан- ское строительство*, 2023. № 1. С. 4-14. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.01.04-14>.
14. Басаргин А.А. Разработка концепции моделирования и симу- ляции цифровых двойников городской территории для решения практических задач // *Вестник СГУГиТ*, 2024. Т. 29, № 4. С. 83-90. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-4-83-90>.
15. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transporta- tion: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtual- izing motorway dynamics // *Advanced Engineering Informatics*, 2023. Vol. 55. pp. 101858. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101858>.
16. Зырянов В.В., Семчугова Е.Ю., Караева М.Р., Костенко А.А. Повышение качества прогнозирования объемов перевозок с исполь- зованием нейронных сетей // *Мир транспорта и технологических ма- шин*. 2024. № 1-3(84). С. 27-34. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3\(84\)-27-34](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-27-34)
17. Chainikov D., Zakharov D., Kozin E., Pistsov A. Studying Spatial Unevenness of Transport Demand in Cities Using Machine Learning Methods // *Applied Sciences*, 2024. Vol. 14, No. 8. pp. 3220. <https://doi.org/10.3390/app14083220>
18. Пугачев И.Н., Евтюков С.С., Шешера Н.Г., Григорьев Д.Е. Прогноз интенсивности транспортного потока. Обучение с учите- лем. Метод случайных деревьев // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2024. Т. 18, № 4. С. 36-47. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2024-18-4-36-47>

SPATIAL UNEVENNESS OF COSTS FORMATION IN THE IMPLEMENTATION OF TRANSPORT AND PEDESTIAN CORRESPONDENCES IN LARGE CITY

Alexey A. Fadyushin, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, fadyush72@gmail.com

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

Vladislav A. Ignatiugin, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, transportnik91@gmail.com

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

Abstract

The article considers the issues of spatial unevenness of the structure of mobility of city residents. The purpose of the study is to increase the accuracy of forecasting the parameters of the transport system based on data analysis and differentiation of correspondence of city residents using machine learning methods. The study puts forward a hypothesis that the structure of transport demand is distributed unevenly across the city and depends on the costs of implementing correspondence. To study the correspondence of city residents, the article uses a transport macromodel of the city of Tyumen. An analysis of the conditions for the formation of costs for the implementation of correspondence, which are recorded in the macromodel, is provided. To analyze the correspondence and assess the impact of the parameters of the city's transport system using machine learning, clustering of correspondence was carried out, which are grouped into 5 clusters. The results of data processing in the transport model showed that the distance and travel time have the greatest impact on the share of travel on individual and public transport. For two clusters, with an increase in distance and travel time, the share of trips on public transport decreases, for the other two, on the contrary, it increases. In this case, the general form of the dependence for all correspondences is described by the parabola equation. The formation of 5 correspondence clusters is due to the different levels of transport services, which are determined by the level of development of the street and road network, public transport and its infrastructure, taking into account the actual division of the city into 4 parts by the river, the Trans-Siberian Railway and Fedyuninsky Street. The further direction of research is related to determining the most significant factors for each cluster and increasing the arbitrariness of working with transport macromodels due to the development of digital twins of urban transport.

Keywords: transport modeling, mobility, costs of correspondence, urban passenger public transport, graph theory, digital twin

