

Научная статья
УДК 656.02
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
EDN: WMBMDI



УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПРЕДЛОЖЕНИЕМ НА РЕГУЛЯРНЫХ МЕЖДУГОРОДНЫХ АВТОБУСНЫХ ЛИНИЯХ

А. И. Фадеев*, А. М. Ильянков

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>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Междугородный общественный транспорт обеспечивает удовлетворение мобильности не только пассажиров дальнего следования, но и жителей малых населенных пунктов, расположенных на регулярной линии. Между такими пунктами зачастую отсутствуют другие виды регулярного сообщения общественного транспорта. Особая роль общественного транспорта заключается в обслуживании населения, не владеющего личным автомобилем. Растущий спрос на междугородные автобусные линии усиливает потребность в эффективном проектировании перевозок, чтобы обеспечить конкурентоспособные услуги общественного транспорта и минимизировать расходы перевозчиков.

Материалы и методы. В статье приведена математическая модель планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, проходящей через населенные пункты с различным числом жителей. Целевая функция направлена на формирование транспортного предложения, удовлетворяющего потенциальный спрос, для определения которого применен гравитационный метод.

Проведенный анализ пассажирских потоков показывает, что на большинстве рейсов вместимость подвижного состава используется недостаточно эффективно.

Результаты. Путем сравнения потенциального числа пассажиров рейсов с фактическим показано, что регулирование транспортного предложения с учетом спроса позволит существенно повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения.

Обсуждение и заключение. На основании данных за 2022 г., полученных из системы бронирования, обслуживающей регулярную автобусную линию, показано, что при введении регулирования ожидаемое повышение эффективности транспортного предложения составляет до 25%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общественный транспорт, планирование общественного транспорта, междугородная автобусная линия, транспортный спрос, матрица пассажирских корреспонденций, транспортное предложение

Статья поступила в редакцию 18.07.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: А. И. Фадеев, А. М. Ильянков Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 632-648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>

© Фадеев А. И., Ильянков А. М., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
EDN: WMBMDI

TRANSPORT SUPPLY MANAGEMENT ON REGULAR INTERCITY BUS LINES

Aleksandr I. Fadeyev*, Aleksei M. Ilyankov

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>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Intercity public transport ensures the satisfaction of mobility not only for long-distance passengers, but also for residents of small settlements located on a regular line. There are often no other types of regular public transport between such settlements. The growing demand for intercity bus transportation increases the need for efficient transportation design in order to provide competitive public transport services and minimize the costs of carriers.

Materials and methods. The article presents a mathematical model of transportation planning on an intercity regular bus line passing through settlements with different numbers of inhabitants. The objective function is aimed at forming a transport supply that satisfies potential demand, for which the gravitational method is used to determine. The analysis of the unevenness of passenger flows by months of the year, days of the week and flights shows that on most flights the capacity of the rolling stock is not used efficiently enough.

Results. By comparing the potential number of passengers on flights with the actual one, it is shown that flexible regulation of transport supply taking into account demand will significantly improve the quality and efficiency of public transport services.

Discussion and conclusion. Based on the data for 2022 of the booking system serving the regular bus line, it is shown that with the introduction of flexible regulation of the transport offer, the expected increase in passenger turnover will be about 25%.

KEYWORDS: public transport, public transport planning, intercity bus line, transport demand, passenger correspondence matrix, transport supply

The article was submitted 18.07.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Transport supply management on regular intercity bus lines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 632-648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>

© Fadeyev A. I., Ilyankov A. M., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общественный транспорт в целом и междугородный в частности имеет большое социально-экономическое значение: он обеспечивает удовлетворение мобильности населения, снижение использования личных автомобилей и отрицательного воздействия на окружающую среду. Особая роль общественного транспорта (в том числе междугородного) заключается в обслуживании населения, не имеющего личного автомобиля [1].

Растущий спрос на междугородные автобусные перевозки усиливает потребность в эффективном управлении транспортным процессом, чтобы повысить качество услуг общественного транспорта и минимизировать операторские расходы.

В общих чертах роль транспортного планирования и управления заключается в обеспечении удовлетворения определенного пассажирского спроса, характеризующегося пространственной и временной неравномерностью¹[2]. Используемая транспортная система имеет конечную пропускную способность.

Междугородные регулярные автобусные линии проходят через населенные пункты с различным числом жителей, в которых оборудованы остановочные пункты для посадки-высадки пассажиров. На автобусной линии организовывается определенное число междугородных маршрутов, которые пересекаются с некоторыми пригородными и городскими маршрутами через общие остановочные пункты или остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности. Городские и пригородные перевозки общественным транспортом осуществляются при наличии определенного уровня спроса, необходимого для функционирования соответствующего маршрута. В малых населенных пунктах из-за низкой интенсивности пассажирских потоков зачастую отсутствует общественный транспорт, кроме междугородных маршрутов автобусной линии.

Междугородные автобусные линии конкурируют с другими видами магистрального

транспорта, например, железнодорожным. Кроме этого, мобильность населения может быть удовлетворена личным транспортом и посредством карпулинга². Конкуренция ограничивает возможность перевозчиков максимизировать прибыль через повышение тарифов, актуальной является задача сохранения доли рынка³.

Предложение транспортных услуг должно быть сформировано таким образом, чтобы оно в наибольшей степени соответствовало спросу [2]. В данной работе под транспортным предложением понимаются условия транспортного обслуживания, доступные пассажиру для удовлетворения определенного транспортного спроса.

Целью перевозчиков автобусной линии является выполнение максимально возможной транспортной работы, объем которой определяет доходы (пассажирские тарифы устанавливаются в зависимости от расстояния перевозки).

В работе [3] рассматривается задача распределения транспортной работы между перевозчиками междугородной маршрутной сети, решение которой предлагается осуществлять путем создания единой системы эксплуатации. Очевидно, что данное предложение не вполне реализуемо даже на междугородной сети. Кроме этого, следует учитывать взаимное влияние пригородных, междугородных и городских маршрутов. Зачастую пригородные пассажиры предпочитают более комфортабельные поездки на междугородном автобусе. Для перевозчиков это не всегда приемлемо, потому что заполнение междугородных автобусов на коротких участках может ограничить обслуживание междугородных пассажиров и сделать нерентабельной работу маршрута.

