

Научная статья
УДК 656.02
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>
EDN: YNNWNU



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПО СЕТИ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А. И. Фадеев*, А. М. Ильянков, В. В. Укадеров

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

9135335784@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6581-7087>
ilyankov3322@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>
ukader24rus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7224-6619>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс планирования общественного транспорта подразделяется на ряд задач стратегического, тактического и оперативного уровней, к которым относятся разработка системы маршрутов, установление интенсивности движения по маршрутам, проектирование структуры парка подвижного состава, распределение имеющегося парка подвижного состава по маршрутам, определение требуемого объема субсидирования и др.

Материалы и методы. В статье дана многокритериальная математическая модель проектирования перевозок, на основании которой приведенные выше задачи решаются путем распределения (ограниченных или неограниченных) транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые могут быть наложены данные ограничения.

Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP. Маршруты также могут быть откорректированы экспертами.

В статье показано, что при решении задач проектирования перевозок транспортный спрос следует описывать матрицей пассажирских корреспонденций, сформированной за все время движения транспорта в будний день, с целью учета всех пассажирских потоков по маршрутной сети, а не только периодов наибольшей интенсивности перевозок.

Расчет параметров транспортного предложения осуществляется по результатам распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР), что является сложной нерешенной до настоящего времени проблемой. В статье изложена разработанная методика РАР, основанная на гибкой стратегии пассажира, учитывающей время ожидания транспорта, непрямолинейность маршрута, предпочтения видов транспорта, возможное перераспределение пассажирских потоков между остановочными пунктами сети, расположенными в пределах пешеходной доступности. Непрямолинейность поездок оценивается посредством полученной эмпирической модели деления спроса по длине поездок.

Результаты. Сформулированы задачи проектирования перевозок общественным транспортом, разработана многокритериальная математическая модель их решения.

Изложена методика распределения пассажирских потоков по маршрутной сети, основанная на гибкой стратегии пассажира.

Практическая реализация описанной методики РАР осуществлена посредством специально разработанного программного обеспечения с использованием реляционной системы управления базами данных (СУБД).

Обсуждение и заключение. Эффективность разработанной методики РАР показана на тестовых расчетах, которые осуществлены с использованием пассажирских корреспонденций, среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных посредством обработки валидаций электронных проездных билетов городского пассажирского транспорта г. Красноярска.

© Фадеев А. И., Ильянков А. М., Укадеров В. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общественный транспорт, планирование общественного транспорта, маршрутная сеть, интервалы движения по маршрутам, парк подвижного состава, матрица пассажирских корреспонденций, транспортный спрос, транспортное предложение, программа перевозок, транспортная сеть, маршрут, поездка

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фадеев А. И., Ильянков А. М., Укадеров В. В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 362-386. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

EDN: YNNWNU

CORRESPONDENCE DISTRIBUTION OVER A NETWORK IN DESIGNING PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORTATION TASKS

Aleksandr I. Fadeev*, Altksei M. Iliankov, Vitalii V. Ukaderov

Siberian Federal University,

Krasnoyarsk, Russia

9135335784@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6581-7087>

ilyankov3322@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>

ukader24rus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7224-6619>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The process of planning public transport is divided into a few number of tasks in strategic, tactical and operational levels, which include the development route system, the establishment of traffic intensity along routes, the design of the structure of road transport vehicles, the distribution of the current road transport vehicles along the routes, determining the required amount of the subsidies, etc.

Materials and methods. The article presents a multi-criteria mathematical model of transportation design, according to which the tasks have been solved by distributing (limited or unlimited) transport resources between the permissible routes of the transport network in accordance with a variety of efficiency criteria, which can be the subject to appropriate restrictions.

The formation acceptable routes on the transport network can be carried out by means of the algorithms developed, for example, in the framework of solving TNDP and TNDFSP tasks. The routes can also be adjusted by experts.

Transport demand is set by a matrix of passenger correspondence generated for the entire period of traffic on a weekday, to ensure that all passenger flows along the route network are taken into account, and not only the periods of the greatest traffic intensity.

The calculation of the parameters of the transport offer in the process of solving the problems of transportation design is carried out based on the results of the passenger correspondence distribution on the route network (PAP), which is a complex problem unsolved today. The article describes the developed PAP methodology based on a flexible passenger strategy that takes into account the waiting time for transport, the proximity of the route through an empirical model of dividing demand by the length of trips, the preferences of transport modes, the possible redistribution of passenger flows between the stopping points of the network located within a walking distance.

Results. The tasks of designing public transport transportation have been formulated, a multi-criteria mathematical model of their solution has been developed.

The method of distribution of passenger flows on the route network based on a flexible passenger strategy has been described.

© Fadeev A. I., Iliankov A. M., Ukaderov V. V., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The effectiveness of the developed PAP methodology is shown on test calculations, which were carried out using passenger correspondence, an average weekday in October 2019, obtained by processing validations of e-tickets of urban passenger transport in Krasnoyarsk.

Discussion and conclusion. *The practical implementation of the described methodology for the distribution of passenger flows on the route network using relational database management systems (DBMS) MS SQL Server has been carried out.*

KEYWORDS: *public transport, public transport planning, route network, traffic intervals along the routes, road transport vehicles, passenger correspondence matrix, transport demand, transport supply, transportation program, transport network, route, trip*

The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 25.05.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: *the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.*

For citation: Fadeyev A. I., Ilyankov A. M., Ukaderov V. V. Correspondence distribution over a network in designing public urban passenger transportation tasks. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023; 20 (3): 362-386. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие общественного транспорта является важнейшей проблемой в современном обществе. Транспортная система должна обеспечивать требуемое качество обслуживания пассажиров при минимальном объеме затрат.

Согласно [1, 2, 3], процесс планирования общественного транспорта можно разделить на пять задач, которые в зависимости от их временного горизонта могут быть разделены на три уровня планирования:

- стратегический (разработка системы маршрутов);
- тактический (установление интенсивности, разработка расписания движения);
- оперативный (формирование плана выпуска подвижного состава, наряда водителей).

Следует отметить, что задачи разработки маршрутов, установления частот (интервалов движения), составления расписания движения могут решаться как в комплексе, так и по отдельности. Например, для новой маршрутной системы требуется определить интервалы движения и сформировывать расписание. С другой стороны, периодически возникает потребность пересматривать интервалы и расписания движения в соответствии с изменившимися пассажирскими потоками без изменения самих маршрутов. Для практики актуальным является подключение к маршрутной сети новых остановочных пунктов, микрорайонов или элементов улично-дорожной сети (УДС). В таких случаях одним из основных критериев является минимум объема корректировки маршрутной системы при выполнении установленных ограничений (таких, например, как интервалы движения).

Стратегическая задача проектирования системы маршрутов населенного пункта выполняется достаточно редко, зачастую осуществляется совершенствование системы, т.е. развитие маршрутов в соответствии с изменившимися условиями, например, пассажирскими потоками, строительством новых линий метрополитена и т.д.

С точки зрения пассажиров, маршрутная сеть должна охватывать максимально большую зону обслуживания, быть доступной, проложенной по кратчайшему пути, соответствовать имеющемуся транспортному спросу. Критерий функционирования транспортной системы – обеспечение минимальных затрат времени на поездки и сопутствующее пешее перемещение, а также наименьшего числа пересадок [4, 5].

Для транспортного оператора желательно минимизировать общее число маршрутов, что позволяет сократить количество подвижного состава и экипажей, необходимых для формирования транспортного предложения: маршруты не должны быть слишком короткими или длинными [3]. В мировой практике считается, что при проектировании маршрутов не следует планировать более двух пересадок, иначе пассажир может переключиться на другой вид транспорта.

Охват территории обуславливает объем спроса, который может быть обслужен общественным транспортом. Данный параметр зависит от плотности маршрутной сети и пешеходной доступности остановочных пунктов.

Операторы отдают предпочтение сетям определенной формы: радиальным, прямоугольным, треугольным и т.д. [6].

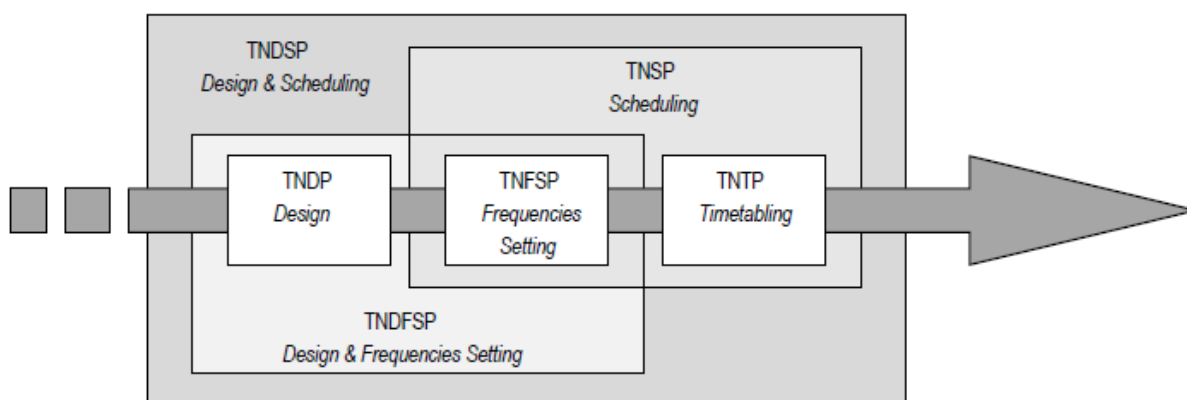


Рисунок 1 – Структура задач проектирования маршрутной сети [3]

Figure 1 – Structure of route network design tasks [3]

Интервалы движения для каждого маршрута устанавливаются дифференцированно по периодам времени: часам дня, дням недели или сезонам, таким образом, чтобы обеспечивать соответствие транспортного предложения и спроса, рентабельную работу операторов. Главной задачей при проектировании перевозок пассажиров транспортом общего пользования по регулярным маршрутам является нахождение компромисса между этими противоречивыми целями.

На рисунке 1 задачи проектирования маршрутной сети классифицированы следующим образом: проектирование (TNDP), настройка частот (TNFSP), составление расписания (TNTP), проектирование и настройка частот в комплексе (TNDFSP = TNSP + TNFSP), планирование (TNSP = TNFSP + TNTP) и, наконец, вся проблема проектирования и планирования (TNDSP) как совокупность трех основных проблем [3]. Кроме перечисленных задач, актуальными являются вопросы совершенствования структуры парка подвижного состава, финансирования функционирования операторов.

Таким образом, проектирование перевозок общественным транспортом осуществляется посредством решения следующих задач формирования транспортного предложения¹:

- разработка системы маршрутов;
- установление интенсивности движения по маршрутам;

– проектирование структуры парка подвижного состава;

– распределение имеющегося парка подвижного состава по маршрутам;

– определение требуемого объема субсидирования при заданных параметрах (критериях) качества транспортного обслуживания (в т.ч. пассажирских тарифах);

– распределение имеющегося объема субсидий между маршрутами и др.

Система маршрутов общественного транспорта (задача TNDP) разрабатывается на основании транспортной сети и матрицы спроса, определенной между остановочными пунктами или транспортными районами (traffic analysis zones, TAZ [7]). Матрица спроса (отправления – прибытия пассажиров OD) содержит количество поездок, которые осуществляются между пунктами транспортной сети за определенный период времени. Точность данных матрицы OD обуславливает адекватность решения поставленной задачи, поэтому методы определения транспортного спроса имеют особое значение. В некоторых случаях в матрицах OD содержится дополнительная информация, например, набор возможных зон пересадки [2].

Маршрут формируется из двух терминалов (начально-конечных остановочных пунктов) и последовательности промежуточных остановочных пунктов. Терминалы имеют инфраструктуру для выполнения начально-конечных

¹ Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

операций: стоянки, разворотные площадки, бытовое обслуживание экипажей и др. Промежуточные остановочные пункты не могут быть началом или завершением маршрута.

