

АНАЛИЗ СТАТУСА МАРШРУТНОЙ СИСТЕМЫ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-5-39-48

Manuscript received 30 January 2026;

Accepted 16 March 2026

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

Петров Артур Игоревич,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия, artigpetrov@yandex.ru

Лихайрова Евгения Владимировна,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия, lihayrovaev@tyuiu.ru

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

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: городской пассажирский транспорт
общего пользования, маршрутная сеть,
пассажиропоток, транспортное моделирование,
цифровой двойник

В статье представлены результаты исследований статуса маршрутной системы городского пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП) крупного российского города Тюмени (население 872 тыс. чел.), представленного одним видом общественного транспорта – автобусным. Цель исследования – идентификация возможного потенциала автобусного транспорта в качестве основного для осуществления транспортных передвижений горожан и поиск путей совершенствования маршрутной системы пассажирских перевозок Тюмени с использованием ПТОП. Особенно актуально данное исследование в условиях активного роста индивидуальной автомобилизации, острого дефицита пропускной способности улично-дорожной сети и потенциально ожидаемого муниципальной властью в обозримое время транспортного коллапса. Основное внимание при этом уделено идентификации специфики маршрутной сети ПТОП, статистическому описанию набора основных характеристик совокупности автобусных маршрутов Тюмени, кластерному анализу и дифференциации маршрутов по группам с учетом набора характерных признаков. Установлено, что совокупность автобусных маршрутов Тюмени весьма неоднородна и может быть дифференцирована на четыре группы маршрутов. Это важный вывод, позволяющий аргументировать возможные управленческие действия по реформированию сети маршрутов ПТОП крупного российского города, направленные на повышение эффективности всей муниципальной транспортной системы.

Информация об авторах:

Фадюшин Алексей Александрович, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры "Эксплуатация автомобильного транспорта", канд. техн. наук, г. Тюмень, Россия, ORCID 0000-0001-7276-431

Петров Артур Игоревич, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры "Эксплуатация автомобильного транспорта", канд. техн. наук, доцент, г. Тюмень, Россия, ORCID 0000-0003-2634-0567

Лихайрова Евгения Владимировна, Тюменский индустриальный университет, аспирант кафедры "Эксплуатация автомобильного транспорта", г. Тюмень, Россия.

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

Для цитирования:

Фадюшин А.А., Петров А.И., Лихайрова Е.В., Шепелёв В.Д. Анализ статуса маршрутной системы городского пассажирского транспорта общего пользования / Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №5. С. 39-48.

For citation:

A.A. Fadyushin, A.I. Petrov, E.V. Lihayrova, V.D. Shepelev, "Analysis of the status of the route system of public urban passenger transport," T-Comm, 2026, vol. 20, no. 5, pp. 39-48. (in Russian)

Введение

Опережающий, по сравнению с развитием улично-дорожной сети (УДС) рост автомобилизации во всем мире является одним из самых серьезных вызовов урбанизации [1]. Россия не является исключением из этого общемирового тренда. Резервы пропускной способности УДС крупных российских городов практически исчерпаны. В этой связи необходимо констатировать, что кардинальное улучшение транспортной системы города возможно на основе смены парадигмы восприятия городским населением достоинств и недостатков двух важнейших типов обеспечения мобильности городского населения – с использованием индивидуального автомобильного транспорта (ИАТ) и пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП). Переориентация городских жителей на использование услуг ПТОП возможна при качественном улучшении состояния системы городского общественного транспорта (ГОТ) посредством использования инновационных практик его развития. Для несовершенной системы ПТОП характерны неоправданно высокие затраты всех видов (ресурсные, временные, финансовые и т.п.) связанные с обеспечением перемещения людей в пространстве городской территории. Анализируя возможности совершенствования системы ПТОП, отметим, что значительные резервы ее улучшения заключаются в поиске оптимальных вариантов маршрутной системы ГОТ [2] и оптимизации распределения ресурса ПТОП между регулярными маршрутами ГОТ. Качество маршрутной системы ПТОП является важнейшим фактором, влияющим на социально-экономические аспекты функционирования города [3]. В то же время надо четко понимать, что маршрутная система ПТОП всегда является производной от степени развитости УДС города, обобщенного качества городской дорожно-транспортной инфраструктуры [4].

Целью данного исследования является детализированный анализ (по состоянию на 2025 г.) статуса маршрутной системы ПТОП крупного российского города Тюмени и идентификация потенциала ГОТ в качестве основного вида осуществления транспортных передвижений горожан.

Анализ состояния вопроса

Анализ ранее проведенных исследований свидетельствует, что модернизация и совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры города способствует снижению транспортных заторов и повышению качества транспортных услуг [2].

Одним из самых значимых аспектов сложности развития городской системы ПТОП заключается в изменении эмоционально-практического отношения людей к личному автомобилю и его каждодневному использованию. Организационно-управленческие меры по демотивации использования личных автомобилей (платное парковочное пространство, платные автомобильные дороги) стимулируют городских жителей к приоритетному пользованию услугами ГОТ [5]. Например, технология Bus Rapid Transport (BRT) позволяет повысить скорость сообщения ПТОП [6], а такое преимущество и мероприятия по ограничению использования ИАТ являются серьезными аргументами для переориентации с использования ИАТ на ПТОП.

Предоставление приоритета движению ПТОП на регулируемых перекрестках или посредством полос для маршрутных транспортных средств приводит к положительному эффекту (выигрышам в скорости и времени перемещения) для пользователей ПТОП, повышает скорость сообщения, но одновременно с этим ухудшает параметры дорожного движения для пользователей ИАТ [7]. При этом с большой вероятностью возможно изменение структуры транспортного спроса и повышение доли поездок на ПТОП [8].

Еще одной важной проблемой развития транспортной системы города является необходимость оперативной коррекции маршрутной сети городского ПТОП, связанной с постоянным изменением общей пространственной структуры расселения городских жителей.

В ходе развития городской территории необходимо совершенствовать транспортную доступность новых районов и изменять общую конфигурацию маршрутов ПТОП [9]. Продление существующих маршрутов ПТОП до новых городских районов приводит к увеличению времени рейса, а в условиях дефицита провозной способности Перевозчиков – к увеличению интервалов движения маршрутных транспортных средств и времени ожидания на остановочных пунктах потенциальными пассажирами прибытия подвижного состава ГОТ. Разумеется, увеличение длины уже существующих маршрутов ПТОП ведет к увеличению дальности поездок пассажиров и повышает удельные расходы на перевозку пассажира и в целом снижает эффективность перевозочного процесса.