С другой стороны, в настоящее время существует тенденция использования междугородного общественного транспорта для удовлетворения мобильности жителей малых населенных пунктов, расположенных на регулярной линии, независимо от расстояния поездок [4, 5]. В сельских районах весь общественный транспорт (за исключением специального

¹ Копылова Е. В. Оптимизация пригородных пассажирских перевозок на основе организации пассажиропотока: дис. ... д-ра техн. наук: 2.9.4. М., 2022.

² Карпулинг (англ. car «автомобиль» + pool «объединение») или райдшэринг (англ. ride «поездка» + share «делиться») – совместное использование частного автомобиля с помощью онлайн-сервисов поиска попутчиков. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 05:10:2023)

³ Постников В. П. Управление тарифообразованием пригородного железнодорожного транспорта на основе многокритериальной оптимизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2019. 24 с.

обслуживания, например, перевозок школьников) зачастую базируется на региональных автобусных линиях [6]. На практике вместо расширения маршрутов между небольшими сельскими районами транспортное обслуживание населения все больше переключается на развитие междугородных маршрутов [7]. Перевозчики могут быть заинтересованы в таких пассажирах, исходя из соображения сохранения доли рынка или через договорные отношения с органами государственного управления или местного самоуправления.

Планирование междугородного общественного транспорта требует оценки различных факторов, оказывающих влияние на транспортную систему, предпочтений пассажиров, операторов и общества в целом [5]. Для решения данной задачи большое значение имеет прогнозирование пассажирских потоков и определение спроса на рынке⁴ [8]. В данном аспекте в работе [9] рассмотрена задача расчета на базе АСУ «Экспресс» перспективных объемов отправок пассажиров и величин недостатка (избытка), предложенных к продаже мест в сегменте железнодорожного сообщения дальнего сообщения.

В области совершенствования перевозок пассажиров широкий круг исследований проводится по проектированию маршрутов различных видов транспорта, определению интервалов (частоты) движения и формированию расписаний перевозок [10, 11, 12, 13]. В большинстве работ эти исследования выполняются, как правило, в контексте городских перевозок (например, [14]), в то время как, несмотря на наличие общих аспектов, данная задача для междугородного транспорта имеет существенные отличия.

Кроме перечисленных вопросов для междугородных линий актуальным является планирование транспортного предложения с учетом параметров спроса, а также взаимодействия междугородных, городских и пригородных маршрутов. Данная задача решается посредством разработки оперативных стратегий управления транспортным предложением [15, 16]. При этом применяются следующие подходы:

– разделение остановочных пунктов маршрутов разных видов перевозок (городских, пригородных и междугородных), таким образом,

чтобы сегментировать транспортный спрос; при этом следует учитывать взаимное влияние маршрутов через остановочные пункты, находящиеся в пешеходной доступности;

– исключение транспортного предложения для перевозок между определенными остановочными пунктами (например, для перевозок по междугородному маршруту в пределах городской черты);

– варьирование остановочными пунктами рейса в зависимости от транспортного спроса (неодинаковый перечень остановочных пунктов разных рейсов маршрута);

– варьирование пассажирскими тарифами в зависимости от загрузки рейсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи. Междугородная регулярная автобусная линия проходит через населенные пункты с различным числом жителей. По маршрутам линии выполняется рейсов в прямом и обратном направлениях. Условия задачи:

$$\sum_s \sum_{ij} p_{ij}^s T_{ij} l_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$Q_i^s \leq q^s; \forall s = \overline{1, r}; \forall i \in W, \quad (2)$$

где: T_{ij} – потенциальный транспортный спрос между пунктами ij ;

l_{ij} – расстояние между пунктами ij ;

p_{ij}^s – вероятность обслуживания пассажирской корреспонденции ij s -м рейсом;

Q_i^s – число пассажиров s -го рейса при отправлении из пункта i ;

q^s – номинальная вместимость транспортного средства, выполняющего s -й рейс;

W – множество остановочных пунктов автобусной линии.

Выражение (1) обуславливает получение максимальной транспортной работы, что обеспечивает наибольшую эффективность перевозок и позволяет обслуживать пассажиров по конкурентоспособным тарифам, которые, как упоминалось выше, зависят от расстояния перевозки.

⁴ Корягин М. Е., Чистяков А. С. Определение параметров основных факторов логит-функции, влияющих на вероятность выбора пассажиром способа передвижения // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. тр. / Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов н/д, 2019. С. 157–160.

2. Для определения потенциального транспортного спроса широко используется гравитационная модель, в соответствии с которой степень взаимодействия населенных пунктов или транспортных районов пропорциональна произведению численности населения и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними⁵. Вероятно, первое строгое использование гравитационной модели было дано в работе [17] для описания поездок за покупками и зон водосбора между городами в регионе. В простейшей формулировке модель имеет следующий вид:

$$T_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{l_{ij}^2}, \quad (3)$$

где P_i, P_j – численность жителей населенного пункта i, j соответственно;

l_{ij} – расстояние между населенными пунктами ij ;

α – постоянная, определяемая в результате калибровки.

В дальнейшем модель была усовершенствована [2]: вместо числа жителей введены параметры числа прибытия-отправления (O_i и D_j), вместо квадрата расстояния применен показатель степени n , который может быть как целым, так и дробным числом; в различных исследованиях тестировались его значения от 0,6 до 3,5 [18, 19]. Модель была дополнительно обобщена путем использования функции транспортных расходов C_{ij} , отражающей не только расстояние, но и стоимость проезда между транспортными районами (или населенными пунктами) [2]. Модель формулируется как:

$$T_{ij} = \alpha O_i D_j f(c_{ij}), \quad (4)$$

где: $f(c_{ij})$ – обобщенная функция транспортных расходов с одним или несколькими параметрами. Данную функцию часто называют «функцией сдерживания»: она описывает снижение степени привлекательности поездок по мере увеличения расстояния, времени или стоимости. Популярны версии этой функции:

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}) \quad (5)$$

экспоненциальная;

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n} \quad (6)$$

степенная;

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij}) \quad (7)$$

комбинированная,

где: β, n , – параметры калибровки функции сдерживания.