Однозначного определения проблемы формирования маршрутов не существует, обычно рассматривается несколько целей, ограничений и допущений. Из-за сложности задачи применяются допущения и ограничения, которые не всегда отвечают практическим условиям [2].

Настройка частоты заключается в установлении интервалов движения по каждому маршруту [2, 7]. От интервалов движения зависит время ожидания пассажиров и требуемое количество транспортных средств. По причине сложности рассматриваемых задач они традиционно решаются последовательно, сначала проектируется транспортная сеть, затем осуществляется настройка частоты. Только в последнее десятилетие предпринимаются попытки решения задач проектирования маршрутов и настройки частоты (TNDFSP) в комплексе [8]. Было доказано, что TNDFSP является очень сложной проблемой, которая требует определения многих условий. В разных исследованиях применяются неодинаковые допущения, что приводит к невозможности сопоставления полученных результатов и их несоответствию реальным условиям функционирования общественного транспорта [2]. Зачастую при решении задачи используется один критерий, в то время как к маршрутной системе предъявляется множество противоречивых требований. Обычно рассматривается автопарк, состоящий только из одного типа транспортных средств, на практике же, как правило, эксплуатируется подвижной состав, обладающий разными параметрами.

Распределение пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР) является сложной задачей [2]. Для РАР было предложено множество моделей и подходов к решению с различными уровнями детализации и сложности [9, 10]. Поведение пассажиров почти всегда значительно упрощается.

Исследования задачи TNDFSP касаются в основном городских автобусных сетей. При рассмотрении других видов транспорта, таких как поезд или метро, аспекты, связанные с ограничениями инфраструктуры, имеют большее значение, поэтому проблема в этих случаях, как правило, имеет дополнительные специфические ограничения [2].

Исследования в области формирования городских маршрутных систем в России про-

водились с 30-х годов XX в. [11, 12, 13, 14]. На первом этапе был сформирован комплекс требований, которым должна отвечать маршрутная система: соответствовать фактическим перемещениям населения, соединять корреспондирующие пункты сети по кратчайшему пути, обеспечивать перевозки с наименьшими затратами времени. Процедура формирования маршрутных систем была сформулирована на уровне общих положений.

В дальнейшем методы оптимизации маршрутных систем характеризуются использованием математических методов и ЭВМ. Предлагаемые методики основаны на принципе направленного отбора вариантов маршрутов по критерию минимальных затрат времени населения на перемещения с применением определенных ограничений [15, 12, 13, 14], таких как:

- списка существующих маршрутов, не подлежащих изменению;
- минимальной и максимальной длины маршрутов;
- минимального значения интервала движения;
- предельного количества подвижного состава;
- минимального числа пассажиров, требуемого для открытия маршрута.

Чаще всего в качестве критерия оптимальности использовались затраты времени на поездки с учетом пересадок. В некоторых работах, например [16], рассматривается подход к совершенствованию маршрутной системы путем последовательного формирования вариантов экспертами и формальной оценки данных вариантов. Считается, что в этом случае учитываются трудно формализуемые требования, предъявляемые к маршрутной системе.

Имеются работы, в которых задача рассматривается в многокритериальной постановке [17].

В некоторых источниках (например, [18]) описывается локальная маршрутизация общественного транспорта, касающаяся ограниченного числа маршрутов.

Проектирование структуры парка является отдельной задачей, которая заключается в определении вместимости и количества транспортных средств на маршруте. Данная задача, как правило, решается без изменения маршрутов.

В разработанных методиках определение структуры парка подвижного состава осуществляется в основном по условию соответствия транспортного спроса и предложения. Баланс

спроса и предложения формулируется исходя из пассажирооборота за определенный период времени (час, сутки, месяц, год и т.д.) или мощности пассажирских потоков на наиболее загруженном участке сети² [2, 19]. Однако при этом не учитывается эффект перераспределения пассажирских потоков между маршрутами при изменении интенсивности движения по ним.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи проектирования перевозок. Сформулируем задачу проектирования перевозок следующим образом. Имеется транспортная сеть – совокупность взаимосвязанных узлов, расположенных на УДС: $G=(W, E)$, где W – конечное непустое множество вершин $w \in W$; E – множество связей (дуг или ребер) между вершинами $(u, w) \in E$; $u \neq w$. Для каждого ребра $(u, w) \in E$ заданы определенные свойства, например, длина, время и т.д.

В зависимости от решаемых задач применяются различные транспортные модели, в нашем случае вершинами транспортной сети являются остановочные пункты общественного транспорта. В множестве G можно выделить подмножества G^T транспортных сетей различных видов общественного транспорта (автобус, троллейбус, трамвай и т.д.)

Задача дислокации остановочных пунктов общественного транспорта решается исходя из необходимости обеспечения рациональной пешеходной доступности. Эмпирически установлено (например, [20]), что пешеходная доступность в пределах 400–500 м от автобусной остановки приводит к удовлетворению 90% транспортного спроса. С другой стороны, уменьшение расстояния пешеходной доступности обуславливает снижение скорости сообщения общественного транспорта и повышение эксплуатационных затрат.

Таким образом, дислокация остановочных пунктов осуществляется на основе компромисса между пешеходной доступностью, скоростью сообщения и экономической эффективностью транспортного процесса. Задача рационального размещения остановочных

пунктов рассмотрена, например, в [20].

На графе G определено множество допустимых маршрутов M ; $m=\{w_1, \dots, w_i, \dots, w_t\}$; $m \in M$; $|M|=\eta$. Пара соседних вершин w_i, w_{i+1} связана дугой $e_{w_i, w_{i+1}}$ графа G .

Маршруты подразделяются по видам транспорта $M=\{M^T\}$, например, автобус, трамвай, троллейбус. Движение по маршрутам осуществляется в двух направлениях: прямом и обратном. Следовательно, каждый маршрут описывается двумя последовательностями пунктов его траектории в зависимости от направления движения $k=\{a, b\}$ (где a, b – прямое и обратное направление соответственно), $m=\{m^a, m^b\}$. Маршрут можно представить, как $m^k=\{w_1^k, \dots, w_i^k, \dots, w_t^k\}$.

Допустимым является маршрут, удовлетворяющий соответствующим ограничениям, например, по длине, времени движения, потенциальному числу пассажиров и т.д.

Для функционирования маршрутов используется множество транспортных средств Ψ (парк подвижного состава), которые подразделяются на подмножества по видам транспорта (автобус, троллейбус, трамвай), классам вместимости (особо большой, средний, малый и особо малый), стоимости эксплуатации. В зависимости от постановки задачи может быть применена классификация транспортных средств по другим параметрам, например, экологическому классу.

На практике, как правило, маршрут обслуживается подвижным составом одного класса вместимости. В некоторых работах (например, [21]) рассматривается возможность применения транспортных средств неодинаковой вместимости. Однако эффективность данного предложения не доказана, т.к. в этом случае существенно усложняется процесс планирования расписания и управления движением по маршруту.

Задачи проектирования перевозок можно решать путем распределения (ограниченных или неограниченных) транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые при необходимости накладываются соответствующие

² Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

Пассажирские автомобильные перевозки: учебник для вузов / Гудков В.А., Миротин Л.Б., Вельможин А.В., Ширяев С.А. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 448 с.

ограничения³. Многокритериальная математическая модель проектирования перевозок заключается в оптимизации функции

$$F(X) \rightarrow \min; X = \{\Psi_1, \dots, \Psi_n\};$$

$$\Psi_k \subset \Psi; F = \{f_1, \dots, f_s\}, \quad (1)$$

где X – вектор транспортных ресурсов (транспортных средств), закрепленных за маршрутами;

Ψ_k – множество транспортных средств, закрепленных за k -м маршрутом;

f_i – i -й критерий качества транспортного предложения, на который может быть наложено ограничение: $f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max}$;

Парк подвижного состава может быть ограничен по числу транспортных средств каждого типа.

Некоторые критерии требуется максимизировать, но их можно привести к виду (1).

2. Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP [2], а также с привлечением экспертов. Например, в работе [23] предложен многоуровневый и многорежимный метод проектирования сети. Сеть состоит из трех уровней: каркасного, артериального и фидерного, которые описывают различные виды общественного транспорта (метро, легкорельсовый транспорт, троллейбус, BRT, обычный автобус и железнодорожный). В [24] маршрутная сеть формируется посредством открытой системы моделирования MATSim.

В работе [25] с использованием эвристического алгоритма генерируется три различных и взаимодополняющих набора рациональных и реалистичных маршрутов. Первая группа маршрутов формируется посредством кратчайших путей пассажирских корреспонденций высокого спроса. Маршруты второй группы соединяют основные транзитные узлы (например, железнодорожные вокзалы) с линиями высокого спроса. Третья группа маршрутов образовывается на существующей сети автобусов.

В стандартном подходе предполагается, что маршруты могут начинаться и заканчи-

ваться на любом узле транспортной сети. Некоторые исследования учитывают, что на практике в качестве терминалов допустимо использовать заданное подмножество соответственно оснащенных узлов [26]: начальные и конечные узлы маршрутов предопределены, что значительно сокращает количество возможных вариантов.

Более инновационный подход заключается в том, что на первом этапе проектирования маршрутной системы определяется общая топология сети (в форме звезды, треугольника или колеса со спицами) так, что маршруты могут следовать только по заранее определенным коридорам [27].

В этом направлении разработаны рекомендации по дизайну маршрутной сети, например, [28]:

- в крупных мегаполисах применяется концепция высокой плотности линий, что позволяет обслуживать пассажиров не более чем с одной пересадкой;

- в городах с населением 100–200 тыс. жителей спрос удовлетворяется одной двумя кольцевыми линиями, проложенными минуя центральную часть;

- в городах с населением до 100 тыс. человек все поездки выполняются по радиальным маршрутам через центр;

- в небольших населенных пунктах спрос на транспортное обслуживание осуществляется путем координации междугородных и пригородных линий;

- в более мелких населенных пунктах транспортное обслуживание осуществляется региональными линиями ближайшего крупного города и (или) магистрального транспорта (в таких случаях необходима координация расписаний перевозок).

Аналогичные принципы изложены в других источниках по проектированию маршрутных сетей.⁴

3. Определение транспортного спроса

Транспортный спрос задается матрицей пассажирских корреспонденций (OD) $D = \|d_{ij}\|$, где d_{ij} – количество пассажиров, которые должны быть перевезены из узла i в узел j транспортной сети. Матрица OD формируется как некая усредненная модель

³ Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

⁴ Методические рекомендации по разработке Документа планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа по муниципальным и межмуниципальным маршрутам автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом (утв. Минтранс России 30.06.2020).

потребности населения в передвижениях по транспортной сети.

В ранее проведенных исследованиях для матрицы корреспонденций предлагается использовать период наибольшей мощности пассажиропотоков. Данному условию отвечает утренний или вечерний пиковый период.⁵ Эту рекомендацию нельзя признать приемлемой, так как, во-первых, периоды наибольшей мощности пассажирских потоков на разных маршрутах неодинаковы и, во-вторых, пассажирские корреспонденции разных периодов движения транспорта существенно отличаются.

Для задач проектирования перевозок следует применять матрицы корреспонденций, в которых учтены все пассажирские потоки по маршрутной сети. Данному условию соответствует весь период движения общественного транспорта за рабочий день. Матрица выходных дней может быть использована для оценки эффективности маршрутной системы в эти дни и расчета оптимальной интенсивности движения подвижного состава по маршрутам.

Матрица OD сама по себе является сложной проблемой, она оказывает существенное влияние на результат решения задачи и оценку работоспособности алгоритмов.

В большинстве работ, посвященных TNDP, используется несколько эталонных примеров для сравнения результатов [2]. Наиболее часто применяемый эталон предложил Mandl (1979). Сеть состоит из 15 узлов и симметричной матрицы OD со 142 корреспонденциями. Очевидно, что данный эталон имеет чисто теоретическое значение с недоказанной ценностью для требований практики к результатам решения рассматриваемой задачи. Упрощения, сделанные в теории, усложняют практическое применение предложенных методов решения [2].