Тарифообразование на ПТОП формируется с учетом положений Приказа Министерства транспорта ГОТ 20.10.2021 г. № 351 «Об утверждении Порядка определения начальной (максимальной) цены контракта ...». В частности, величина тарифа городского ПТОП основывается на расчетах максимальной себестоимости 1 км пробега подвижного состава ГОТ. В расчетах учитываются затраты на оплату труда водителей и кондукторов, затраты на топливо, горюче-смазочные материалы и прочие эксплуатационные материалы, затраты на техническое обслуживание, ремонт и амортизацию подвижного состава. Расчет себестоимости 1 км пробега проводится для разных классов транспортных средств ГОТ, что позволяет повысить точность идентификации затрат на функционирование ПТОП на разных маршрутах.

В публикации [10] отмечается, что совокупные затраты ПТОП на выполнение транспортной работы являются сводными комплексными показателями эффективности не только подобранного подвижного состава ГОТ, но и большого числа параметров состояния системы ПТОП в целом, и в частности маршрутной системы и особенностей организации движения подвижного состава ГОТ непосредственно на УДС.

В работе [11] авторы описывают многоэтапность поиска эффективных решений в сфере совершенствования городского транспортного комплекса и объясняют проблематику сложности данной задачи многокритериальностью и разнообразием целевых функций. Решение задач оптимизации эффективности ПТОП связано с поиском оптимума для целой группы критериев [12] и выбором наиболее значимых из числа возможных вариантов – весьма непростая задача.

В работе [13] отмечается, что эффективность мероприятий по совершенствованию городской транспортной системы может существенно отличаться для разных районов города и зависит от пространственного распределения транспортного

спроса. Авторы дифференцируют районы города на несколько кластеров. Это позволяет идентифицировать зависимость структуры транспортного спроса (ИАТ / ПТОП) от среднего времени в пути.

С учетом цели и результатов проведенного анализа состояния вопроса были сформулированы следующие задачи исследования:

- провести статистический анализ основных показателей, характеризующих маршрутную сеть ПТОП Тюмени;
- провести статистический анализ базовых показателей, описывающих качество обслуживания маршрутной сети ПТОП Тюмени провозными возможностями ОТ;
- сформировать цифровой двойник ПТОП Тюмени.

Статистический анализ основных показателей, характеризующих маршрутную систему ПТОП Тюмени

Решение большой по объему и сложной по причине многокритериальности задачи по идентификации состояния маршрутной системы ПТОП весьма затруднительно без создания цифровой модели исследуемой системы, в частности – модели ГОТ.

В рамках исследования были собраны данные о фактическом качестве функционирования ПТОП в крупном российском городе Тюмени (население по состоянию на 2025 г. – 872 тыс. чел.). Необходимо уточнить, что маршрутная сеть ПТОП Тюмени объединяет 116 автобусных маршрутов, на которых работают 1276 автобусов. Других видов городского пассажирского общественного транспорта в Тюмени нет (до 2009 г. в городе функционировал троллейбусный транспорт).

В базе данных представлены следующие таблицы данных (схема базы данных ER-диаграмма представлена на рис. 1):

- информация о маршрутах ПТОП Тюмени и сведения об особенностях траектории их трассы в пространстве городской территории;
- информация об остановочных пунктах маршрутной сети ПТОП Тюмени (наименование, координаты, связь с направлением движения ГОТ);
- таблица информации о маршрутах ПТОП (наименование, номер маршрута);
- таблица связей между маршрутами ПТОП и остановочными пунктами на пути следования;
- информация о перегонах между остановочными пунктами на маршрутах ПТОП (текущий остановочный пункт, следующий остановочный пункт, порядковый номер перегона, траектория движения, принадлежность маршруту ПТОП);
- расписание движения маршрутных транспортных средств (уникальные номера единиц подвижного состава, остановочных пунктов, маршрутов ПТОП и плановое время прибытия на конкретные остановочные пункты);
- информация об используемом на маршруте подвижном составе ГОТ (государственный номер транспортного средства, вместимость, тип вместимости, категория, количество сидячих мест);
- информация о связи маршрутов ПТОП с обслуживающими их пассажирскими автотранспортными предприятиями;
- информация о пассажирских автотранспортных предприятиях.

На основе предварительной обработки данных были получены дополнительные параметры маршрутной системы ГОТ Тюмени, в частности:

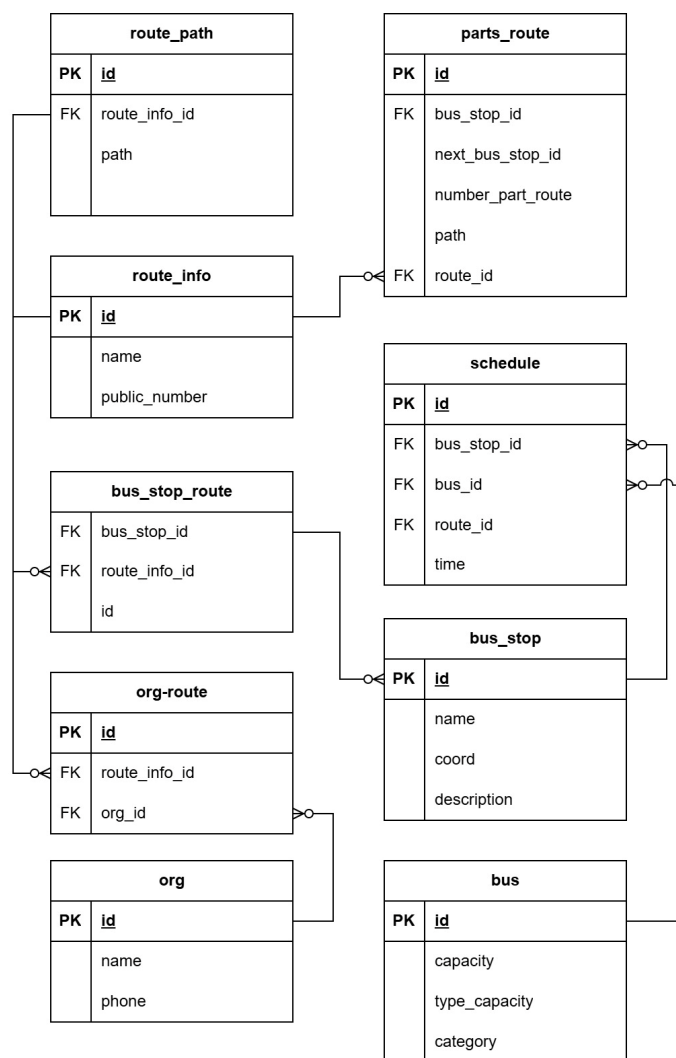


Рис. 1. ER-диаграмма базы данных о функционировании системы ПТОП Тюмени

– длина оборотного рейса для маршрутов ПТОП на основе пространственных координат (гистограмма распределения длин оборотных рейсов маршрутов ГОТ Тюмени представлена на рис. 2);

– длина перегонов на маршрутах ПТОП (гистограмма распределения длин перегонов маршрутов ГОТ Тюмени представлена на рис. 3);

– число маршрутов ПТОП, обслуживаемых конкретным остановочным пунктом (рис. 4);

– количество обслуживаемых остановочных пунктов конкретным маршрутом ПТОП (рис. 6).