При этом должны быть соблюдены следующие ограничения [2]:

$$\sum_i T_{ij} = D_j; \sum_j T_{ij} = O_i. \quad (8)$$

Для выполнения ограничения (8) единый коэффициент пропорциональности α заменен на два набора уравнивающих коэффициентов A_i и B_j , т.е. [2, 20]:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij}). \quad (9)$$

Гравитационная модель применялась для расчета транспортного спроса на междугородных и пригородных линиях в работах⁶ [21, 22, 23].

Число отправок и прибытий определяется в рамках общей четырехэтапной транспортной модели: генерация поездок, распределение поездок, выбор вида транспорта и назначение поездок [2]. В работе [24] для междугородных поездок применена транспортная модель, состоящая из двух последовательных шагов. Во-первых, прогнозируется общий объем междугородных поездок для всех пар населенных пунктов. Во-вторых, пассажирские корреспонденции посредством логит-модели распределяются между видами перевозок.

Как правило, при определении количества поездок учитываются социально-экономические характеристики городов и комплексные показатели уровня обслуживания. Например, такой подход используют для прогнозирования пассажиропотока на высокоскоростных железных дорогах [25].

⁵Власов М. П., Шимко П. Д. Моделирование экономических процессов: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 080502 – Экономика и управление на предприятии (по отраслям) / СПб.: С.-Петербург. гос. инженер.-экон. ун-т, 2006. 386 с. ISBN 5-88996-566-2.

⁶Чистяков А. С. Гравитационная модель пассажиропотоков направления Красноярск-Ачинск // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. С. 112–117.

При генерации поездок часто принимаемыми во внимание переменными являются характеристики пассажиров, привлекательность поездки, а также атрибуты альтернатив [26, 27, 28]. Модели генерации поездок делятся на агрегированные и дезагрегированные. Модели, основанные на агрегированных данных, позволяют рассчитать общее количество поездок между парами населенных пунктов⁷. Методы моделирования обычно включают регрессионные модели, кросс-классификационный анализ или комбинацию первого и второго. Эти методы отличаются математической простотой и доступностью данных⁸.

Дезагрегированные модели формирования поездок были разработаны для согласования с моделями выбора вида транспорта или пункта назначения. Эти модели основаны на данных индивидуального уровня: предполагается, что формирование поездки представляет собой процесс выбора из следующих альтернатив: не совершать поездку, одна поездка, две поездки и так далее. Модели предсказывают вероятность того, что человек совершит определенное количество поездок за определенный период⁹.

Фактическое количество перевезенных пассажиров между остановочными пунктами автобусной линии известно из системы бронирования, посредством которой осуществляется реализация пассажирских билетов¹⁰. Данные из системы бронирования будем применять для калибровки математической модели. При этом следует учитывать, что между некоторыми остановочными пунктами перевозчики используют ограничения транспортного предложения: устанавливают предельное число мест, время начала реализации или билеты могут не продаваться вовсе. Для калибровки будем использовать остановочные пункты, между которыми нет ограничений транспортного предложения.

3. Задачу планирования перевозок рассмотрим на примере автобусной линии Красноярск – Енисейск (рисунок 1). На данном направлении нет других видов магистрального

транспорта (например, железнодорожного). Кроме междугородного автобуса удовлетворение транспортного спроса обеспечивается пригородными маршрутами, организованными из крупных населенных пунктов, личным транспортом и посредством карпулинга. Линия проходит через 38 населенных пунктов, в которых организовано 48 остановочных пунктов. Расстояние от Красноярска до Енисейска около 360 км. На рисунке 1 даны наименования наиболее крупных населенных пунктов. Размер окружности, которой обозначены населенные пункты, зависит от числа жителей.

Ежедневно по рассматриваемой линии выполняется 6-7 рейсов автобуса в прямом (из Красноярска) и обратном (из Енисейска) направлениях.

Транспортный спрос рассчитаем следующим образом:

$$T_{ij} = \alpha P_i P_j f(c_{ij}). \quad (10)$$

В данном случае не применялось выражение (9) с балансирующими коэффициентами для каждого населенного пункта A_i и B_j по следующим причинам. С одной стороны, использование этих коэффициентов должно обеспечить более высокую точность математической модели. Однако, во-первых, при этом остаются неизвестными факторы, обусловившие разный характер взаимодействия населенных пунктов, т.е. невозможно выявить закономерности влияния таких факторов и применить их к рассматриваемой системе в целом. Во-вторых, нет уверенности в стабильности значений коэффициентов балансировки вследствие возможных изменений в будущем социально-экономических условий. В-третьих, из-за того, что перевозчики применяют ограничения в реализации пассажирских билетов, для некоторых пар населенных пунктов отсутствуют фактические значения перевезенных пассажиров, которые необходимы для определения значений балансирующих коэффициентов.

⁷ Institute of Transportation Engineers. (1992). Transportation Planning Handbook.

⁸ United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. (1999). Guidebook on Statewide Travel Forecasting. Federal Highway Administration Report FHWA-HEP-99-007.

⁹ Domencich, Thomas A. and McFadden, Daniel. (1995). Urban Travel Demand, A Behavioral Analysis. A Charles River Associates Research Study.

¹⁰ Фадеев А.И. Интегрированная информационная система организации и управления перевозками пассажиров по регулярным автобусным маршрутам/ А.И. Фадеев, М.Т. Ильянков // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции. 2019. С. 654–661.

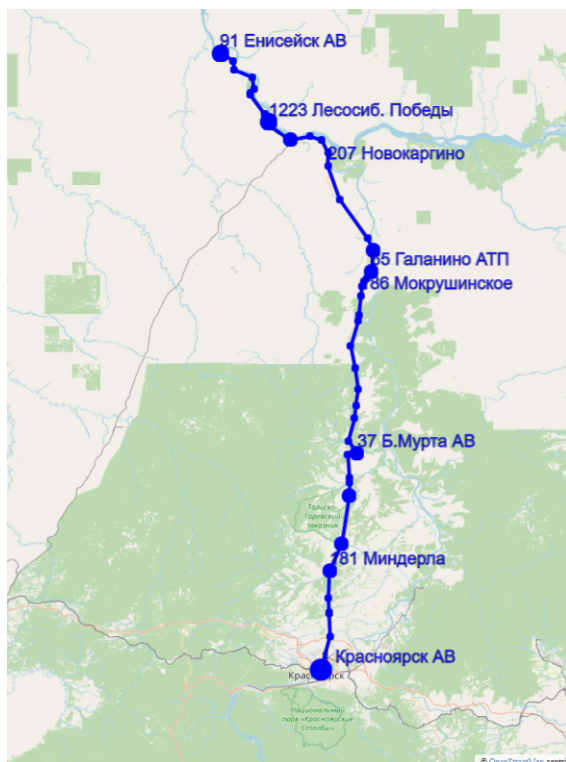


Рисунок 1 – Схема автобусной линии
«Красноярск – Енисейск»
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Krasnoyarsk – Yeniseysk scheme bus line
Source: compiled by the authors.