Существующие методы определения пассажирских потоков вследствие их трудоемкости и ограниченной эффективности не позволяют осуществлять на должном уровне мониторинг транспортного спроса. В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения подвижности населения, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека: мобильными телефо-

нами, транспортными средствами, камерами видеонаблюдения и т.д. (Urban computing, Big data, Internet of things, IoT).

В рамках данного подхода в работах [29, 30] приведена методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов (Electronic Travel Tickets): смарт-карт (smartcard), транспортных карт, магнитных карт, мобильных телефонов или других электронных устройств (Electronic Gadgets), реквизиты которых фиксируются в автоматизированной системе оплаты проезда Automated Fare Collection (AFC) при выполнении операции валидации.

Апробация методики расчета пассажирских корреспонденций из операций валидации электронных проездных билетов осуществлена по данным системы общественного транспорта г. Красноярска за октябрь 2016 г. и апрель 2019 г., предоставленных МКУ «Красноярсгортранс». Доказано в [29, 30], что пассажирские корреспонденции, рассчитанные посредством разработанной методики, статистически соответствуют генеральному множеству поездок общественным транспортом в пределах допустимых погрешностей, в результате обеспечивается оценка характеристик спроса общественного транспорта.

В данной работе использована матрица OD, сформированная за период движения буднего (рабочего) дня.

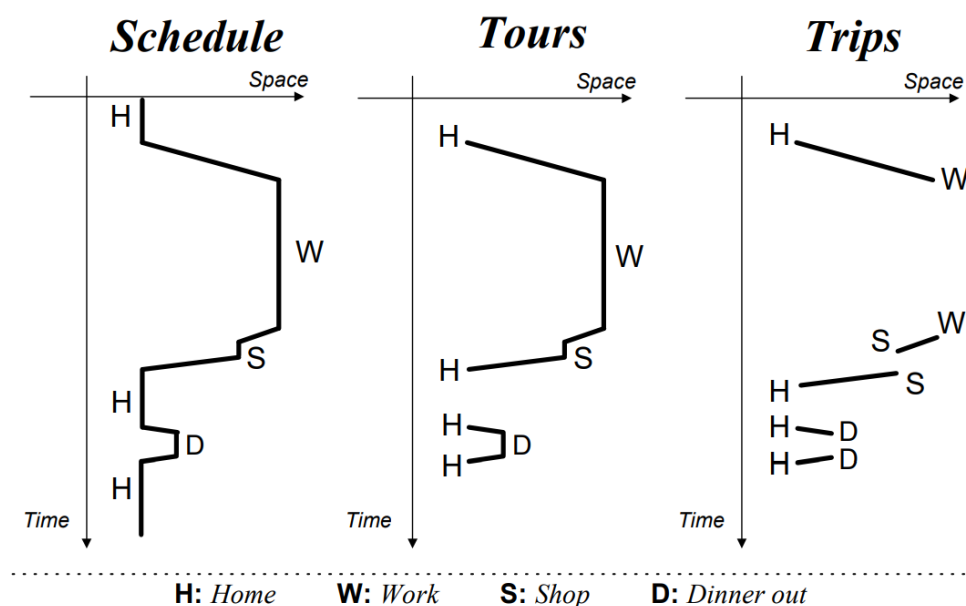
4. Задача распределения корреспонденций по сети. Для расчета транспортной работы требуется осуществить:

- разделение корреспонденций по видам транспорта (modesplit, mode-share);
- распределение корреспонденций по сети (traffic assignment, route assignment, route choice).

При решении задачи разделения корреспонденций по видам транспорта рассматривается выбор пользователем способа поездки⁶. Наиболее простые модели основаны на эмпирических моделях, обеспечивающих разделение спроса по наиболее представительному фактору, например, времени поездки. Также используются модели, основанные на вероятностном дискретном выборе: критерий выбора – максимум полезности или минимум затрат пассажира.

⁵ Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

⁶ Горев А. Э. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие. СПбГАСУ. СПб., 2010. 214 с.

Рисунок 2 – Иллюстрация активности (транспортного поведения жителя)⁷Figure 2 – Representing Activity/Travel Behavior⁷

Следует учитывать наличие мультимодальных поездок, которые формируются по маршрутам нескольких видов транспорта.

Для описания транспортной мобильности будем использовать следующие понятия [31] (рисунок 2):

- деятельность (activity) – занятие, которое осуществляется в определенном месте и на которое, как правило, требуется определенное время (например, работа, учеба, покупки, прием у врача и т.д.);

- этап (stage), сегмент, звено поездки – движение с использованием одного вида транспорта, точнее, одного транспортного средства;

- поездка (trip) – перемещение между смежными видами деятельности, осуществленное посредством одного или нескольких этапов (сегментов), если поездка выполняется с пересадками (сменой транспортного средства);

- тур (tour) – последовательность (цепочка) поездок, начинающихся и заканчивающихся в одном и том же месте, в отличие от цепочки поездок (tripchain), которая может не заканчиваться в одном и том же месте;

- цель поездки (trippurpose) определяется

деятельностью, осуществляемой в конце поездки.

При распределении корреспонденций по сети (passenger assignment problem, PAP) в задачах проектирования перевозок моделируется поведение пассажиров при выборе поездок. Проблема состоит в определении маршрута (или маршрутов с пересадками) для обслуживания пассажирской корреспонденции. PAP считается подзадачей TNDP и TNDPSP [2].

PAP общественного транспорта отличается от аналогичной задачи распределения легкового транспорта по УДС. Сеть общественного транспорта отличается от автомобильной УДС. Она включает в себя несвязанные остановочными пунктами участки (рисунок 3). Например, движение прямого и обратного направлений осуществляется через остановки, расположенные на разных сторонах проезжей части.

Зачастую пассажир может выбирать начало и завершение поездки из нескольких остановочных пунктов, находящихся в пределах пешеходной доступности, т.е. для пассажирской корреспонденции поездки могут начинаться не только в пункте и заканчиваться необязательно в пункте (рисунок 4).

⁷ Transportation systems analysis: demand and economics. Режим доступа: https://ocw.mit.edu/courses/1-201j-transportation-systems-analysis-demand-and-economics-fall-2008/resources/mit1_201jf08_lec05/ (дата обращения: 11.05.2023).

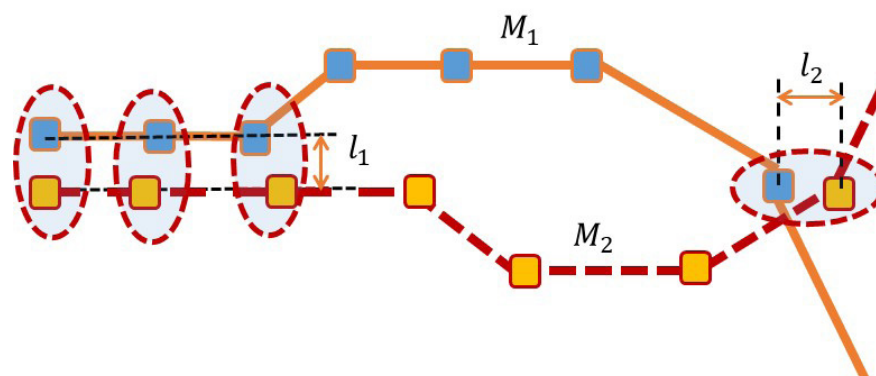


Рисунок 3 – Участок сети с остановочными пунктами маршрутов M_1 и M_2 в пределах пешеходной доступности, $l_1 \leq l_p$, $l_2 \leq l_p$, где l_p – расстояние пешеходной доступности
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – A section of the network with stopping points of M_1 and M_2 routes within a walking distance, $l_1 \leq l_p$, $l_2 \leq l_p$, where l_p – a walking distance
Source: compiled by the authors.

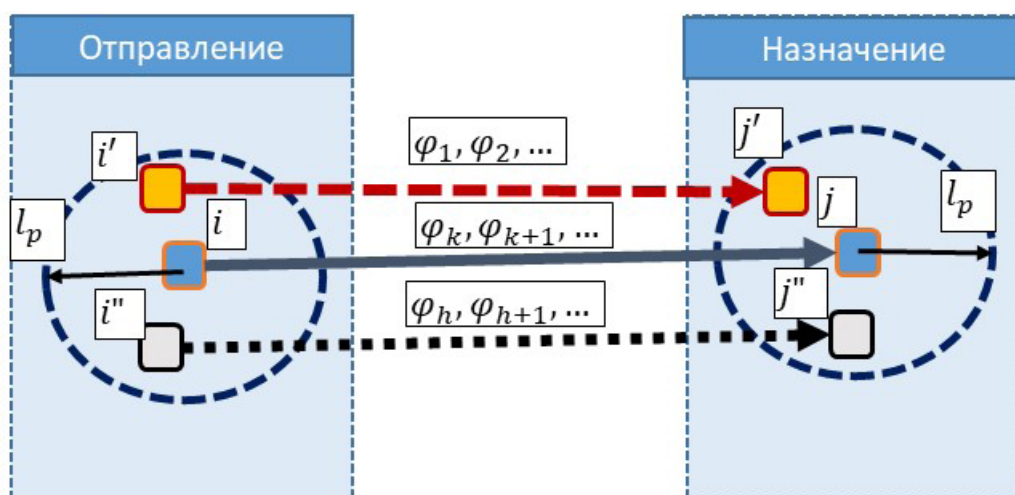


Рисунок 4 – Схема формирования прямых поездок для корреспонденции d_{ij} :
 l_p – расстояние пешеходной доступности;
 i, i', i'' – остановочные пункты начала поездок;
 j, j', j'' – остановочные пункты завершения поездок;
 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \dots$ – поездки.
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Direct trips formation scheme for correspondence d_{ij} :
 l_p – walking distance;
 i, i', i'' – stopping points for starting trips;
 j, j', j'' – stopping points for completing trips;
 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \dots$ – trips.
Source: compiled by the authors.

При формировании поездок необходимо рассматривать пешеходные и пересадочные процессы между различными видами общественного транспорта (автобус, железная дорога) или объектами общественного и частного транспорта. Доступ к остановкам может моделироваться центроидными соединителя-

ми в простых моделях и одной или несколькими вспомогательными сетями в более реалистичных проектах [31].

Для обеспечения пересадок остановочные пункты объединяются в комплексы, что существенно усложняет процесс формирования модели транспортной сети.

При описании мультимодальных сетей, в которых пассажиры могут выбирать между видами транспорта, применяются различные подходы [32]. В самых простых версиях нет взаимодействия между потоками пассажиров разных видов транспорта. В таких работах, как правило, на первом этапе осуществляется распределение спроса между видами транспорта, а затем для каждого из них решается задача РАР.

В более сложных подходах учитывается возможность того, что пассажиры совершают пересадки. В этих случаях выбор вида транспорта осуществляется в процессе формирования допустимых вариантов поездок пассажира.

Особую проблему составляет описание модели транспортной сети. При кодировании сети возможно множество потенциальных ошибок: пропуск ссылок и узлов, неправильное кодирование расстояний, использование неправильных направлений и др. [31]. В настоящее время в задачах проектирования перевозок имеется возможность использовать модель маршрутной сети из систем диспетчерского управления общественным транспортом, что существенно упрощает подготовку исходных данных.

На выбор поездки пассажиром определенное влияние оказывает тарифная система, например, тариф, предусматривающий пересадки без дополнительной оплаты, может стимулировать поездки с пересадками.

Пропускная способность зависит от вместимости и частоты движения подвижного состава. Рассмотрим влияние интенсивности движения. При относительно небольшом интервале между транспортными средствами (порядка 10 мин на городских маршрутах, 15–20 мин междугородных) пассажиры приходят на остановочный пункт случайным образом без учета расписания (даже если оно существует). В таких случаях при стабильных интервалах среднее время ожидания пассажира примерно равно половине интервала движения. При значительных интервалах пассажиры приходят ближе ко времени отправления, т.е. время ожидания определяется более сложным образом. На мультимодальных перевозках могут организовываться скоординированные поездки. Например, расписание получасового автобусного сообщения с железнодорожной станцией может быть скоординировано так, чтобы автобус прибывал на станцию за 5 мин до отправления поезда.