На рисунках 2-4 и 6 представлены гистограммы, характеризующие распределения численных значений вышеуказанных параметров маршрутной системы ГОТ Тюмени.

Средняя (медианная) длина оборотного рейса маршрутов ПТОП Тюмени (рис. 2) составляет соответственно 37 (34) км. Это высокая величина для города общей площадью $\approx 491 \text{ км}^2$. По сути, это косвенное свидетельство практически полного охвата всей городской территории маршрутной сетью ПТОП.

Об этом же косвенно свидетельствует и общее число маршрутов, обслуживаемых ПТОП – 116, что превышает общепринятый норматив 1 маршрут / 10 тыс. чел. населения.

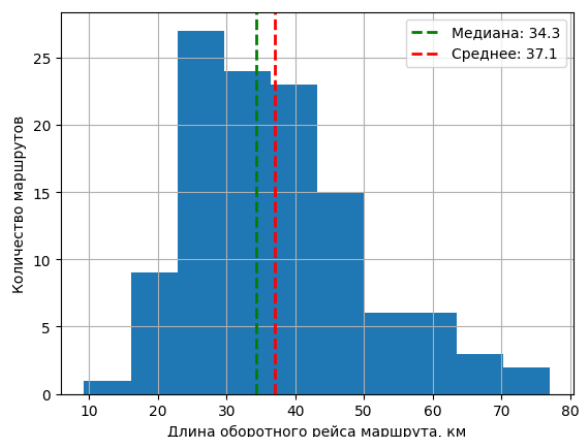


Рис. 2. Гистограмма распределения длин оборотного рейса маршрутов ПТОП Тюмени

На рис. 3 представлена гистограмма распределения длин перегонов на маршрутах ПТОП Тюмени. Средняя (медианная) длина перегона между остановочными пунктами на маршрутах ПТОП Тюмени составляет, соответственно, 690 (520) м.

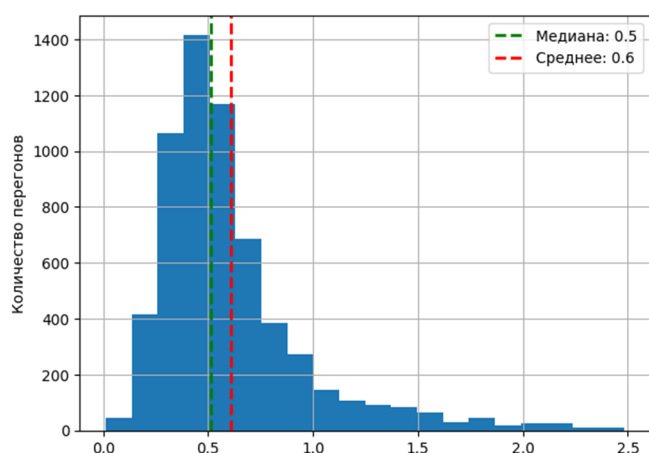


Рис. 3. Гистограмма распределения длин перегонов большей части маршрутов ПТОП Тюмени

Перегоны длиной более 2,5 км составляют 1,8% от числа всех маршрутных перегонов ПТОП Тюмени и относятся к группе пригородных маршрутов. В целом это вполне соответствует общепринятой практике. Более интересны данные о длинах перегонов на городских маршрутах. 25% значений длин перегонов между остановочными пунктами ПТОП относятся к категории «Длина перегона более 730 м», что позволяет сделать вывод либо о малой связности УДС на периферии города, либо об относительном несовершенстве маршрутной сети ПТОП Тюмени.

На рис. 4 представлена гистограмма распределения числа маршрутов ПТОП, обслуживающихся конкретным остановочным пунктом (ОП).

Среднее (медианное) значение числа маршрутов ПТОП, обслуживающихся конкретным остановочным пунктом составляет соответственно 4 (2) единицы. Разумеется, для центральных районов города характерна большая концентрация обслуживаемых ОП маршрутами ПТОП.

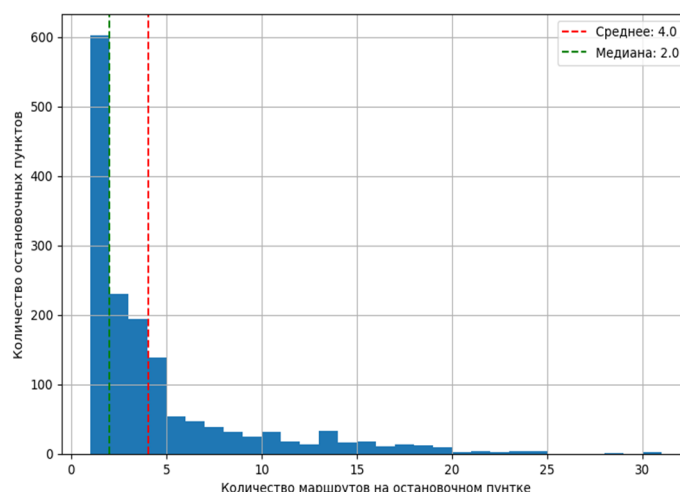


Рис. 4. Гистограмма распределения обслуживаемых маршрутов остановочными пунктами ПТОП Тюмени

Именно в центре города локализуются ОП, относящиеся к классу транспортно-пересадочных узлов. Связано это со спецификой УДС Тюмени, сформированной исторически. УДС Тюмени представляет собой фрактал класс «краб» (рис. 5), центральной осью которого является улица Республики (до 1917 г. – ул. Царская), вокруг которой исторически в течение 4-х столетий протекал рост города.



Рис. 5. Фрактал маршрутной сети ПТОП Тюмени

В таблице 1 представлены наиболее представительные ОП ГОТ, относящиеся к классу транспортно-пересадочных узлов. Классификационный критерий выбора ОП – количество маршрутов ГОТ, обслуживаемых ОП.

Например, ОП «Завод Медоборудования» обслуживает автобусы 30 маршрутов ПТОП Тюмени (20 городских и 10 пригородных); ОП «Кросно» обслуживает 28 маршрутов ПТОП Тюмени (21 городской и 7 пригородных). Четыре из пяти ОП, представленных в таблице 1, локализуются на оси

фрактала маршрутной сети ПТОП Тюмени – ул. Республики, исторически важнейшей транспортной артерии города. Единственное исключение – ОП ранга 5 (мкр. Тюменский) локализуется на улице в два шага фрактала маршрутной сети.