Выражение (10) позволяет рассчитать потенциальный спрос на основе двух факторов: числа жителей и расстояний между населенными пунктами. При этом не учитываются другие факторы, такие как доход семьи, наличие автомобиля и пр. Однако получение информации о структуре населения – непростая задача. Поэтому на данном этапе исследований определение потенциального спроса осуществлено гравитационным методом. В дальнейшем планируется разработка методики, учитывающей и другие характеристики населения.

Как упоминалось выше, для определения параметров гравитационной модели спроса междугородной автобусной линии использованы населенные пункты, между которыми не применялись ограничения транспортного предложения. К таким пунктам относятся: с. Абалаково, г. Енисейск, с. Казачинское, г. Красноярск, г. Лесосибирск, п. Новокаргино, п. Шапкино. В результате расчетов получено, что пассажиропоток наиболее адекватно описывается степенной функцией сдерживания (6) при $n=2$.

На рисунке 2 сплошной линией обозначена полученная теоретическая зависимость отношения числа поездок (T_{ij}) к произведению числа жителей ($P_i P_j$) от расстояния между населенными пунктами (L).

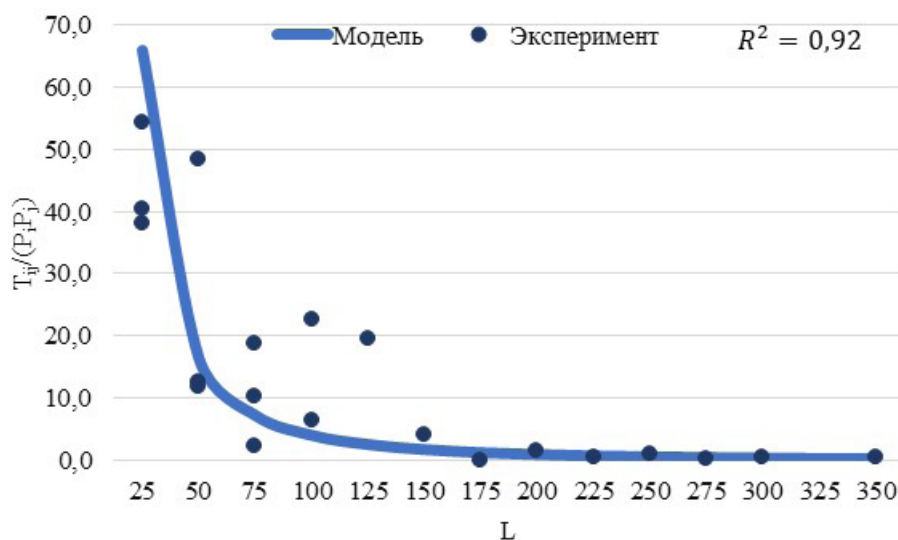


Рисунок 2 – Зависимость отношения числа поездок (T_{ij})
к произведению числа жителей ($P_i P_j$) от расстояния между населенными пунктами (L)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the journeys number ratio (T_{ij})
to the product of the inhabitants number ($P_i P_j$) on the distance between settlements (L)
Source: compiled by the authors.

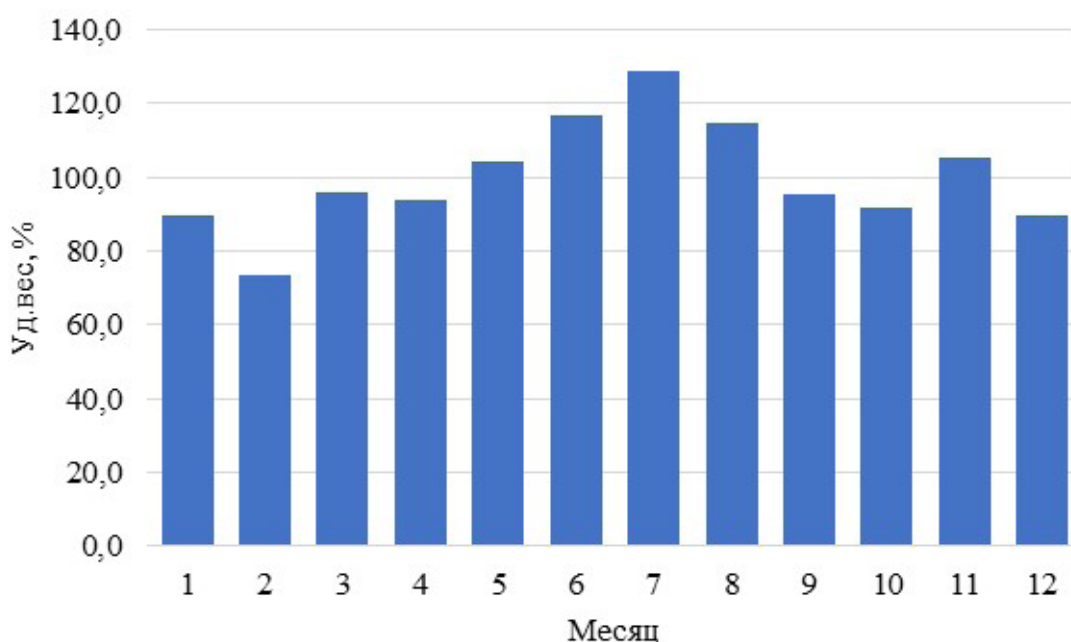


Рисунок 3 – Распределение объема перевозок по месяцам года по отношению к среднему за месяц
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of passenger traffic volume by month of the year in relation to the average for the month
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 точками обозначены экспериментальные данные 2022 г., полученные из информационной системы бронирования, используемой перевозчиками по рассматриваемой линии. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$ рассматриваемой регрессионной модели позволяет сделать вывод о ее соответствии данным в степени, достаточной использования при решении рассматриваемой задачи. Однако имеющиеся выбросы свидетельствуют о влиянии на транспортный спрос неучтенных факторов (которые планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях).