Методы назначения поездок в работе [31] подразделяются на:

- наивные «все или ничего», которые приемлемы в основном только для сетей с большими интервалами движения (как правило, на большие расстояния);
- учитывающие несколько возможных вариантов поездок, например, распределение пропорционально интенсивностям движения;
- основанные на равновесии со стохастическим элементом или без него, учитывающие возможную перегруженность общественного транспорта.

Наивный алгоритм «все или ничего» назначает всех пассажиров к поездке с минимальным временем (с учетом времени ожидания). Выбор этого единственного минимального пути был в течение многих лет традиционным подходом к решению рассматриваемой задачи.

Более реалистичным подходом является распределение на основе вероятности посадки пропорционально интенсивности движения.

В случаях нескольких вариантов поездок перспективным является подход, основанный на гибкой стратегии пассажира, которая заключается в следующем:

- определяются возможные варианты сегментов поездок;
- пассажиры распределяются между поездками на основе вероятности выбора сегмента поездки, которая пропорциональна интенсивности движения транспортных средств.

Очевидно, что, формируя поездку, пассажир до начала поездки оценивает возможное время ожидания транспорта на каждом из сегментов.

Перегруженность сегмента поездки обусловливается двумя факторами: во-первых, ограниченной вместимостью транспортных средств (автобусов, поездов) и, во-вторых, взаимодействием между общественным транспортом и частными автомобилями, использующими одну и ту же дорожную сеть – увеличение трафика одного вида транспорта влияет на время в пути другого.

Для распределения пассажирских корреспонденций по маршрутам наиболее часто используются подходы, основанные на следующих допущениях стратегии поведения пассажира при выборе поездок [33]:

- минимальное число пересадок;
- поездки по кратчайшему пути;
- посадка в первое подходящее транспортное средство, т.е. поездки между конкурирующими маршрутами распределяются пропорционально интенсивности движения.

Следует отметить, что задача РАР сама по себе является очень сложной проблемой с обширной литературой, в которой описано множество моделей и подходов [2], однако ее до настоящего времени нельзя признать окончательно решенной.

Рассмотрим методику распределения пассажирских корреспонденций на маршрутной сети, в которой, в отличие от ранее разработанных подходов, учитывается:

- перераспределение пассажирских потоков через остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности от пунктов начала и завершения пассажирских корреспонденций соответственно;

- предпочтения пассажиров в зависимости от длины или времени поездки.

Пассажир отдает предпочтение поездкам по кратчайшему пути, который измеряется расстоянием или временем. Однако из нескольких возможных вариантов поездки пассажир не обязательно выберет кратчайший. Очевидно, что пассажир не определит разницу во времени в несколько процентов. К тому же, в зависимости от ситуации на УДС, время поездки может изменяться существенно. При увеличении длины поездки (расстояния или времени) вероятность ее выбора пассажиром снижается. При этом будем рассматривать относительную длину поездки, которую рассчитываем по кратчайшему варианту для рассматриваемой корреспонденции d_{ij} :

$$l'_s = \frac{l_s}{l_{ij}^{min}}, \quad (2)$$

где l'_s – относительная длина s -й поездки;

l_s – фактическая длина s -й поездки;

l_{ij}^{min} – наименьшая длина поездки для корреспонденции d_{ij}

На рисунке 5 дано полученное из практики (по результатам обработки валидаций электронных проездных билетов общественного транспорта г. Красноярска) распределение спроса по длине поездки, которая рассчитана как отношение текущего к наименьшему расстоянию среди имеющихся вариантов для пассажирской корреспонденции. По критерию Пирсона теоретическая аппроксимация соответствует экспериментальным данным с уровнем доверительной вероятности не ниже 0,95.

Экспериментальные данные для рисунка 5 получены следующим образом: во-первых, в результате обработки валидаций электронных проездных билетов [29,30] рассчитывается множество пассажирских корреспонденций с указанием пункта отправления, пункта назначения и маршрута. Во-вторых, для каждой корреспонденции формируются возможные варианты поездок. В-третьих, в полученном множестве выбирается поездка наименьшей длины, что позволяет определить относительную длину пассажирской корреспонденции.

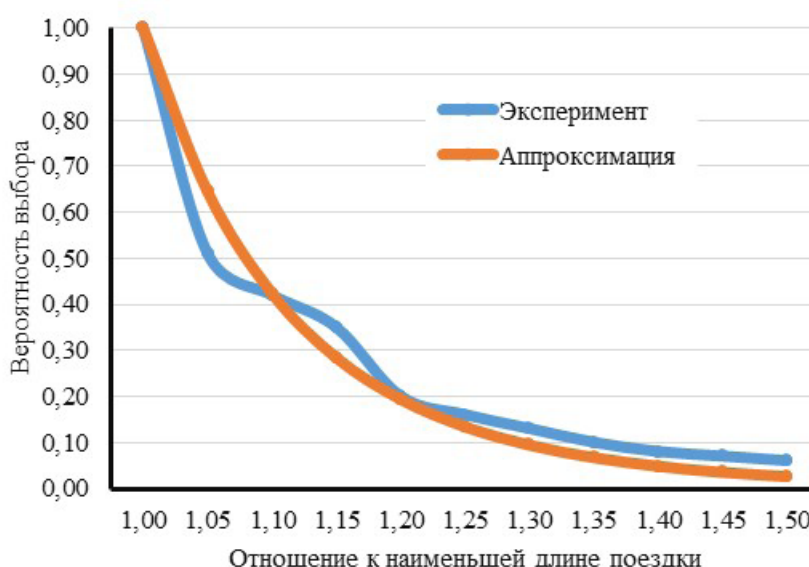


Рисунок 5 – Эмпирическая модель деления спроса по длине поездок
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Empirical model of dividing demand by the length of trips
Source: compiled by the authors.

В результате формируется массив относительных длин фактических пассажирских корреспонденций, представленный на рисунке 5 как эмпирическая модель деления спроса по длине поездок.

Функция распределения вероятности поездки пассажира в зависимости от ее относительной длины имеет следующий вид:

$$\Phi(l') = l'^{-K_l}, \quad (3)$$

где K_l – коэффициент. Для условий общественного транспорта г. Красноярска методом наименьших квадратов получено $K_l=9$.

Вероятность s -й поездки среди имеющихся вариантов для пассажирской корреспонденции d_{ij} определяется следующим образом:

$$p_s^l = \frac{\Phi(l'_s)}{\sum_i \Phi(l'_i)}. \quad (4)$$

Для каждой пассажирской корреспонденции d_{ij} матрицы OD определяются возможные поездки:

$$R_{ij} = \{r_1, r_2, \dots\}. \quad (5)$$

Поездка состоит из одного или нескольких маршрутных сегментов:

$$r_s = \{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}, n \geq 1. \quad (6)$$

Пассажирская корреспонденция осуществляется без пересадки, если поездка состоит из одного маршрутного сегмента: $n=1$ в выражении (6). При $n > 1$ пассажир осуществляет $n-1$ пересадку.

Сегмент поездки φ_s описывается посредством кортежа (m, i, j) , где: $\varphi_s.m, \varphi_s.i, \varphi_s.j$ – маршрут, первый и последний остановочный пункт в сегменте соответственно.

Схема возможных вариантов прямых поездок для пассажирской корреспонденции d_{ij} приведена на рисунке 4. В данном примере поездки сформированы между пунктами $i-j$ (начало и завершение корреспонденции), а также пунктами i', i'' (расположенными в пешеходной доступности от начала корреспонденции) и j', j'' (находящимися в пешеходной доступности от ее завершения). Данный подход позволяет учитывать перераспределение пассажиров через остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности, при изменении интенсивности движения по маршрутам.

На рисунке 6 дана схема пассажирских поездок для пассажирской корреспонденции 336 – 1101. На схеме проиллюстрировано 8 поездок, которые начинаются в пунктах 323, 335 и 336, а завершаются в пунктах 290 и 1101.

Поездки с пересадками формируются для пассажирских корреспонденций при отсутствии прямых вариантов. Некоторые пассажиры выполняют поездки с пересадками даже при наличии прямого сообщения.

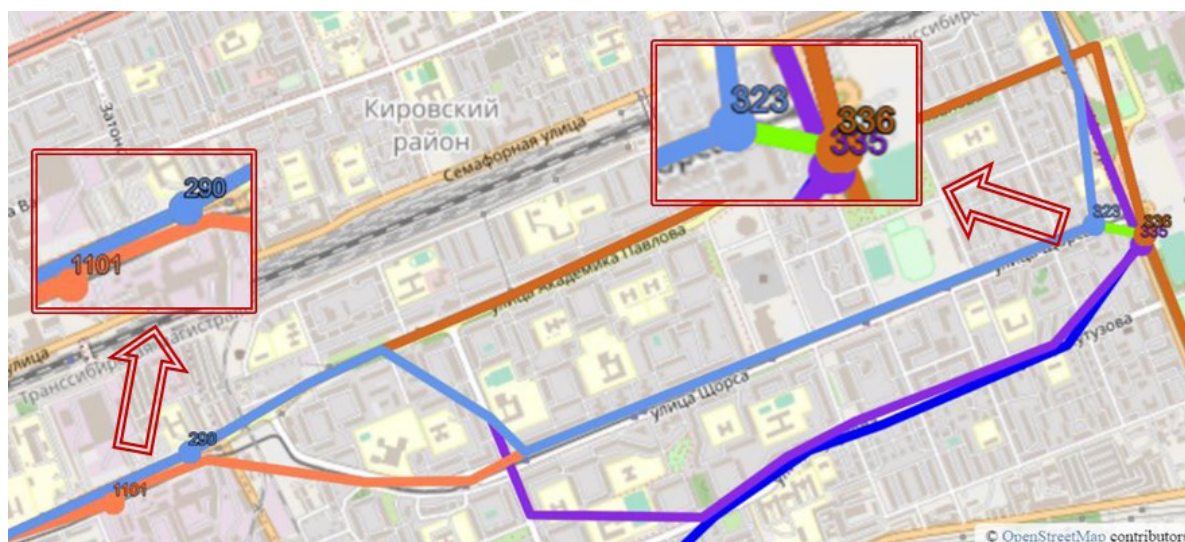


Рисунок 6 – Схема поездок без пересадки, сформированных для корреспонденции между остановочными пунктами 336 – 1101.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The scheme of trips without a transfer, formed for correspondence between 336 – 1101 stopping points
Source: compiled by the authors.

По результатам обработки операций валидации электронных билетов. Красноярская удельный вес таких пассажиров составляет 1,2%. При проектировании перевозок данной величиной можно пренебречь, т.е. считаем, что пассажир не пользуется поездками с пересадками при наличии прямого сообщения. В этой же связи будем считать, что при наличии поездок с одной пересадкой пассажир не использует возможные маршруты с двумя пересадками.

Таким образом, будем использовать следующий порядок определения поездок для пассажирских корреспонденций: во-первых, формируются прямые поездки; во-вторых, для неудовлетворенных корреспонденций определяются поездки с одной пересадкой и далее – с двумя пересадками. Как упоминалось выше, более двух пересадок планировать нецелесообразно из-за возможного переключения пассажира на другой вид транспорта (например, легковой автомобиль). Удельный вес необслуженных пассажиров будем использовать в качестве одного из критериев решения задачи.

Рассмотрим процесс определения поездок. Поездка формируется из сегментов маршрутов в соответствии со следующими условиями:

$$l(i, \varphi_1 \cdot i) \leq l_p, \quad (7)$$

$$l(\varphi_n \cdot j, j) \leq l_p, \quad (8)$$

$$l(\varphi_s \cdot j, \varphi_{s+1} \cdot i) \leq l_p, \quad (9)$$

где $l(x, y)$ – евклидово расстояние между остановочными пунктами транспортной сети x, y .