Таблица 1

Примеры остановочных пунктов ПТОП Тюмени, обслуживающих максимальное число маршрутов ГОТ

Наименование остановочного пункта (ОП) маршрутной сети ПТОП Тюмени	Количество маршрутов ГОТ, обслуживаемых ОП, ед.	Число рейсов, выполняемых ГОТ, проходящих через ОП, рейсов
Сквер им. Немцова	31	1184
Завод Медоборудования	30	809
Кросно	28	801
Ул. Холодильная	24	1129
мкр. Тюменский	24	1387

На рис. 6 представлена гистограмма распределения количества обслуживаемых остановочных пунктов конкретным маршрутом ПТОП (для оборотного рейса).

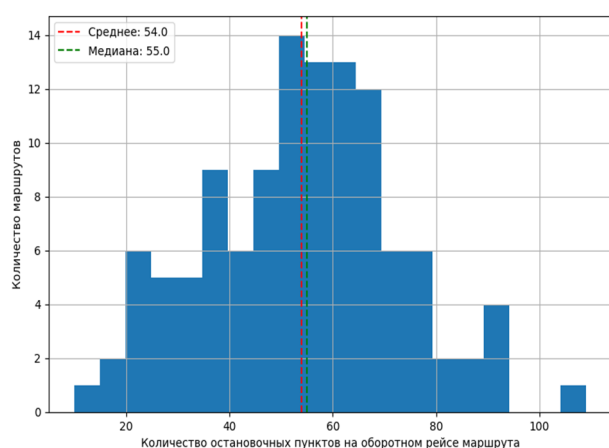


Рис. 6 Гистограмма распределения количества остановочных пунктов на оборотном рейсе маршрутов ПТОП Тюмени

Статистическое распределение количества остановочных пунктов (ОП) ПТОП, приходящихся на оборотный рейс маршрутов, соответствует нормальному закону. Среднее (медианное) значение данного параметра составляет соответственно 54 (55) единиц ОП.

В ходе аналитической работы также были решены следующие промежуточные задачи:

- скорректированы и удалены дубликаты типов вместимости для маршрутных транспортных средств ГОТ;
- удалены дубликаты остановочных пунктов ПТОП;
- удалены дубликаты времени движения маршрутных транспортных средств;
- объединены таблицы маршрутов, перегонов, остановочных пунктов, расписания и маршрутных транспортных средств в общую таблицу.

Основываясь на анализе базы данных маршрутной сети ПТОП Тюмени, были установлены пары ОП с возможностью прямого сообщения, без осуществления пересадки с автобуса одного маршрута на автобусы других маршрутов ГОТ.

Распределение количества ОП ПТОП, характеризующихся возможностью прямого беспересадочного сообщения представлено на рис. 7.

С целью обеспечения возможностей анализа связности всех остановочных пунктов ПТОП на маршрутах определена общая таблица рейсов, обслуживающих ОП, содержащая информацию о маршруте и пути следования, длине маршрута, предыдущем и последующем ОП, информацию об автобусе и времени прибытия.

В итоговой аналитической таблице содержится 268 тыс. строк (отправлений/прибытий от / к ОП ПТОП за сутки).

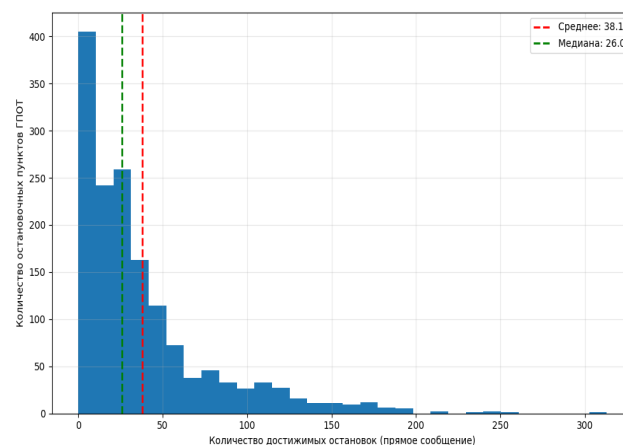


Рис. 7. Гистограмма распределения числа ОП ПТОП Тюмени с возможностью обеспечения прямого беспересадочного сообщения

В таблице 2 приведены сведения о 5 ОП маршрутной сети ГОТ Тюмени, обеспечивающих максимально возможное число связей с другими остановочными пунктами в беспересадочном сообщении.

Таблица 2

Примеры пяти остановочных пунктов ПТОП Тюмени, обеспечивающих максимальное число связей с другими остановочными пунктами в беспересадочном сообщении

Наименование остановочного пункта (ОП) маршрутной сети ПТОП Тюмени	Число связей с другими ОП в беспересадочном сообщении, ед.
Завод Медоборудования	313
мкр. Тюменский	258
Сквер Семена Пацко	248
ЖД Вокзал	215
ул. Холодильная	209

Важную роль в описании специфики маршрутной сети ПТОП также играет такой показатель, как суточное количество рейсов маршрутных транспортных средств (ТС), обслуживающих ОП. Распределение охвата рейсов ПТОП на остановочных пунктах представлено на рис. 8.

На 33,1% от общего числа ОП маршрутной сети ПТОП совершают остановки для посадки / высадки пассажиров автобусы, выполняющие 80% рейсов. Данное распределение охвата остановочными пунктами фактически выполняемых автобусами рейсов соответствует распределению Парето.

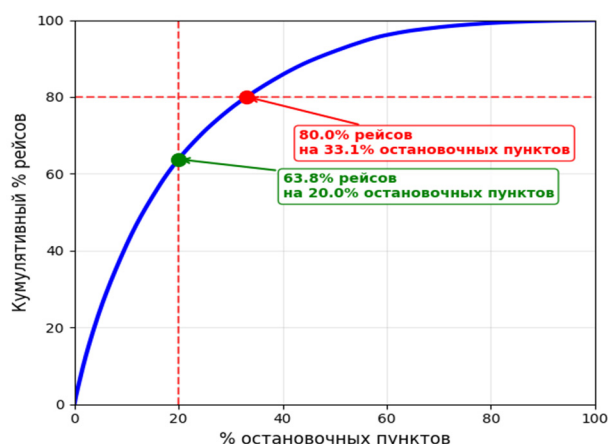


Рис. 8. Распределение охвата рейсов ПТОП на остановочных пунктах маршрутной сети Тюмени

Необходимо отметить, что обычно данная практика соответствует радиальной конфигурации маршрутной сети ПТОП.

В базе данных о функционировании ПТОП Тюмени представлены также данные о подвижном составе ГОТ и их классах вместимости. Общие параметры подвижного состава ПТОП Тюмени представлены в таблице 3.