С использованием выражения (10) между всеми населенными пунктами, расположенными на автобусной линии, рассчитаны потенциальные пассажирские корреспонденции в среднем за год.

4. Управление транспортным предложением. Потенциальный объем перевозок корреспонденции ij -м рейсом можно рассчитать:

$$T_{ij}^s = p_{ij}^s T_{ij}, \quad (11)$$

где p_{ij}^s – вероятность обслуживания пассажирской корреспонденции ij -м рейсом.

$$p_{ij}^s = \begin{cases} \frac{k_m^s k_w^s k_r^s}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} > 0 \\ 0, & \text{если } r_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

r_{ij} – количество рейсов в год, которыми может быть обслужена корреспонденция ij ;

$k_m^s k_w^s k_r^s$ – корректирующие коэффициенты, посредством которых учитывается неравномерность пассажирских потоков по месяцам года, дням недели и рейсам расписания.

На рисунке 3 приведено распределение числа перевезенных пассажиров по месяцам года: пассажирские потоки имеют существенную сезонную неравномерность (коэффициентом неравномерности до 1,3). Самыми напряженными являются летние месяцы, в которые перевозится треть годового числа пассажиров. В осенне-зимний период перевозки снижаются до 80–90% от среднемесячного за год.

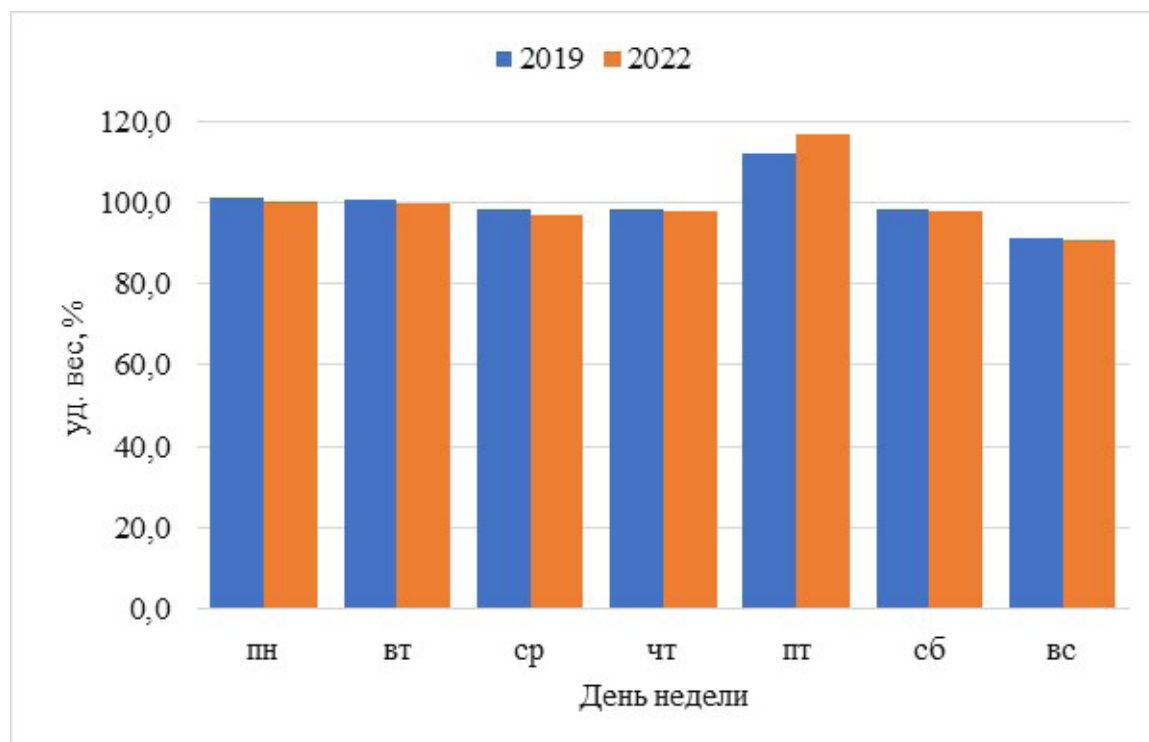


Рисунок 4 – Диаграмма распределения объема перевозок по дням недели
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Distribution diagram of the transported passengers number by day of the week
Source: compiled by the authors.

Пассажирыские потоки также изменяются в течение недели (рисунок 4). В пятницу объем перевозок увеличивается на 10–20% по отношению к среднему за неделю. В воскресенье практически на такую же величину наблюдается его снижение.

На рассматриваемой линии расписание движения по дням недели не изменяется. В предпраздничные дни в связи с резким повышением спроса могут организовываться дополнительные рейсы, число которых обуславливается фактическим пассажиропотоком.

На рисунке 5 приведено распределение пассажирских потоков между рейсами, выполняемыми за сутки в будний день. Из рисунка видно, что рейсы заполняются неравномерно, в прямом направлении большее число пассажиров перевозится рейсами, отправляемыми из Красноярского автовокзала в первой половине дня. В обратном направлении менее загруженными являются рейсы с отправлением в 10:00 и 11:30 из Енисейска.

Значения корректирующих коэффициентов рассчитываются на основании распределения

объема перевозок по месяцам года, дням недели и между рейсами дня выполнения перевозок:

$$k_m^s = \frac{Q_m^s}{\bar{Q}_m}, \quad (13)$$

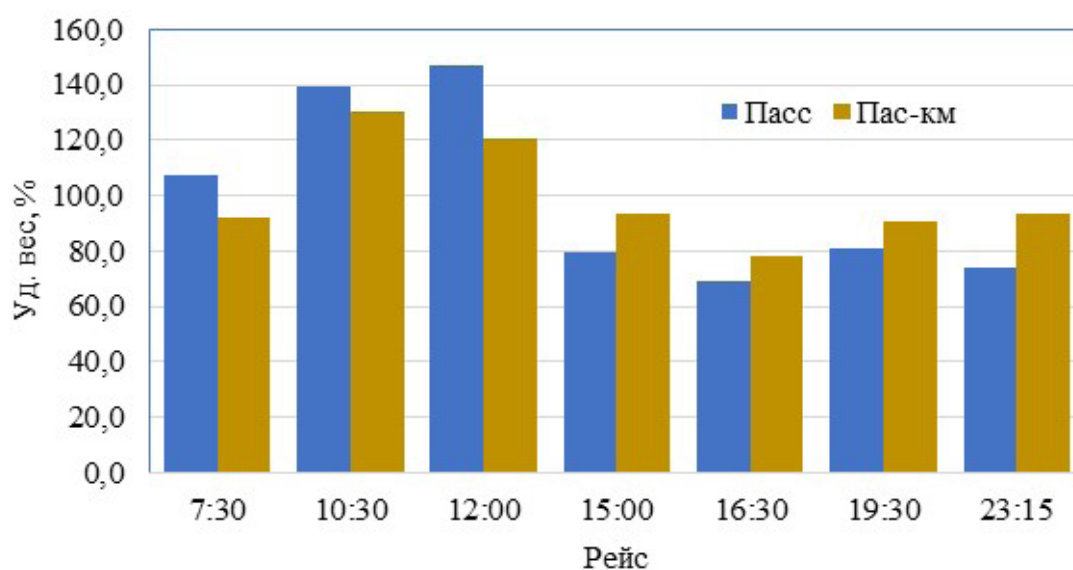
$$k_w^s = \frac{Q_w^s}{\bar{Q}_w}, \quad (14)$$

$$k_r^s = \frac{Q_r^s}{\bar{Q}_r}, \quad (15)$$

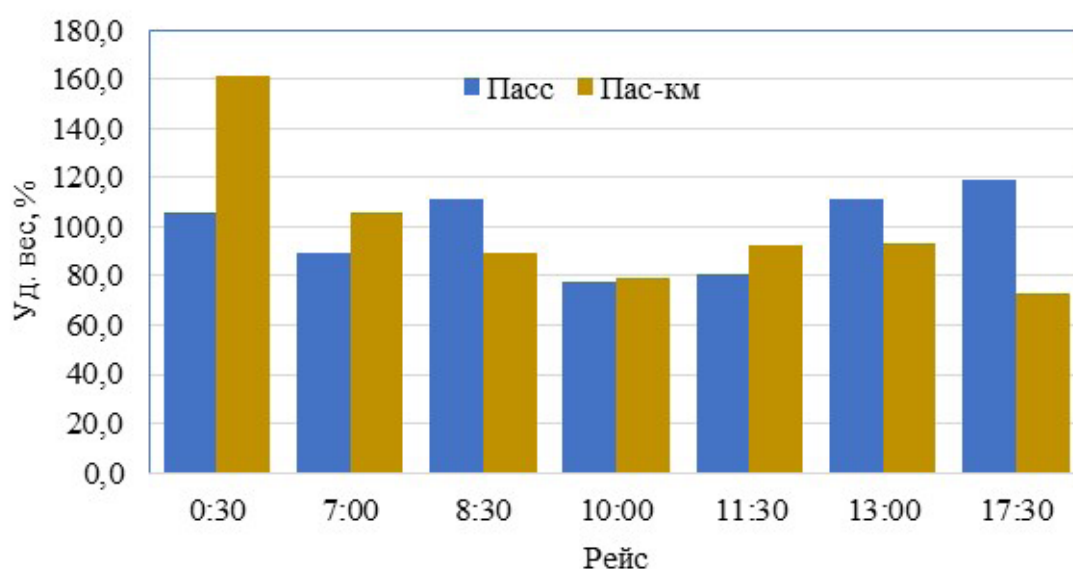
где Q_m^s , $\bar{Q}_m$ – объем перевозок в месяце s -го рейса и в среднем за месяц года;

Q_w^s , $\bar{Q}_w$ – объем перевозок в день недели s -го рейса и в среднем за день недели;

Q_r^s , $\bar{Q}_r$ – объем перевозок в расписании s -го рейса и в среднем за рейс дня перевозок.



a



б

Рисунок 5 – Распределение перевозок между рейсами:
 а – прямое направление (из Красноярска);
 б – обратное направление (из Енисейска)
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Distribution of transportation between flights
 а) straight direction (from Krasnoyarsk)
 б) reverse direction (from Yeniseysk)
 Source: compiled by the authors.

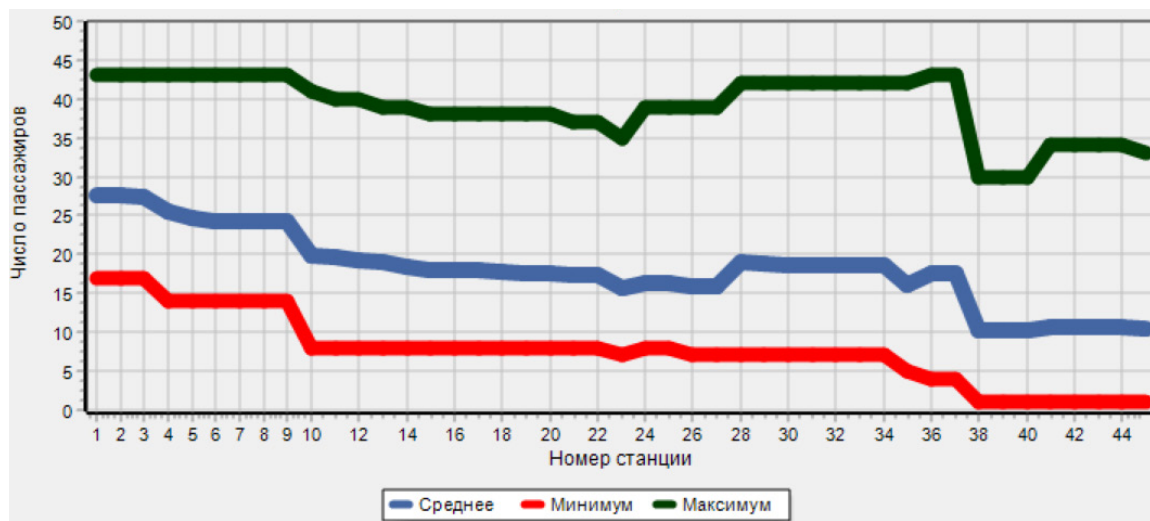


Рисунок 6 – Распределение числа пассажиров в автобусе на перегонах рейсов на 07:30 из Красноярска в будние дни (понедельник – четверг) ноября 2022 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Distribution of passengers number on a bus during flights at 07:30 from Krasnoyarsk on weekdays (Monday – Thursday) November 2022
Source: compiled by the authors.