Начальный и конечный пункты поездок находятся на расстоянии пешеходной доступности от начала (7) и завершения (8) пассажирской корреспонденции соответственно. Пункты пересадок (9) расположены в пешеходной доступности друг от друга.

Для пунктов пересадок могут быть установлены дополнительные ограничения, например, в первую очередь поездки с пересадками формируются через транспортно-пересадочные узлы.

В зависимости от пунктов пересадки для каждой комбинации маршрутов будет получено несколько поездок различной длины. В этой связи для каждой комбинации маршрутов выбираются варианты поездок с наименьшим расстоянием с учетом ограничения на возможные пункты пересадок.

На рисунке 7 приведен пример из трех поездок, состоящих из пяти маршрутных сегментов: $r_1 = \{\varphi_1, \varphi_3\}$; $r_2 = \{\varphi_1, \varphi_4\}$; $r_3 = \{\varphi_2, \varphi_5\}$. Из схемы видно, что сегмент может входить в разные поездки для пассажирской корреспонденции.

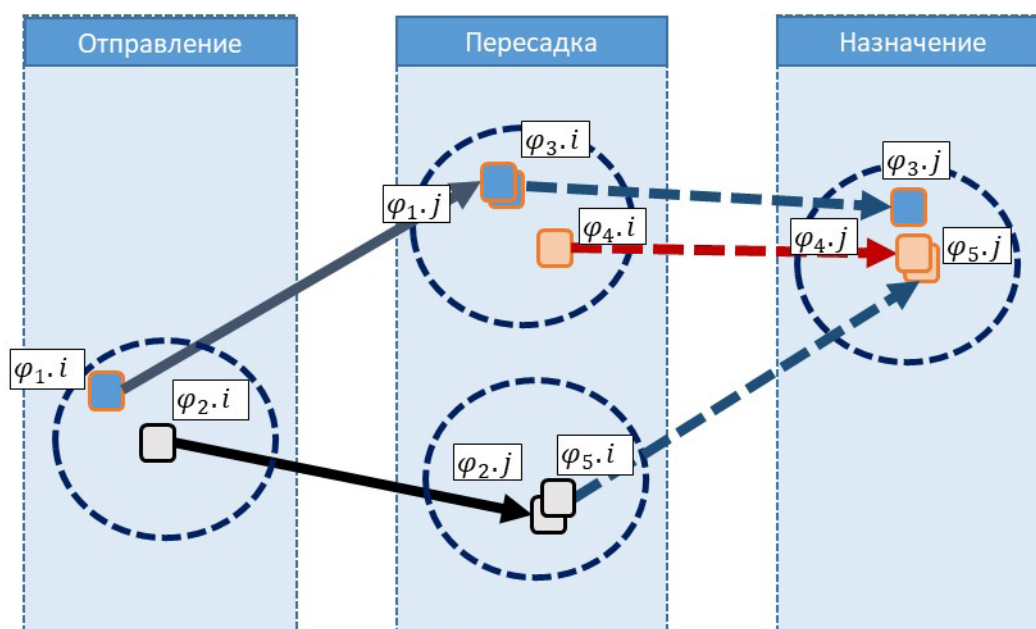


Рисунок 7 – Схема формирования поездок с пересадками для корреспонденции
Источник: составлено авторами.

Figure 7– Formation trips scheme with transfers for correspondence:
Source: compiled by the authors.

Как уже говорилось, пассажир осуществляет посадку в первое подходящее транспортное средство, т.е. вероятность выбора между конкурирующими сегментами поездки пропорциональна интенсивности движения подвижного состава. Очевидно, что, выбирая поездку с пересадкой, пассажир оценивает возможное время ожидания транспорта на каждом из этапов.

Разделим множество сегментов Φ , из которых сформированы все варианты поездок для корреспонденции d_{ij} , на подмножества в соответствии с этапом (звеном) поездки:

$$\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}. \quad (10)$$

Вероятность использования x -го сегмента (в соответствии с теоремой Байеса⁸) может быть рассчитана следующим образом:

$$p_x = \frac{\lambda_x p_x^m}{\sum_{\varphi_k \in \Phi_s} \lambda_k p_k^m}, \text{ если } \varphi_x \subset \Phi_s, \quad (11)$$

где λ_x, λ_k – интенсивность движения по маршрутам x -й и k -й поездок соответственно;

$p_x^m \cdot p_k^m$ – вероятность предпочтения пассажиром вида транспорта на x -м и k -м маршрутом сегменте соответственно;

Φ_s – множество сегментов s -го звена (этапа) пассажирской корреспонденции d_{ij} .

Вероятность предпочтения пассажиром вида транспорта можно определить по результатам обследования пассажирских потоков посредством, например, обработки валидаций электронных проездных билетов [29, 30]. Формируется матрица пассажирских корреспонденций, для каждого элемента которой известен вид транспорта перевозок, маршрут и интенсивность движения подвижного состава.

Определим множество пассажирских корреспонденций, начальные и конечные пункты которых находятся в пределах пешеходной доступности от пунктов начала и завершения корреспонденции d_{ij} :

$$H = \{h: l(i, h.i) \leq l_p, l(j, h.j) \leq l_p\}, \quad (12)$$

где: $l(i, h.i), l(j, h.j)$ – евклидово расстояние между начальными и конечными пунктами пассажирских корреспонденций h и d_{ij} .

Множество H подразделим на подмножества по видам транспорта:

$$H = \{H_1, H_2, \dots\}. \quad (13)$$

Вероятность предпочтения пассажиром s -го по отношению к x -му виду транспорта, рассчитанная по пассажирской корреспонденции d_{ij} , равна:

$$p_s^m = \frac{\sum_{h \in H_s} (h.d/h.\lambda)}{\sum_{n=s,x} \sum_{h \in H_n} (h.d/h.\lambda)}, \quad (14)$$

где $h.d$ – количество пассажиров, перевезенных по пассажирской корреспонденции h ;

$h.\lambda$ – интенсивность движения по маршруту пассажирской корреспонденции h .

Таким образом, получаем выборку вероятностей предпочтения пассажирами видов транспорта для всех элементов матрицы D . Из данной выборки можно определить среднюю по сети вероятность предпочтения видов транспорта в альтернативе с другими конкурирующими видами, например, автобус – троллейбус, автобус – трамвай и т.д.

В результате вероятность использования s -й поездки для корреспонденции d_{ij} рассчитывается следующим образом:

$$p_s = \frac{p_s^l \prod_{\varphi_x \in \Phi_s} p_x}{\sum_{\varphi_k \in \Delta} p_k^l \prod_{\varphi_n \in \Phi_k} p_n}, 0 \leq p_s \leq p_x \leq 1, \sum p_x = 1, \quad (15)$$

где вероятность выбора пассажиром s -й поездки с учетом непрямолинейности (см. выражение (4), рисунок 5).

Длина x -го маршрутного сегмента – это расстояние движения по маршруту φ_x между остановочными пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$:

$$l_x = l^m(\varphi_x.i, \varphi_x.j, \varphi_x.m). \quad (16)$$

Расстояние между остановочными пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$ можно определить как сумму длин перегонов, расположенных в маршруте $\varphi_x.m$ между пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$. Время маршрутного сегмента τ_x рассчитывается аналогично как сумма времени прохождения перегонов маршрута между пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$.

Распределение пассажиров корреспонденции d_{ij} между поездками рассчитывается:

⁸Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 611 с.

$$Q_s^r = p_s d_{ij}, \quad (17)$$

где Q_s^r – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , отнесенных к поездке r_s .

Число пассажиров сегмента – это сумма пассажиров всех поездок, включающих рассматриваемый сегмент. Таким образом, распределение пассажиров корреспонденции d_{ij} между сегментами

$$Q_x^\varphi = \sum_{\varphi_x \subset r_k} Q_k^r, \quad (18)$$

где Q_x^φ – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , отнесенных к маршрутному сегменту φ_x .

Длина s -й поездки:

$$L_s = \sum_{x=1}^n l_x. \quad (19)$$

Время s -й поездки:

$$T_s = \sum_{x=1}^n \tau_x. \quad (20)$$

Пассажирооборот (транспортная работа) s -й поездки:

$$P_s = Q_s L_s. \quad (21)$$

Расстояние пешего перемещения пассажиров при пересадках в s -й поездке:

$$l'_s = \begin{cases} 0 & \text{для } n = 1 \\ \sum_{x=1}^{n-1} k'_p l(\varphi_x \cdot j, \varphi_{x+1} \cdot i) & \text{для } n > 1, \end{cases} \quad (22)$$

где k'_p – коэффициент непрямолинейности пешеходного движения пассажира;

$l(\varphi_x \cdot j, \varphi_{x+1} \cdot i)$ – евклидово расстояние между пунктом завершения предыдущего маршрутного сегмента и началом следующего.

Рассмотрим вопрос определения времени ожидания транспорта в процессе поездки. Если через остановочный пункт начала сегмента поездки проходит один маршрут, подходящий для корреспонденции d_{ij} , и на маршруте выдерживается постоянный интервал движения, среднее время ожидания пассажира составляет половину интервала между транспортными средствами [31]. Данный интервал является случайной величиной, его

отклонения от среднего значения подчиняются нормальному закону распределения, т.е. среднее время ожидания транспорта:⁹

$$\tau^p = \frac{1 + (\sigma_i \lambda)^2}{2\lambda}, \quad (23)$$

где σ_i – среднеквадратическое отклонение интервала от математического ожидания.

В настоящее время общественный транспорт функционирует под диспетчерским управлением на основе спутниковой системы глобального позиционирования. Одна из задач диспетчерского управления – обеспечение регулярности движения по маршрутам. Таким образом, актуальной задачей является анализ влияния диспетчерского управления на σ_i и выявление факторов, которые обуславливают значения данного параметра.

С другой стороны, наличие нескольких вариантов поездок пассажира с остановочного пункта оказывает соответствующее влияние на среднее время ожидания. При увеличении числа вариантов процесс движения транспортных средств приближается к пуассоновскому, т.е. среднее время ожидания [34]:

$$\bar{\tau}^p = \frac{1}{\lambda^2}, \quad (24)$$

где λ^2 – суммарная интенсивность движения транспортных средств через остановочный пункт.

В большинстве случаев число вариантов сегментов маршрута, подходящих для пассажирской корреспонденции, недостаточно, чтобы считать поток транспортных средств пуассоновским, поэтому в расчетах будем использовать выражение (22), имея в виду, что это наибольшее значение среднего времени ожидания пассажира.

Таким образом, время ожидания транспорта для s -й поездки:

$$\tau_s^p = \sum_{x=1}^n \frac{1 + (\sigma_i \lambda_x)^2}{2\lambda_x}, \quad (25)$$

где λ_x – интенсивность движения транспорта по x -му сегменту, входящему в s -ю поездку.

Время перемещения пассажира от начального до конечного пунктов s -й поездки:

⁹Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов: Высш. школа, 1980. 535 с.

$$T_s^p = T_s + \tau_s^p + l_s^p / v_p, \quad (26)$$

где v_p – скорость пешего движения пассажира.

Количество перевезенных пассажиров по s -му маршруту рассчитывается как сумма числа пассажиров всех сегментов поездок:

$$Q_s^M = \sum_{M_s=\varphi_{k.M}} Q_k^{\varphi}. \quad (27)$$

Пассажирооборот определяется аналогично:

$$P_s^M = \sum_{M_s=\varphi_{k.M}} Q_k^{\varphi} l_k. \quad (28)$$

5. Расчет программы перевозок. Применяя описанный алгоритм ко всем элементам матрицы пассажирских корреспонденций, получаем поездки для каждого элемента матрицы. В результате обеспечивается расчет абсолютных и относительных показателей транспортного предложения.