Таблица 3

Распределение подвижного состава ПТОП Тюмени по классам вместимости

Класс маршрутных ТС (автобусов) A_m по вместимости	Число A_m , ед.	Диапазон значений по вместимости		
		Мин. значение	Сред. значение	Макс. значение
Малый	383	17	19	39
Средний	291	39	57	77
Большой	528	53	108	115
Особо большой	74	164	184	193

Уточним, что большой и средний классы автобусов могут характеризоваться пересечением величин вместимости, так как различия в классах определяются габаритами длины, а пассажировместимость зависит от конфигурации салона, числа сидячих мест и т.п.

Исходя из координат остановочных пунктов и путей следования маршрутов ГОТ был определен коэффициент непрямолинейности трасс маршрутов $K_{непр}$. Распределение численных значений коэффициента $K_{непр}$ представлено на рис. 9.

К группе относительно приемлемых по уровню непрямолинейности ($K_{непр} < 1,5$) трасс маршрутов в городском пространстве относятся лишь 38% маршрутов ПТОП Тюмени. Это еще одно свидетельство несовершенства маршрутной системы ПТОП Тюмени. Надо отметить, что проблематика непрямолинейности трасс маршрутов во многом является следствием пространственно-географической специфики городской территории (разделение территории города на три основных части рекой и железнодорожной магистралью Транссиба), но не во всех случаях. Возможности снижения непрямолинейности трасс маршрутов ПТОП в Тюмени существуют.

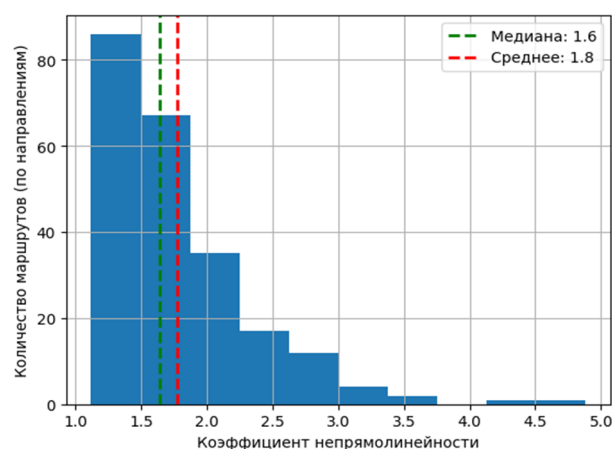


Рис. 9. Гистограмма распределения численных значений коэффициента непрямолинейности маршрутов ПТОП Тюмени (учтены трассы 116 маршрутов в двух направлениях движения автобусов)

Цифровой двойник пассажирского транспорта общего пользования

Для формирования цифрового двойника ПТОП и модели транспортного предложения обычно используются технологии теории графов [14]. На основе базы данных об остановочных пунктах, маршрутной сети ГОТ, подвижном составе и расписании ПТОП формируется модель графа, состоящая из вершин (остановочные пункты и остановки маршрутов ГОТ) и ребра между вершинами. Ребра в графе делятся на несколько типов (с соответствующими параметрами или весами):

- перегон маршрута между остановочными пунктами ПТОП (параметры: время движения и длина перегона, вместимость маршрутных ТС, наименование маршрутов и пр.);
- посадка пассажиров в маршрутное ТС на остановочном пункте ГОТ (время ожидания маршрутного ТС на ОП, стоимость проезда, порядковый номер маршрутного ТС в поездке, риск отказа посадки и пр.);
- высадка пассажиров на остановочном пункте ГОТ;
- ожидание пассажиров внутри маршрутного ТС на остановочном пункте (длительность остановки, фактическая загрузка «проезжающие пассажиры» и пр.)

Например, при формировании графа маршрутной сети внутри остановочного пункта «Сквер им. Немцова» формируется 63 вершины (один центроид, 31 для «посадки» в маршрутные ТС и 31 для «высадки» из маршрутных ТС). Схематичное отображение выборочного участка графа маршрутной сети ПТОП представлено на рис. 10.

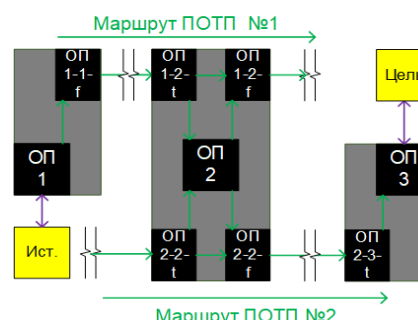


Рис. 10. Граф участка маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования

На рис. 10 для ОП-1 и для ОП-5 отсутствуют связи на высадку и посадку соответственно, так как для маршрута ПТОП № 1 ОП-1 является начальным остановочным пунктом, а для маршрута ПТОП № 2 ОП-5 является конечным.

Для формирования матриц корреспонденций и матриц затрат всех видов при моделировании транспортных потоков на графе в модель была добавлена информация о районах города. На основе метода Ball tree поиска ближайших соседей (библиотеки Scikit-learn) были определены расстояния между всеми парами транспортных районов и остановочными пунктами ПТОП. Для каждого района были определены остановочные пункты ПТОП, находящиеся в рамках транспортных районов, ограниченных окружностью радиусом 500 м и сформированы дополнительные вершины на графе. Распределение количества остановочных пунктов ПТОП для районов города представлено на рис. 11.

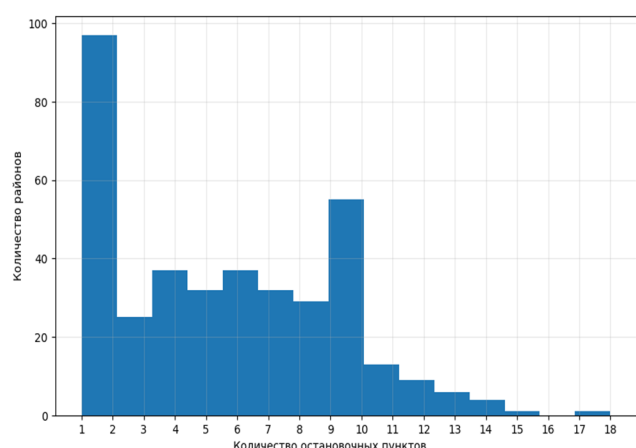


Рис. 11. Распределение количества ОП в транспортных районах, ограниченных окружностью радиусом 500 м

Для центральных районов города, для которых связность территории больше – характерно статистически большее количество остановочных пунктов ПТОП.