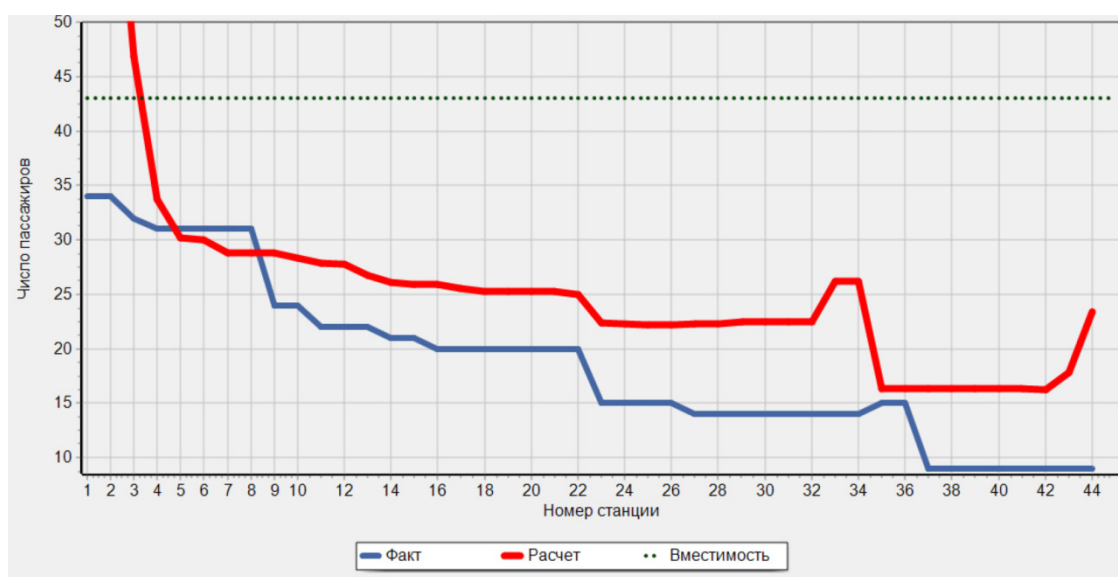


Рисунок 7 – Распределение фактического и расчетного числа пассажиров на перегонах рейса на 07:30 из Красноярска 1 ноября 2022 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Distribution of the actual and estimated passengers number during the flight at 07:30 from Krasnoyarsk on November 1, 2022
Source: compiled by the authors.



Рисунок 8 – Распределение фактического и расчетного числа пассажиров на перегонах рейса на 11:30 из Енисейска 1 ноября 2022 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 8– Distribution of the actual and estimated passengers number during 11:30 flight from Yeniseisk on November 1, 2022
Source: compiled by the authors.

Корреспонденция T_{ij} может быть обслужена s -м рейсом, если остановочные пункты i и j присутствуют в рейсе и номер i -го пункта больше номера j -го, т.е.

$$n_i^s > 0, n_j^s > 0, n_i^s > n_j^s, \quad (16)$$

где n_i^s, n_j^s – номер i -го, j -го остановочного пункта в s -м рейсе соответственно.

Матрица потенциальных пассажирских корреспонденций s -го рейса T_{ij}^s , рассчитанная в соответствии с выражением (11), является допустимой, если выполняется ограничение (2): число пассажиров в автобусе на всех перегонах маршрута не превышает номинальной вместимости автобуса.

Если на каких-либо перегонах упомянутое ограничение не выполняется, требуются управляющие воздействия для переключения пассажирских корреспонденций с междугородного на другие виды общественного транспорта, например, пригородные автобусные маршруты.

Ограничение реализации пассажирских билетов, используемое перевозчиками в настоящее время, нельзя признать рациональным решением проблемы. На автобусных линиях зачастую применяются ограничения,

одинаковые для всех рейсов независимо от динамики пассажирских потоков. В результате существенное число рейсов оказывается незаполненным, в то время как на определенных сегментах транспортное предложение отсутствует.

Для управления транспортным предложением междугородной автобусной линии требуется разработать стратегию, обеспечивающую баланс между эффективностью и качеством транспортного обслуживания, учитывающую случайные колебания транспортного спроса, структуру системы общественного транспорта.

Очевидно, что на сегментах линии без других видов общественного транспорта ограничения транспортного предложения применяться не должны.

Рассматриваемая стратегия может быть реализована в системе бронирования, через которую осуществляется реализации пассажирских билетов. Оценим потенциальную эффективность управления транспортным предложением. На рисунке 6 приведено изменение числа пассажиров в автобусе рейса на 07:30 из Красноярска за ноябрь 2022 г.; приведены средние, максимальные и минимальные значения числа пассажиров в автобусе на перегонах маршрута.

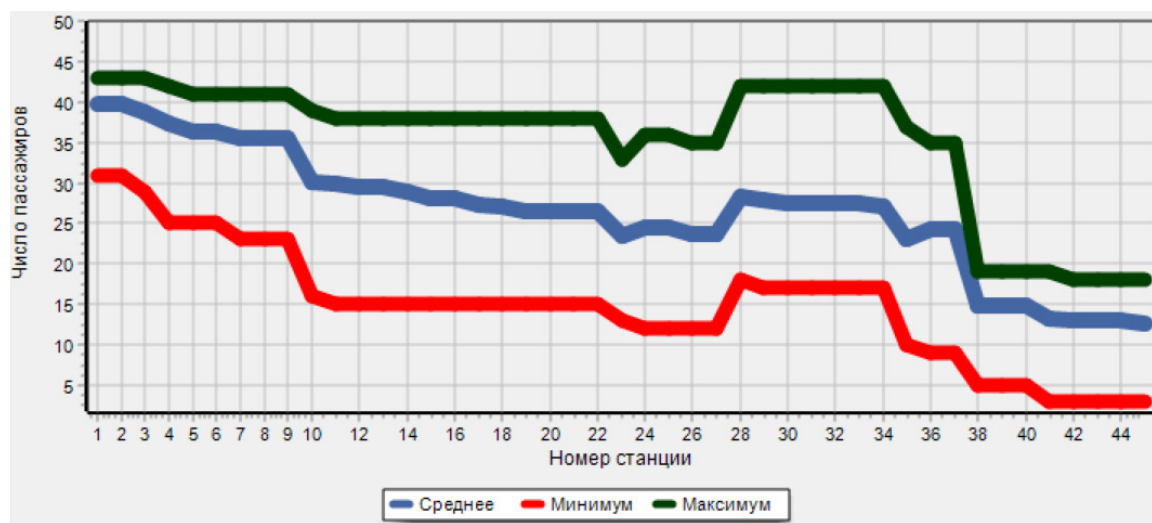


Рисунок 9 – Распределение числа пассажиров в автобусе на перегонах рейсов на 07:30 из Красноярск в пятницу летних месяцев 2022 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 9– Distribution of the passengers number on a bus during flights at 07:30 from Krasnoyarsk on Friday in the summer months of 2022
Source: compiled by the authors.