Математическая модель программы перевозок, которая описывает параметры транспортного предложения и потребные ресурсы.

$$a_k = \lambda_k / t_k^o, \quad (29)$$

$$L_k = l_k^o \lambda_k \bar{T}_k^m; L = \sum_k L_k, \quad (30)$$

$$Q_k = \sum_{d_{ij}} Q_{kd_{ij}}^M; Q = \sum_k Q_k, \quad (31)$$

$$Q' = \sum_s p_s d_{ij}, \quad (32)$$

$$k_r = Q / Q', \quad (33)$$

$$P_k = \sum_{d_{ij}} P_{kd_{ij}}^M; P = \sum_k P_k, \quad (34)$$

$$\gamma_k = P_k / (L_k q_k^n); \quad \gamma = \sum_k P_k / \sum_k (L_k q_k^n), \quad (35)$$

$$S_k = S_k^{km} L_k; S = \sum_k S_k, \quad (36)$$

где λ_k – интенсивность движения по k -му маршруту;

a_k – число транспортных средств на k -м маршруте;

t_k^o – время оборота по k -му маршруту;

L, L_k – пробег транспортных средств общий и по k -му маршруту соответственно;

$\bar{T}_k^m$ – среднее время работы транспортных средств на k -м маршруте;

Q, Q_k – объем перевозок общий и по k -му маршруту соответственно;

$Q_{kd_{ij}}^M$ – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , перевезенных по k -му маршруту;

p_s – вероятность обслуживания пассажиров корреспонденции d_{ij} s -м маршрутным сегментом;

k_r – коэффициент пересадочности;

P, P_k – транспортная работа общая и по k -му маршруту соответственно;

$P_{kd_{ij}}^M$ – транспортная работа корреспонденции d_{ij} по k -му маршруту;

q_k^n – номинальная вместимость транспортного средства, используемого на k -м маршруте;

γ, γ_k – коэффициент динамического использования вместимости общий и на k -м маршруте соответственно;

S_k^{km} – стоимость одного километра пробега транспортного средства, используемого на k -м маршруте;

S, S_k – стоимость программы перевозок суммарная и k -го маршрута соответственно.

6. Решение задач проектирования перевозок в многокритериальной постановке. Как упоминалось выше, при решении задач проектирования перевозок формируемое транспортное предложение оценивается вектором параметров (критериев оптимальности), определяющих эффективность и качество транспортного обслуживания. В существующих рекомендациях [22] данные показатели подразделяются на группы оценок: оператора перевозок, пассажира, использования подвижного состава.

Оценки оператора перевозок обуславливают экономическую эффективность перевозочного процесса. Эти показатели также имеют косвенное значение для пассажиров, например, объем перевозок указывает на удовлетворенность пассажиров обслуживанием.

Оценки пассажира непосредственно отражают качество транспортных услуг, наиболее значимыми из которых являются доступность, комфорт, удобство и безопасность. Для некоторых оценок в HCM 2000 [22] разработа-

ны нормативы, основанные на установлении уровня обслуживания (level of service, LOS).

В руководстве по разработке комплекса оценок эффективности маршрутных перевозок [35] приведены подробные рекомендации по формированию систем показателей эффективности проектов совершенствования транспорта, включающие как традиционные, так и дополнительные параметры, ориентированные на клиента и общественные интересы.

Для задачи в многокритериальной постановке требуется определить оптимальное по Парето решение, при котором ни один частный критерий нельзя улучшить, не ухудшив другие критерии оптимальности¹⁰. Существуют разные способы выбора решения из множества возможных Парето-оптимальных [36], например, теория арбитражных схем, метод целевого программирования и т.д. Часто решение рассматриваемой задачи осуществляется с участием эксперта (или группы экспертов), когда решения принимаются на основе представленной информации¹¹.

На практике решение задач проектирования перевозок подразделяется на следующие этапы¹²:

- дизайн маршрутной сети (network structure design) заключается в выборе принципа формирования маршрутной сети, определении условий их применения, параметров эффективности и качества транспортного обслуживания;

- анализ и в необходимых случаях корректировка существующих маршрутов, при проектировании маршрутов осуществляется определение маршрутов, которые априорно включаются в маршрутную систему;

- формирование множества допустимых маршрутов, отвечающих критериям качества, эффективности и принципам дизайна;

- расчет оптимальной программы перевозок посредством эвристической процедуры направленного перебора вариантов, которые формируются путем варьирования распределения транспортных ресурсов между маршрутами;

- экспертный анализ полученного на предыдущем этапе решения задачи, разработка и оценка возможных направлений совершенствования проекта перевозок по предложениям экспертов, которые обеспечивают учет трудно формализуемых факторов, таких, например, как расположение социальных объектов.

7. Практическая реализация

Для реализации описанной методики РАР разработано программное обеспечение с применением реляционной СУБД MS SQL Server.

Оценка эффективности данной методики выполнена с использованием пассажирских корреспонденций среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных в результате обработки валидаций электронных проездных билетов [29, 30]. Фрагмент матрицы пассажирских корреспонденций дан в таблице 1.

Из системы диспетчерского управления общественным транспортом г. Красноярска (МКУ «Красноярскгортранс») в формате СУБД MS SQL Server получена следующая информация:

- список остановочных пунктов (таблица 2);
- описание маршрутной сети (таблица 3);
- список подвижного состава (таблица 4).

На рисунке 8 приведен интерфейс разработанной программы, которая осуществляет:

- варьирование распределения транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами на транспортной сети в соответствии с определенным алгоритмом;

- решение задачи РАР (формирование поездов для заданных пассажирских корреспонденций);

- расчет программы перевозок (параметров транспортного предложения).

В левой области интерфейса дано описание имеющихся маршрутов, в правой – результаты расчета. Для каждого маршрута и транспортного предложения в целом определяются показатели (28) – (35).

Полученные результаты представляются в табличном (см. рисунок 8) и графическом (рисунки 9, 10) виде.

¹⁰ Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.

¹¹ Jürgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen та Roman Slowinski. Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches (Lecture Notes in Computer Science) (англ.). Springer. ISBN 3-540-88907-8.

¹² Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

Таблица 1

Матрица пассажирских корреспонденций (фрагмент),
где Id – идентификатор, IdB – пункт начала, IdE – пункт завершения,
NbPs – число пассажиров, PsKm – пассажиро-километры,
Lmid – средняя дальность поездки
Источник: составлено авторами.

Table 1

The matrix of passenger correspondence (fragment),
where: Id – identifier, IdB – starting point, IdE – ending point,
NBPs – number of passengers, PsKm – passenger-kilometers,
Lmid – average distance of the trip
Source: compiled by the authors.

Id	IdB	IdE	NbPs	PsKm	Lmid
218635	119	9	9,02	19,61	2,17
218636	203	1808	0,20	4,29	21,20
218637	359	416	3,14	16,91	5,39
218638	418	922	0,65	13,88	21,41
218639	336	1101	0,88	3,62	4,11
218640	233	742	5,49	57,95	10,56
218641	46	196	3,33	39,86	11,96
218642	441	214	2,53	56,74	22,42
218643	663	605	1,25	4,57	3,67
218644	526	557	1,69	17,28	10,23
218645	930	775	10,64	112,51	10,58
218646	284	22	1,21	6,76	5,59
218647	23	689	0,32	5,11	15,76
218648	258	400	2,86	35,50	12,40
218649	912	782	3,00	10,86	3,62
218650	999	71	8,98	87,89	9,79
218651	956	397	0,95	21,57	22,73

Таблица 2

Фрагмент списка остановочных пунктов,
где RegNum – идентификатор; Title – наименование;
Latitude, Longitude – координаты (широта и долгота)
Источник: составлено авторами.

Table 2

A fragment of the stopping points list,
where RegNum– identifier; Title – name;
Latitude, Longitude – coordinates (latitude and longitude)
Source: compiled by the authors.

RegNum	Title	Latitude	Longitude
2	о. Отдыха	55,996706756426	92,878745656452
3	Агентство Аэрофлота	55,990233384589	92,886525522886
4	Детская поликлиника (ул. Гладкова)	55,988051346560	92,879488525104
5	Детская поликлиника (ул. Гладкова)	55,987765680551	92,878699955653
6	ул. Соколовская	56,113535868224	92,907548557959
7	ул. 2-я Брянская	56,041203799646	92,859010984464
8	ул. Матросова	55,987065695913	92,886848674279
9	ул. Матросова	55,987321296562	92,887320743065
10	Предмостная площадь	55,991779660585	92,887796098675
11	Студенческая (ул. Семафорная)	55,983906787650	92,878906828619

Таблица 3

Описание маршрутной сети (фрагмент),
 где Nb – номер маршрута; Dir – направление движения (А – прямое, В – обратное);
 NbRec – номер по порядку; Id – идентификатор остановки;
 L – длина перегона; Lsum – расстояние от начала маршрута
 Источник: составлено авторами.

Table 3

Description of the route network (fragment),
 where: Nb – route number; Dir – direction of movement (A – forward, B – reverse);
 NbRec – number in order; Id – stop ID;
 L – length of the stretch; Lsum – distance from the beginning of the route
 Source: compiled by the authors.

Nb	Dir	NbRec	Id	L	Lsum
4тр	A	2	213	0,42	0,42
4тр	A	3	211	0,44	0,86
4тр	A	4	209	0,28	1,14
4тр	A	5	207	0,64	1,79
4тр	A	6	205	0,46	2,24
4тр	A	7	203	0,52	2,76
4тр	A	8	201	0,54	3,30
4тр	A	9	199	0,56	3,86

Таблица 4

Список подвижного состава (фрагмент),
 где StateNumb – регистрационный номер; Region – номер региона;
 TransportType – тип транспорта; Model – модель; CapacityPerson – вместимость
 Источник: составлено авторами.

Table 4

Road transport vehicles (fragment), where: StateNumb – registration number; Region – region number;
 Transport Type – type of transport; Model – model; Capacity Person – availability
 Source: compiled by the authors.

StateNumb	Region	TransportType	Model	Capacity-Person
K 129 OP	124	Автобус	МАЗ 103	96
B 479 OH	124	Автобус	НефАЗ	114
K 137 OP	124	Автобус	МАЗ 206	72
A 822 MP	124	Автобус	МАЗ 103	96
K 412 OP	124	Автобус	ПАЗ 320435 NEXT	70
K 431 OP	124	Автобус	ПАЗ 320435 NEXT	70

Расчет оптимальной программы перевозок (лаборатория транспортного моделирования СВУ)