Прогнозное распределение пассажиропотоков на маршрутной сети ПТОП Тюмени может выполняться на основе использования следующего последовательного алгоритма действий:

1. Деление. Исходная матрица корреспонденций делится на N равных частей (количество итераций).
2. Оп деление путей передвижений пассажиров ПТОП в пространстве города с использованием алгоритма Дейкстры. Для каждой корреспонденции определяется кратчайший путь следования по маршрутной сети ГОТ (по выбранному параметру, например, по времени в пути, стоимости проезда и др.).
3. Идентификация прогнозных пассажиропотоков. Объем поездок из частичной матрицы устанавливается (добавляется) для каждого ребра входящих в кратчайший путь корреспонденции.
4. Обновление параметров ребер графа маршрутной сети ГОТ. После каждого распределения частичной матрицы, параметры на ребрах графа маршрутной сети обновляются, в целях учета пассажироместимости подвижного состава ГОТ.
5. Сл ующая итерация (возвращение к пункту 2).

Другим возможным вариантом распределения пассажиропотоков на маршрутной сети ПТОП является алгоритм распределения методом Франка-Вульфа.

Кластерный анализ системы маршрутов ПТОП Тюмени

Кластерный анализ проводился на основе PCA (Principal Component Analysis) метода главных компонент. В рамках данного метода были определены две главные компоненты PC1 «Пространственные» (длина маршрута, перегонов и плотность остановочных пунктов) и PC2 «Емкость» (средняя вместимость маршрутных ТС на маршрутах).

Параметры, определяющие главные компоненты маршрутов, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики кластеров

Характеристика маршрутов ПТОП	№ кластера маршрутов ПТОП Тюмени			
	1	2	3	4
Средняя длина маршрута за оборотный рейс, км	44	36	51	26
Среднее количество ОП за оборотный рейс, ед.	135	125	60	82
Средняя плотность ОП по длине маршрута, ОП/км	3,1	3,5	1,2	3,2
Средняя расчетная вместимость подвижного состава, пасс.мест / автобус	113	30	41	101
Количество маршрутов в кластере, ед.	33	34	13	36
Описание характерных особенностей маршрута по длине и используемого подвижного состава	Длинные маршруты; Подвижной состав большого и особо большого класса	Короткие маршруты; Подвижной состав малого и среднего класса	Длинные маршруты; Подвижной состав среднего класса	Короткие маршруты; Подвижной состав большого и особо большого класса
Примеры (номера) маршрутов ПТОП Тюмени	1д, 46, 54	43, 76, 84	10, 138, 158	1, 25, 30
Обобщенная характеристика маршрутов ПТОП Тюмени по типу	Длинные магистральные с большими объемами перевозок	Периферийные, с высокой непрямолинейностью и малыми объемами	Длинные вылетные, пригородного типа, с малыми объемами перевозок	Короткие магистральные с большими объемами перевозок

Пространственные компоненты и влияние длины оборотного рейса $L_{м. оборот}$ маршрута ПТОП на число ОП представлено на рис. 12. На рисунке представлена дифференциация маршрутов на кластеры 1-4. По величине коэффициента корреляции R можно сделать вывод о наличии статистической связи между оборотной длиной маршрута ПТОП $L_{м. оборот}$ и числом остановочных пунктов, приходящихся на оборотный рейс $N_{о.п}$.

На рис. 12 представлена также зависимость $N_{о.п} = f(L_{м. оборот})$ с дифференциацией по четырем кластерам маршрутов ПТОП Тюмени.

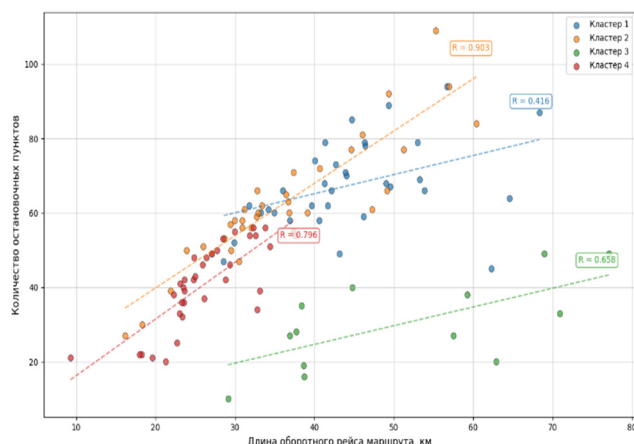


Рис. 12. Кластерная специфика зависимости $N_{о.п} = f(L_{м. оборот})$

На рис. 13 представлены фракталы класса «паук» ПТОП Тюмени, обобщающие трассы маршрутов вышеуказанных четырех кластеров.

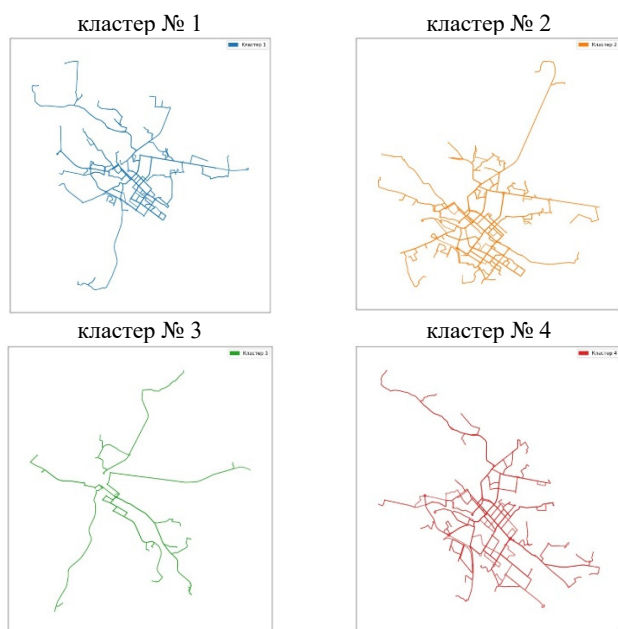


Рис. 13. Фракталы класса «паук» ПТОП Тюмени, обобщающие трассы маршрутов четырех кластеров

Обсуждение и выводы

Тематика исследований, связанных с изучением особенностей закономерностей формирования маршрутных сетей

ПТОП, является весьма актуальной для самых разных стран мира [15-17]. Объясняется это как вызовами времени, так и необходимостью снижения затрат на функционирование систем пространственного перемещения горожан, особенно в кризисные времена. Особенно ярко эта проблематика проявилась в период острой фазы COVID-19 [18].

Касаясь непосредственно результатов, полученных в ходе анализа статуса маршрутной системы ПТОП Тюмени и представленных выше, необходимо отметить следующие основные выводы.

1. Степень развития маршрутной сети автобусного ПТОП города можно характеризовать как высокую. 116 маршрутов, приходящихся на город с селитебной площадью $\approx 491 \text{ км}^2$, – это достаточно высокий по значению показатель.