References

- [1] A. Fadyushin, D. Zakharov, "The Impact Of The Cost Of Paid Parking For Private Cars And Public Transport Fare On The Structure Of Urban Mobility," *International Journal of Transport Development and Integration*. 2022. Vol. 6, No. 2. pp. 197-207. DOI 10.2495/tdi-v6-n2-197-207.
- [2] D. Herath, W. R. S. S. Dharmarathna, V. Wickramasinghe, J. Edirisinghe, "Travel Behaviour Analysis and Exploration of Mode Choice Variability of Short-Distance Travellers," *Engineer Journal of the Institution of Engineers Sri Lanka*. 2023. Vol. LVI, No. 1, pp. 51-62. DOI 0.4038/engineer.v56i1.7560
- [3] D. A. Zakharov, A. V. Pistsov, "Analysis of the effectiveness of active priority methods for buses when passing through controlled intersections," *Transport of Ural*. 2023. No. 4. pp. 90-95. DOI 10.20291/1815-9400-2023-4-90-95
- [4] V. Morozov, V. Shepelev, V. Kostyrchenko, "Modeling the Operation of Signal-Controlled Intersections with Different Lane Occupancy," *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 24. pp. 4829. DOI 10.3390/math10244829.
- [5] H. Behbahani, M. Poorjafari, "Passenger-based adaptive transit signal priority for BRT systems with multiple loading areas," *IET Intelligent Transport Systems*. 2024. Vol. 18, No. 6. pp. 1089-1108. DOI 10.1049/itr2.12488
- [6] V. Morozov, A. I. Petrov, V. Shepelev, M. Balfaqih, "Ideology of Urban Road Transport Chaos and Acci-dent Risk Management for Sustainable Transport Systems," *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 6. pp. 2596. DOI 10.3390/su16062596.
- [7] A. A. Shevtsov, G. A. Timofeeva, "Stages of creating transport models and their construction in PTV VISUM," *Innovative transport*. 2023. Vol. 2, No. 48. pp. 23-29. DOI 10.20291/2311-164X-2023-2-23-29.
- [8] A. Rudskoy, I. Ilin, A. Prokhorov, "Digital Twins in the Intelligent Transport Systems," *Transportation Research Procedia*. 2021. No. 54. pp. 927-935. DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.152.
- [9] Andreev E.O., Zhankaziev S.V., Zyryanov V.V., Pavlov A.S. "Development of Architecture Intelligent Transport Systems," *T-Comm*. Vol. 18. No. 1. Pp. 38-43. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43
- [10] D. A. Zakharov, E. M. Chikishev, D. V. Kapski, S. V. Skirkovski, "Changing the Parameters of the Urban Transport System with Introduction of Fees from Car Owners for Using the Road Network and Variations in Public Transport Fare," *Science and Technique*. 2024. Vol. 23, No. 4. pp. 336-344. DOI 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344.
- [11] S. A. Ivanov, K.Yu. Nikolskaya, G.I. Radchenko, L.B. Sokolinsky, M.L. Tsymler, "The concept of building a digital twin of the city," *Bulletin of SUSU. Series: Computational Mathematics and Computer Science*. 2020. Vol. 9, No. 4. pp. 5-23. DOI: 10.14529/cmse200401.
- [12] V. P. Kupriyanovskiy, D.E. Namiot, A.A. Klimov, A.P. Dobrynin, A.V. Korzun, M.G. Zhabitskiy, N.Yu. Vyhodov, A.A. Lysogorskiy, "Ontologies of cyber-physical systems of the UK national digital twin and BIM on the examples of smart cities, railways and other projects," *International Journal of Open Information Technologies*. 2021. Vol. 9, No. 3. pp. 91-130.
- [13] A. A. Volkov, "Smart City 5.0. Part 1. Taxonomy of Creation: Immersive Meta-Modeling," *Industrial and Civil Engineering*. 2023. No. 1. pp. 4-14. DOI 10.33622/0869-7019.2023.01.04-14.
- [14] A. A. Basargin, "Development of the concept of modeling and simulation of digital twins of an urban area for solving practical problems," *Bulletin of SGUGiT*. 2024. Vol. 29, No. 4. pp. 83-90. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-83-90
- [15] K. Kusic, R. Schumann, E. Ivanjko, "A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics," *Advanced Engineering Informatics*. 2023. Vol. 55. pp. 101858. DOI 10.1016/j.aei.2022.101858.
- [16] Zyryanov V.V., Semchugova E.Yu., Karaeva M.R., Kostenko A.A. "Improving the quality of forecasting transportation volume using neural networks," *The world of transport and technological machines*. 2024. No. 1-3. pp. 27-34. DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-27-34.
- [17] D. Chainikov, D. Zakharov, E. Kozin, A. Pistsov, "Studying Spatial Unevenness of Transport Demand in Cities Using Machine Learning Methods," *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 8. 3220. DOI 10.3390/app14083220
- [18] I.N. Pugachev, S.S. Evtyukov, N.G. Sheshera, D.E. Grigorov, "Forecast of traffic flow intensity. Training with a teacher. Random tree method.," *T-Comm*. 2024. Vol. 18, No. 4. pp. 36-47. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-4-36-47

Information about authors:

Alexey A. Fadyushin, Industrial University of Tyumen, Associate Professor of the Department "Road Transport Operation", PhD in Technical Sciences, Tyumen, Russia, ORCID 0000-0001-7276-4315.

Dmitrii A. Zakharov, Industrial University of Tyumen, Head of the Department "Road Transport Operation", PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Tyumen, Russia, ORCID 0000-0001-9594-9144.

Vladislav A. Ignatiugin, Industrial University of Tyumen, Laboratory Assistant, Tyumen, Russia

Vladimir D. Shepelev, South Ural State University (National Research University), Associate Professor of the Department of Automobile Transportation, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chelyabinsk, Russia, ORCID 0000-0002-1143-2031.