Маршруты										Результаты														
Nb	Vc	CIA	TmRt	a	NmTsp	La	Lb			Nb	AcI	a	NbPs	PsKm	L	PicKm	Kv	Ps_Km	Anb	NbPsTf	PsKmTf	Ltr	Ttr	NbTr
10	18,0	1	10	4	Автобус	22,7	22,8			10	1	4	9049,2	42235,2	793,9	79392,6	0,53	11,40	5,3	0,0	0,0	45,5	3,0	17,44
11	18,0	1	10	4	Автобус	10,3	10,3			11	1	4	5793,1	24953,7	1217,6	121758,7	0,20	4,76	9,7	0,0	0,0	20,7	1,6	58,95
11r	20,0	5	10	4	Троллейбус	0,0	0,0			12	1	4	12991,7	86038,9	946,7	94669,1	0,91	13,72	5,1	0,0	0,0	57,7	3,1	16,41
12	22,0	1	10	4	Автобус	28,8	28,9			13r	5	4	5362,4	18348,6	333,1	37971,8	0,48	16,10	2,8	0,0	0,0	16,9	1,4	19,67
12a	18,0	2	10	4	Автобус	0,0	0,0			14	2	4	7077,2	26916,5	976,5	73240,7	0,37	7,25	6,9	0,0	0,0	32,6	2,3	29,96
13	18,0	1	10	5	Автобус	0,0	0,0			18	1	4	2158,7	7307,9	973,1	97307,0	0,08	2,22	6,9	0,0	0,0	32,9	2,3	29,93
13r	14,4	5	10	4	Троллейбус	16,9	0,0			18c	1	4	3369,5	13345,2	934,3	93426,1	0,14	3,61	6,5	0,0	0,0	35,2	2,5	26,55
14	18,0	2	10	4	Троллейбус	16,5	16,1			19	1	4	15544,1	93369,9	709,2	70922,3	1,32	21,92	4,6	0,7	0,6	53,6	3,5	13,24
										2	1	5	24880,5	166474,6	902,0	90204,8	1,85	27,58	5,9	0,0	0,0	52,3	3,4	17,25
										20	4	4	12582,6	74158,6	728,3	30587,7	2,42	17,28	4,8	0,0	0,0	51,6	3,4	14,11
										22	3	4	1447,7	4278,3	1132,7	56635,5	0,08	1,28	8,6	0,0	0,0	24,5	1,9	46,32
										23	1	4	17913,1	158458,6	639,1	63912,6	2,48	28,03	4,1	0,0	0,0	61,8	3,9	10,34
										26	1	4	6096,2	24874,2	961,7	96166,5	0,26	6,34	6,8	0,0	0,0	33,5	2,4	28,72
										27	3	4	5476,9	33972,5	882,5	44123,4	0,77	6,21	6,0	0,0	0,0	38,6	2,6	22,83
										3	2	5	17145,6	94898,2	877,9	65844,9	1,44	19,53	5,7	0,9	0,7	54,3	3,5	16,16
										31	1	4	3850,5	25265,1	851,5	85151,9	0,30	4,52	5,8	0,0	0,0	40,9	2,8	20,82
										32	1	4	7774,5	33727,0	927,0	92704,3	0,36	8,39	6,5	0,0	0,0	35,7	2,5	26,03
										36	3	4	5929,1	26235,4	1121,8	56088,8	0,47	5,29	8,5	0,0	0,0	25,0	1,9	44,98
										37	1	5	8067,3	41173,4	1164,1	116408,4	0,35	6,93	8,1	0,8	0,6	35,4	2,5	32,96
										38	4	4	13887,2	54844,5	983,6	41310,2	1,33	14,12	7,0	0,0	0,0	32,2	2,3	30,56
										40	1	4	2587,1	8801,1	1186,9	118686,2	0,07	2,18	8,5	0,0	0,0	26,2	1,9	45,26
										40a	1	4	3091,0	11570,2	1078,2	107823,4	0,11	2,87	8,0	0,0	0,0	27,1	2,0	39,80
										40c	1	4	6965,0	26947,4	892,6	89263,7	0,30	7,80	6,1	0,0	0,0	38,0	2,6	23,57
										43	1	4	19600,7	145877,7	749,1	74905,8	1,95	26,17	4,9	0,0	0,0	49,6	3,3	15,11

Рисунок 8 – Интерфейс программы расчета параметров транспортного предложения
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Interface of the program for calculating the parameters of the transport offer
Source: compiled by the authors.

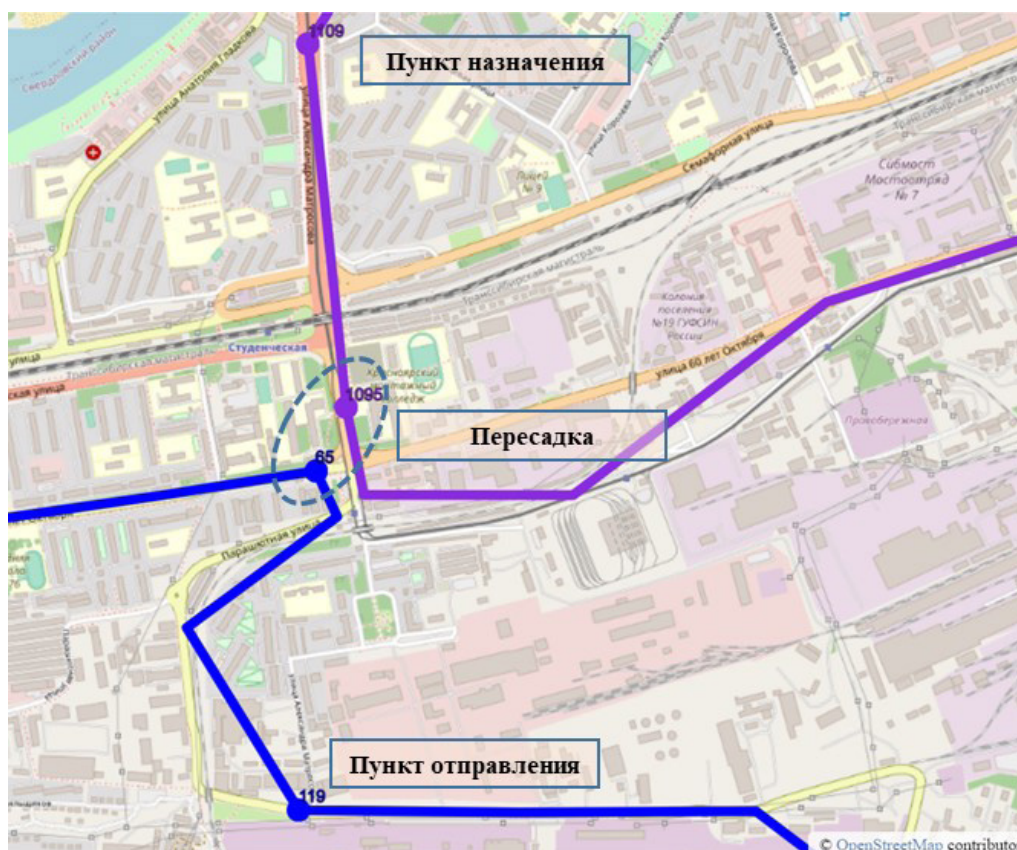


Рисунок 9 – Схема поездки для корреспонденции
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Trip scheme for correspondence
Source: compiled by the authors.

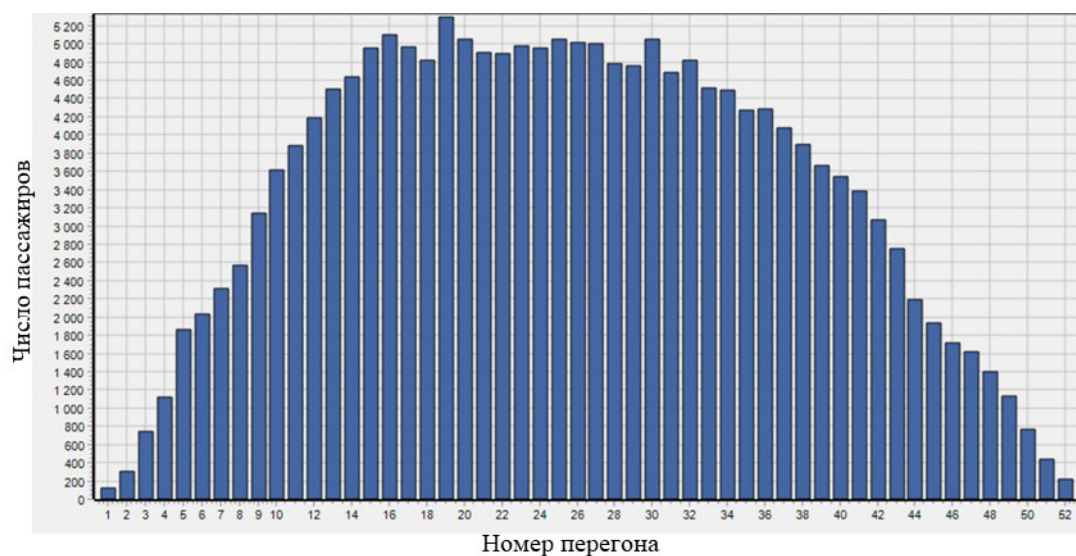


Рисунок 10 – Эпюра расчетных пассажирских потоков по маршруту
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Plot of estimated passenger flows along the route
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Процесс планирования общественного транспорта подразделяется на ряд задач стратегического, тактического и оперативного уровней, к которым относятся [1] разработка системы маршрутов, установление интенсивности движения по маршрутам, проектирование структуры парка подвижного состава, распределение имеющегося парка по маршрутам, определение требуемого объема субсидирования и др.

2. На основании разработанной многокритериальной математической модели задачи проектирования перевозок решаются путем распределения ограниченных или неограниченных транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые могут быть наложены данные ограничения.

3. Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP [2], а также с привлечением экспертов.

4. Транспортный спрос задается матрицей пассажирских корреспонденций, сформированной за весь период движения транспорта в будний день, в которой учтены все пассажирские потоки по маршрутной сети, а не только периоды наибольшей интенсивности перевозок.

5. Расчет параметров транспортного предложения в процессе решения задач проектирования перевозок осуществляется по результатам распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР), что является сложной нерешенной до настоящего времени проблемой [2]. Изложенная в статье методика РАР основана на моделировании стратегии пассажира, учитывающей время ожидания транспорта, непрямолинейность маршрута посредством эмпирической модели деления спроса по длине поездок, предпочтения пассажиров видов транспорта, возможное перераспределение пассажирских потоков между остановочными пунктами сети, расположенными в пределах пешеходной доступности.

6. Разработанная математическая модель программы перевозок описывает параметры эффективности и качества транспортного предложения, а также необходимые материальные и финансовые ресурсы.

7. Практическая реализация описанной методики РАР осуществлена посредством разработанного программного обеспечения с применением реляционной СУБД. Транспортный спрос описан матрицей пассажирских корреспонденций среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных в результате обработки валидаций электронных проездных билетов городского пассажирского транспорта г. Красноярска. Показана эффективность раз-

работанной методики РАР для решения задач проектирования перевозок общественным транспортом.

8. Направления дальнейших исследований:

- анализ эффективности существующих методов формирования множества допустимых маршрутов при решении задачи проектирования маршрутной сети общественного транспорта;
- анализ факторов выбора пассажирами видов транспорта;
- формальное описание задач проектирования перевозок общественным транспортом (критериев оптимальности и ограничений);
- разработка, оценка эффективности алгоритмов решения данных задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ceder A. Bus network design / A. Ceder, N. H. M. Wilson // *Transp. Res. Part B: Methodol.* 1986. Vol. 20, Iss. 4. P. 331 - 344. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(86)90047-0.
2. Durán-Micco, J. A survey on the transit network design and frequency setting problem / J. Durán-Micco, P. Vansteenwegen // *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155 - 190. URL: DOI: 10.1007/s12469-021-00284-y.
3. Guihaire V. Transit network design and scheduling: A global review / V. Guihaire, J-K. Hao // *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.
4. Desaulniers G. Public transit / G. Desaulniers, M. Hickman // *Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation.* 2007. Vol. 14. P. 69–120.
5. Transit Capacity and Quality of Service Manual // TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report, 1999. P. 62.
6. Van Nes R. Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach / R. Van Nes // TRAIL Thesis Series T2002/5, DUP, Delft University, the Netherlands, 2002.
7. A review of urban transportation network design problems / R. Z. Farahani, E. Miandoabchi, W. Y. Szeto, H. Rashidi // *European Journal of Operational Research.* 2013. Vol. 229, Iss. 2. P. 81- 302. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.
8. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey / F. López-Ramos // *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.
9. Liu Y. Transit users' route-choice modelling in transit assignment: a review / Y. Liu, J. Bunker, L. Ferreira // *Transp. Res.* 2010. Vol. 30. P. 753–769. URL: DOI: 10.1080/01441641003744261.
10. Modelling public transport route choice, with multiple access and egress modes / T. Brands, E. de Romph, T. Veitch, J. Cook // *Transport Res Proc.* 2014. Vol. 1. P. 12–23 (моделирование мультимодальной сети).
11. Самойлов Д. С. Принципы построения и координации маршрутов городского пассажирского транспорта. М.: ОНТИ АКХ им. К. Д. Памфилова, 1981. 74 с.
12. Бурлуцкий А. А. Анализ опыта формирования оптимальных маршрутных схем городского пассажирского транспорта // *Вестник ТГАСУ.* 2013. № 2. С. 371–380.
13. Мартынова Ю. А. Анализ опыта проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 2 (21). С. 1–10.
14. Мочалин С. М., Колебер Ю. А. Перспективы развития методов оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // *Вестник СибАДИ.* 2019. Т. 16, № 3. С. 241–255. URL: DOI: 10.26518/2071-7296-2019-3-241-255.
15. Бронштейн Л. А., Ларионов В. С., Нелидов И. А. Организация движения городского пассажирского транспорта // Труды НИИАТ Моссовета. М. Л.: Изд-во НКХ РСФСР, 1940. 252 с.
16. Яворский В. В., Баймульдин М. К., Аксенов С. Ш. Модель анализа обслуживания и проектирования сети маршрутов городского пассажирского транспорта // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2015. № 2. Ч. 2. С. 208–213.
17. Jánošíková, L. Design of urban public transport lines as a multiple criteria optimisation problem / L. Jánošíková, M. Blatoň, D. Teichmann // *WIT Transactions on The Built Environment. WITPress,* 2010. Vol. 111. URL: DOI: 10.2495/UT100131.
18. Хрущев М. В. Методы общей и локальной маршрутизации автобусного транспорта в городах: монография. М.: ГУУ, 1999. 168 с.
19. A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm / L. M. Martinez, J. M. Viegas, E. A. Silva // *Transportation.* 2009. Vol. 36. P. 581–599.
20. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access / A. T. Murray // *Annals of Operations Research.* 2003. Vol. 123. P. 143–156.
21. Яценко С. А. Анализ методик расчета потребности автобусов для городских маршрутов // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2016. № 5. С. 196–202.
22. Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D. C., USA, 2000. 1134 p.
23. A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design / C. Wang, Z. Ye, W. Wang // *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 12154 - 12167. URL: DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2966008.
24. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation / P. Manser, H. Becker, S. Hörl, K. W. Axhausen // *Transp Res Part A: Policy. Pract.* 2020. 137. P. 1–15. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.011.
25. A particle swarm optimization algorithm for the solution of the transit network design problem / E. Cipriani, G. Fusco, S. M. Patella, M. Petrelli // *Smart Cities.* 2020. Vol. 3, Iss. 2. P. 541–555.