2. Большинство маршрутов ГОТ можно характеризовать как маршруты с избыточной длиной. Медианная длина маршрутов ПТОП Тюмени по обороту составляет $\approx 34 \text{ км}$, что для города с населением менее 1 млн. чел. представляется чрезмерно высоким показателем. Это является основной причиной высокой пространственной неравномерности распределения пассажиропотоков по длине маршрута, что в конечном итоге отрицательно влияет на эффективность функционирования системы ПТОП. Медианное число ОП, приходящихся на типичный маршрут ПТОП Тюмени – 55, что является очень высоким показателем. Это еще одно свидетельство необходимости пересмотра системы маршрутов, в частности дифференциации маршрутов на скоростные (экспрессные) длинные и высокоэффективные короткие.

3. Для маршрутов ГОТ Тюмени характерен высокий коэффициент непрямолинейности трасс. Медианное значение $K_{непр} = 1,6$. К группе относительно приемлемых по уровню непрямолинейности ($K_{непр} < 1,5$) трасс маршрутов в городском пространстве относятся лишь около 38%. Это очень невысокий, в сравнении с большинством других, сопоставимых по населению, городов. Этот факт требует немедленного пересмотра маршрутной системы ПТОП Тюмени.

4. Медианная длина перегонов на маршрутах составляет 520 м, что в целом можно характеризовать как соответствие общепринятым как в РФ, так и в мировой практике, нормативам.

5. Треть остановочных пунктов (ОП) маршрутной сети ПТОП Тюмени обслуживает 80% выполняемых автобусами рейсов. Именно это является основой для вывода о высокой степени неравномерности востребованности ОП горожанами, и, в конечном итоге, также свидетельствует о необходимости совершенствования системы маршрутов города. В центральной части города, на оси фрактала маршрутной системы ОП могут обслуживать до 24-31 маршрутов (от общего числа 116). Периферийные ОП обслуживают автобусы очень малого числа маршрутов (около 600 ОП, или более 51% от общего числа, обслуживают всего по 1-3 маршрута).

6. Кластерный анализ маршрутов ПТОП Тюмени, выполненный по признаку соответствия числа ОП длине маршрута, показал, что автобусные маршруты дифференцируются по 4 группам:

- кластер №1 – длинные маршруты, на которых используется подвижной состав большого и особо большого класса;
- кластер №2 – короткие маршруты с использованием подвижного состава малого и среднего класса;

- кластер №3 – длинные маршруты, на которых используется подвижной состав среднего класса;
- кластер №4 – короткие маршруты, для которых характерна эксплуатация подвижного состава большого и особо большого класса.

Именно маршруты 4 кластера можно отнести к системе магистральных, выполняющих основную транспортную работу по перемещению городского населения в пространстве и времени. Таких маршрутов в маршрутной системе ПТОП Тюмени всего 36 или 31% от общего числа.

7. Идентификация статуса маршрутной системы ПТОП – важнейший элемент управленческой деятельности в сфере организации транспортного обслуживания населения городов. Это начальная отправная точка для принятия важных управленческих решений, реализация которых позволит значительно улучшить транспортную систему крупного города.

В качестве заключительного обобщающего вывода необходимо констатировать, что аналогичные исследования необходимо проводить для всех городов с населением более 100 тыс. чел. Итоговым результатом подобных исследований может быть четкая аргументация важнейшего вывода о наступлении момента необходимости реформирования системы городских маршрутов ПТОП. Косвенные результаты – идентификация «болевых» аспектов такой реформы. Степень актуальности подобных исследований может варьироваться, однако важно отметить, что их значимость возрастает именно в кризисные времена, когда муниципалитеты уже не могут позволить себе дальнейшее относительно неэффективное использование бюджетных средств.

Финансирование

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/>

Литература

1. Morozov V.V., Morozov G.N., Shepelev V.D. Modeling the formation of a vehicle queue at urban signal-controlled intersections // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 3. С. 61-68. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-61-68.
2. Petrov A.I., Zakharov D.A., Petrova D.A. Experts on Resistance to Reorganization of Structure and Technologies of Urban Mobility Provision in Russia: Challenges, Reasons, Solutions and Prospects // Automotive Experiences. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 38-58. DOI 10.31603/ae.7928.
3. Bao L., Kusadokoro M., Chitose A., Chen Ch. Development of socially sustainable transport research: A bibliometric and visualization analysis // Travel Behaviour and Society. 2023. Vol. 30, pp. 60-73. DOI: 10.1016/j.tbs.2022.08.012.
4. Мухаметханов Р.И. Анализ структуры улично-дорожной сети города и ее элементов // Системные технологии. 2023. № 2(47). С. 164-169. DOI: 10.55287/22275398_2023_2_164.
5. Захаров Д.А., Чикишев Е.М., Капский Д.В., Скирковский С.В. Изменение параметров городской транспортной системы при введении платы с владельцев автомобилей за использование улично-

дорожной сети и варьировании стоимости проезда в общественном транспорте // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 4. С. 336-344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344.

6. Jain G.V., Jain S.S., Parida M. Evaluation of travel speed of conventional buses and bus rapid transit service in Ahmedabad city, India using geo-informatics // Journal of Public Transportation. 2022. Vol. 24. P. 100034. DOI: 10.1016/j.jpubtr.2022.100034.

7. Захаров Д.А., Писцов А.В. Анализ эффективности способов активного приоритета автобусам при проезде регулируемых перекрестков // Транспорт Урала. 2023. № 4(79). С. 90-95. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-90-95.

8. Захаров Д.А., Фадюшин А.А. Изменение подвижности населения при развитии в городах инфраструктуры для общественного транспорта, велосипедистов и пешеходов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 187-193. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-187-193.

9. Chainikov D., Zakharov D., Kozin E., Pistsov A. Studying Spatial Unevenness of Transport Demand in Cities Using Machine Learning Methods // Applied Sciences (Switzerland). 2024. Vol. 14, No. 8. P. 3220. DOI: 10.3390/app14083220.

10. Колин А.В., Рыбаков П.В., Красильников П.А., Айсина Л.Р. Расчёт себестоимости транспортной работы на городском пассажирском наземном транспорте с использованием метода единичных расходных ставок // International Journal of Advanced Studies. 2025. Т. 15, № 1. С. 22-46. DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-1-326.

11. Халтурин Р.А., Карелина М.Ю. Концепция управления пассажирским транспортом в целях сбалансированного развития // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 8. С. 61-67. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-8-61-67.

12. Амиргалиева С., Аземша С., Касымова Д., Кравченко И. Оценка эффективности оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта с учетом дублируемости маршрутов имитационным моделированием // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2025. № 1(136). С. 76-87. DOI: 10.52167/1609-1817-2025-136-1-76-87.

13. Захаров Д.А. Пространственная неравномерность распределения по районам города Тюмени транспортного спроса на передвижение индивидуальным и общественным транспортом // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 3(98). С. 114-122. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-3-114-122.

14. Фадюшин А.А., Захаров Д.А., Игнатюгин В.А., Шепелев В.Д. Пространственная неравномерность формирования затрат при реализации транспортных и пешеходных корреспонденций в крупном городе // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 6. С. 43-51. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-6-43-51.

15. Yang X., Lu S., Zhao W., Zhao Z. Exploring the Characteristics of an Intra-Urban Bus Service Network: A Case Study of Shenzhen, China // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8, No. 11. P. 486. DOI: 10.3390/ijgi8110486.

16. Cao Y., Jiang D., Wang S. Optimization for Feeder Bus Route Model Design with Station Transfer // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 5. P. 2780. DOI: 10.3390/su14052780.

17. Wei Y., Jiang N., Li Z., Zheng D., Chen M., Zhang M. An Improved Ant Colony Algorithm for Urban Bus Network Optimization Based on Existing Bus Routes // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. Vol. 11, No. 5. P. 317. DOI: 10.3390/ijgi11050317.

18. Petrov A.I., Petrova D.A. Sustainability of Transport System of Large Russian City in the Period of COVID-19: Methods and Results of Assessment // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 18. P. 7644. DOI: 10.3390/su12187644.

ANALYSIS OF THE STATUS OF THE ROUTE SYSTEM OF PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORT

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

Artur I. Petrov, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, artigpetrov@yandex.ru

Evgeniya V. Lihajrova, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, lihajrovaev@tyuiu.ru

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

Abstract

This article presents the results of a study examining the status of the public urban passenger transport (PUPT) route system in Tyumen, a large Russian city (population 872,000), which is represented by a single mode of public transport – buses. The objective of the study is to identify the potential of buses as a primary means of public transportation for city residents and to identify ways to improve Tyumen's PUPT-based passenger transportation route system. This study is particularly relevant given the rapidly growing number of private motorists, the acute shortage of road network capacity, and the potential transport collapse anticipated by municipal authorities in the foreseeable future. The study focuses on identifying the specific features of the PUPT route network, statistically describing a set of key characteristics of Tyumen's bus routes, cluster analysis, and route differentiation based on a set of characteristic features. It has been established that Tyumen's bus routes are highly heterogeneous and can be divided into four route groups. This is an important conclusion that allows us to justify possible management actions to reform the network of public transport routes in a large Russian city, aimed at increasing the efficiency of the entire municipal transport system.

Keywords: urban public passenger transport, route network, passenger flow, transport modeling, digital twin

References

- [1] 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. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-61-68.
- [2] A. I. Petrov, D. A. Zakharov, D. A. Petrova, "Experts on Resistance to Reorganization of Structure and Technologies of Urban Mobility Provision in Russia: Challenges, Reasons, Solutions and Prospects," *Automotive Experiences*. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 38-58. DOI: 10.31603/ae.7928.
- [3] L. Bao, M. Kusadokoro, A. Chitose, and Ch. Chen, "Development of socially sustainable transport research: A bibliometric and visualization analysis," *Travel Behaviour and Society*. 2023. Vol. 30, pp. 60-73. DOI: 10.1016/j.tbs.2022.08.012.
- [4] R. I. Mukhametkhanov, "Analysis of the structure of the city's road network and its elements," *Systems technologies*. 2023. No. 2 (47), pp. 164-169. DOI: 10.55287/22275398_2023_2_164.
- [5] 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.
- [6] G. V. Jain, S. S. Jain, and M. Parida, "Evaluation of travel speed of conventional buses and bus rapid transit service in Ahmedabad city, India using geo-informatics," *Journal of Public Transportation*. 2022. Vol. 24, p. 100034. DOI: 10.1016/j.jpubtr.2022.100034.
- [7] D. A. Zakharov, A. V. Pistsov, "Analysis of the effectiveness of active priority methods for buses when passing through controlled intersections," *Transport in the Urals*. 2023. No. 4(79), pp. 90-95. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-90-95.
- [8] D. A. Zakharov, A. A. Fadyushin, "Changing population mobility with the development of infrastructure for public transport, cycling and pedestrians in cities," *Civil Engineers Bulletin*. 2020. No. 5(82), pp. 187-193. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-187-193.
- [9] 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, p. 3220. DOI: 10.3390/app14083220.
- [10] A. V. Kolin, P. V. Rybakov, P. A. Krasilnikov, L. R. Aisina, "Calculation of the self-cost of transportation work on ground urban transit using the unit expense rate method," *International Journal of Advanced Studies*. 2025, Vol. 15, No. 1, pp. 22-46. DOI: 10.12731/2227-930X-2025-15-1-326.
- [11] R. A. Khalturin, M. Yu. Karelina, "The concept of passenger transport management for balanced development," *T-Comm*. 2024. Vol. 18, No.8, pp. 61-67. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-8-61-67.
- [12] S. Amiralieva, S. Azemsha, D. Kasymova, and I. Kravchenya, "Evaluation of the efficiency of optimization of the urban passenger transport schedule taking into account the duplication of routes by simulation modeling," *Vestn. Kaz. Akad. Transp. Kommun. im. M. Tynyshpaeva*. 2025. No. 1(136), pp. 76-87. DOI: 10.52167/1609-1817-2025-136-1-76-87.
- [13] D. A. Zakharov, "Spatial unevenness of the transport demand distribution for movement by private and public traffic transportation in the districts of the city of Tyumen," *Civil Engineers Bulletin*. 2023. No. 3(98), pp. 114-122. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-187-193.
- [14] 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. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-6-43-51.
- [15] X. Yang, S. Lu, W. Zhao, and Z. Zhao, "Exploring the Characteristics of an Intra-Urban Bus Service Network: A Case Study of Shenzhen, China," *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8, No. 11, p. 486. DOI: 10.3390/ijgi8110486.
- [16] Y. Cao, D. Jiang, and S. Wang, "Optimization for Feeder Bus Route Model Design with Station Transfer," *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 5, p. 2780. DOI: 10.3390/su14052780.
- [17] Y. Wei, N. Jiang, Z. Li, D. Zheng, M. Chen, and M. Zhang, "An Improved Ant Colony Algorithm for Urban Bus Network Optimization Based on Existing Bus Routes," *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. Vol. 11, No. 5, p. 317. DOI: 10.3390/ijgi11050317.
- [18] A. I. Petrov, D. A. Petrova, "Sustainability of Transport System of Large Russian City in the Period of COVID-19: Methods and Results of Assessment," *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 18, p. 7644. DOI: 10.3390/su12187644.

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.

Artur I. Petrov, Industrial University of Tyumen, Associate Professor of the Department "Road Transport Operation", PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Tyumen, Russia, ORCID 0000-0003-2634-0567.

Evgeniya V. Lihajrova, Industrial University of Tyumen, graduate student of the Department "Road Transport Operation", 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.