26. Optimising bus routes with fixed terminal nodes: comparing hyper-heuristics with NSGAII on realistic transportation networks / L. Ahmed, P. Heyken-Soares, C. Mumford, Y. Mao // In: Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference / Association for computing machinery. Prague, Czech Republic, 2019. P. 1102–1110.

27. Multi-objective rapid transit network design with modal competition: the case of Concepción, Chile / G. Gutiérrez-Jarpa, G. Laporte, V. Marianov, L. Moccia // *ComputOper Res.* 2017. Vol. 78, Iss. 6. P. 27 - 43. URL: DOI: 10.1016/j.cor.2016.08.009.

28. Nielsen, G. Network design for public transport success—theory and examples / G. Nielsen, T. Lange. Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo, 2008. 30 p.

29. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Методика определения корреспонденций пассажиров общественного транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов // *Вестник СибАДИ.* 2022. Т. 19, № 3. С. 370–397. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>.

30. Fadeev A. I. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport / A. I. Fadeev, S. Alhusseini // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1061 012001. 2021. P. 9.

31. Ortuzar, J. D. Modelling transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. — John Wiley & Sons, 2011. 586 p. URL: DOI:10.1002/9781119993308.

32. A review of urban transportation network design problems / R. Z. Farahani, E. Miandoabchi, W. Y. Szeto, H. Rashidi // *Eur. J Oper. Res.* 2013. Vol. 229. P. 281 - 302. URL: DOI: 10.1016/j.ejor.2013.01.001.

33. Spiess, H. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks / H. Spiess, M. Florian // *Transp. ResPartB: Methodol.* 1989. Vol. 23, Iss. 2. P. 83 - 102. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(89) 90034-9.

34. Корягин М. Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. Новосибирск: Наука, 2011. 140 с.

35. TCRP Report 88: A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System. Kittelson& Associates, Inc. et al, 2003.

36. Mauttone, A. A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem / A. Mauttone, M. E. Urquhart // *Public Transp.* 2009. Vol. 1. P. 253 - 273. URL: <https://doi.org/10.1007/s12469-010-0016-7>.

REFERENCES

1. Ceder A. Bus network design / A. Ceder, N. H. M. Wilson. *Transp. Res. Part B: Methodol.* 1986. Vol. 20, Iss. 4. P. 331–344. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(86)90047-0.

2. Durán-Micco, J. A survey on the transit network design and frequency setting problem / J. Durán-Micco, P. Vansteenwegen. *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155 - 190. URL: DOI: 10.1007/s12469-021-00284-y.

3. Guihaire V. Transit network design and scheduling: A global review / V. Guihaire, J.-K. Hao. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.

4. Desaulniers G. Public transit / G. Desaulniers, M. Hickman. *Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation.* 2007. Vol. 14. P. 69 – 120.

5. Transit Capacity and Quality of Service Manual. *TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report*, 1999. P. 62.

6. Van Nes R. Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach. *TRAIL Thesis Series T2002/5*, DUP, Delft University, the Netherlands, 2002.

7. Farahani R. Z., Miandoabchi E., Szeto W. Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research.* 2013. Vol. 229, Iss. 2. P. 81–302. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

8. López-Ramos, F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey. *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.

9. Liu Y., Bunker J., Ferreira L. Transit users' route-choice modelling in transit assignment: a review. *Transp. Rev.* 2010. Vol. 30. P. 753–769. URL: DOI: 10.1080/014416410037442 61.

10. Modelling public transport route choice, with multiple access and egress modes. T. Brands, E. de Romph, T. Veitch, J. Cook. *Transport Res Proc.* 2014. Vol. 1. P. 12–23 (modeling of a multimodal network).

11. Samojlov D. S. Principy postroeniya i koordinacii marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta [Principles of construction and coordination of routes of urban passenger transport]. Moscow, ONTI AKH im. K. D. Pamfilova, 1981: 74. (In Russ.)

12. Burluckij A. A. Analiz opyta formirovaniya optimal'nyh marshrutnyh shem gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of the experience of forming optimal route schemes of urban passenger transport]. *Vestnik TGASU.* 2013; 2: 371 – 380. (In Russ.)

13. Martynova Ju. A. Analiz opyta proektirovaniya racional'nyh marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of the experience of designing rational route networks of urban passenger transport]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie».* 2014; 2 (21): 1 – 10. (In Russ.)

14. Mochalin S.M., Koleber J.A. Urban passenger transport road networks: prospects of methods' optimization. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2019; 16 (3): 241 - 255. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-241-255>

15. Bronshtejn L. A., Larionov V. S., Nelidov I. A. Organizacija dvizheniya gorodskogo passazhirskogo transporta [Organization of urban passenger transport]. *Trudy NIIT Mossovet.* Moscow - L.: Izd-vo NKKH RSFSR, 1940: 252. (In Russ.)

16. Javorskij V. V., Bajmul'din M. K., Aksenov S. Sh. Model' analiza obsluzhivaniya i proektirovaniya seti marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta [Model of service analysis and design of urban passenger transport route network]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij.* 2015; 2. Ch. 2: 208–213. (In Russ.)

17. Jánošíková, L., Blatoň M., Teichmann D. Design of urban public transport lines as a multiple criteria optimisation problem. *WIT Transactions on The Built Environment.* WIT Press, 2010; Vol. 111. URL: DOI: 10.2495/UT100131.

18. Hrushhev M. V. Metody obshhej i lokal'noj marshrutizacii avtobusnogo transporta v gorodah: mono-grafija [Methods of general and local routing of bus transport in cities: monograph]. Moscow, GUU, 1999:168. (In Russ.)

19. Martinez L. M., Viegas J. M., Silva E. A. A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm. *Transportation*. 2009; Vol. 36: 581 – 599.

20. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access. *Annals of Operations Research*. 2003; Vol. 123: 143 – 156.

21. Jacenko S. A. Analiz metodik rascheta potrebnosti avtobusov dlja gorodskih marshrutov [Analysis of methods for calculating the needs of buses for urban routes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnickeskogo universiteta*. 2016; 5: 196 – 202. (In Russ.)

22. Highway Capacity Manual 2000. *Transportation Research Board, National Research Council*. Washington, D. C., USA, 2000. 1134 p.

23. A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design / C. Wang, Z. Ye, W. Wang. *IEEE Access*. 2020; Vol. 8: 12154 – 12167. URL: DOI: 10.1109/ACCESS.2020.29660 08.

24. Manser P., Becker H., Hörl S., Axhausen K. W. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation. *Transp Res Part A: Policy*. 2020; Pract. 137: 1 – 15. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.011.

25. Cipriani E., Fusco G., Patella S. M., Petrelli M. A particle swarm optimization algorithm for the solution of the transit network design problem. *Smart Cities*. 2020; Vol. 3, Iss. 2: 541 – 555.

26. Ahmed L., Heyken-Soares P., Mumford C., Mao Y. Optimising bus routes with fixed terminal nodes: comparing hyper-heuristics with NSGAII on realistic transportation networks. In: Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference. *Association for computing machinery*. Prague, Czech Republic, 2019. P. 1102–1110.

27. Gutiérrez-Jarpa G., Laporte G., Marianov V., Moccia L. Multi-objective rapid transit network design with modal competition: the case of Concepción, Chile. *Comput Oper Res*. 2017; Vol. 78, Iss. 6: P. 27–43. URL: DOI: 10.1016/j.cor.2016.08.009.

28. Nielsen G., Lange T. Network design for public transport success—theory and examples. *Norwegian Ministry of Transport and Communications*, Oslo, 2008. 30 p.

29. Fadeev A.I., Alhusseini S. Methodology for determining passengers correspondence by public transport from electronic tickets validation operations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (3): 370-397. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>

30. Fadeev A. I., Alhusseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1061 012001. 2021. P. 9.

31. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. John Wiley & Sons, 2011: 586. URL: DOI:10.1002/9781119993308.

32. Farahani R. Z., Miandoabchi E., Szeto W. Y., Rashidi H. A review of urban transportation network

design problems. *Eur. J Oper. Res*. 2013; Vol. 229: 281–302. URL: DOI: 10.1016/j.ejor.2013.01.001.

33. Spiess H., Florian M. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transp. Res Part B: Methodol.* 1989. Vol. 23, Iss. 2. P. 83 – 102. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(89) 90034-9.

34. Korjagin M. E. Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v usloviyah konflikta interesov [Equilibrium models of the urban passenger transport system in conditions of conflict of interests]. Novosibirsk: Nauka, 2011:140. (In Russ.)

35. TCRP Report 88: A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System. Kittelson& Associates, Inc. et al, 2003.

36. Mauttone A., Urquhart M. E. A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem. *Public Transp*. 2009; Vol. 1: 253–273. URL: <https://doi.org/10.1007/s12469-010-0016-7>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А. И. Постановка задачи, разработка многокритериальной математической модели проектирования перевозок городским общественным транспортом, методики распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети, математической модели программы перевозок, программного обеспечения, формулирование заключения.

Ильянков А. М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

Укадеров В. В. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников, участие в подготовке исходных данных и расчетах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeyev . Problem statement, a multi-criteria mathematical model for the design of urban public transport, methods of distribution of passenger correspondence on the route network, a mathematical model of the transportation program, software development, conclusion statement.

Aleksei M. Ilyankov. Initial data and calculations preparation, literary sources review.

Vitalii V. Ukaderov. Issue status analysis, literary sources review, initial data and calculations preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта, SPIN-код: 1304-7849.

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта.

Укадеров Виталий Владимирович – аспирант кафедры транспорта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Dr of Sci., Professor of the Transport Department, SPIN-код: 1304-7849.

Aleksei M. Ilyankov – Postgraduate student of the Transport Department.

Vitaliy V. Ukaderov – Postgraduate student of the Transport Department.