Для перевозок используются транспортные средства с 43 местами для сидения. Линия «максимум» показывает, что автобус на некоторых перегонах рассматриваемого рейса заполнен не полностью. В среднем за месяц вместимость подвижного состава данного рейса используется не более 50%. В дни минимального спроса (линия «минимум») пассажиры занимают не более 25% мест в автобусе.

Рассмотрим возможность повышения эффективности перевозок за счет регулирования транспортного предложения в зависимости от динамики спроса. Рассчитаем потенциальное число пассажиров рейса и сравним его с фактическим. Динамика фактического и расчетного числа пассажиров по остановочным пунктам рейса из Красноярск на 07:30 1 ноября 2022 г. приведена на рисунке 7. Расчетное число пассажиров определено в соответствии с выражением (11).

Из рисунка видно, что для рассматриваемого рейса управление транспортным предложением необходимо на сегменте первых пяти остановочных пунктов от Красноярск до станции Миндерла. На данном сегменте функционируют пригородные автобусные маршруты, на которые можно перераспределить спрос.

Аналогичным образом следует применять управление транспортным предложением на обратных рейсах из Енисейска (рисунок 8).

Из рисунка 7 видно, что регулирование транспортного предложения с учетом спроса позволит повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения. На линии будет сформировано более широкое транспортное предложение, в том числе пассажирам небольших населенных пунктов, в которых нет другого общественного транспорта (кроме междугородного автобуса). Для рейса на 07:30 из Красноярск за счет гибкого регулирования ожидаемое повышение пассажирооборота составляет до 25% (см. рисунок 7).

Следует отметить, что даже в летние месяцы повышенного спроса имеется резерв провозных возможностей, за счет которых можно увеличить транспортное предложение на некоторых сегментах линии. На рисунке 9 проиллюстрирована динамика числа пассажиров в автобусе в течение рейсов в пятницу летних месяцев 2022 г. Видно, что транспортный спрос подвержен существенным случайным колебаниям: минимальное и максимальное число пассажиров примерно на треть отличается от среднего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В связи с существенным социально-экономическим значением междугородных автобусных перевозок усиливается потребность в эффективном управлении транспортным процессом, чтобы повысить качество и конкурентоспособность услуг общественного транспорта и минимизировать операторские расходы.

2. С целью оценки возможной эффективности управления транспортным предложением с использованием гравитационного метода осуществлен расчет *потенциального спроса междугородной автобусной линии*. Получено, что пассажиропоток наиболее адекватно описывается степенной функцией сдерживания.

Коэффициент детерминации полученной регрессионной модели позволяет сделать вывод о ее соответствии фактическим данным в достаточной степени. Однако имеющиеся выбросы свидетельствуют о влиянии на транспортный спрос факторов, не учитываемых в гравитационном методе, таких как *доход семьи, наличие автомобиля и т.д.* Эти факторы планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

3. В соответствии с разработанной математической моделью задача планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, проходящей через населенные пункты с различным числом жителей, предусматривает управление транспортным предложением с учетом параметров спроса, а также взаимодействия междугородных, городских и пригородных маршрутов.

4. В статье приведен разработанный порядок расчета потенциального транспортного спроса с учетом неравномерности пассажирских потоков.

Пассажирские потоки имеют существенную сезонную неравномерность (коэффициентом неравномерности до 1,3), самыми напряженными являются летние месяцы, в которые перевозится треть годового объема перевозок. В осенне-зимний период объем перевозок снижается до 80–90% по отношению к среднемесячному за год.

Пассажирские потоки также изменяются в течение недели. В пятницу объем перевозок увеличивается на 10–20% по отношению к среднему за неделю. В воскресенье практически на такую же величину наблюдается снижение числа перевезенных пассажиров.

5. Анализ эпюр распределения пассажиров по длине рейса показывает, что на рассматриваемой линии имеется существенный резерв провозных возможностей.

6. На автобусных линиях, как правило, перевозчиками применяются ограничения транспортного предложения, которые нельзя признать рациональными. Зачастую применяются ограничения одинаковые для всех рейсов, независимо от динамики пассажирских потоков. В результате большое число рейсов оказывается незаполненным, в то время как на определенных сегментах обслуживание пассажиров не осуществляется, отсутствует транспортное предложение пассажирам небольших населенных пунктов, в которых нет другого общественного транспорта.

7. Путем сравнения потенциального числа пассажиров с фактическим спросом реальной автобусной линии показано, что управление транспортным предложением позволяет повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения.

8. Направления дальнейших исследований:

- разработать математическую модель транспортного спроса, учитывающую не только расстояние между населенными пунктами, но и другие факторы, такие как *доход семьи, наличие автомобиля и т.д.*;

- исследовать механизм влияния параметров транспортного предложения (технико-эксплуатационных показателей транспортной системы) на транспортный спрос;

- разработать методику определения транспортного спроса в зависимости от параметров транспортного предложения;

- сформировать стратегию управления транспортным предложением с учетом случайных колебаний спроса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5.

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

3. Щербаков Л. М. Эффективность междугородных автобусных перевозок в условиях функционирования рынка транспортных услуг // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 3 (50). С. 63–65.

4. Javid R., and E. Sadeghvaziri. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218.

5. Group K. Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs. Report 79, Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2002. 184 p.

6. 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.
7. Ryan F., Allard R. F., and Moura F., The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning, *Transport Reviews*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1059379>
8. Корягин М. Е., Чистяков А. С. База данных для описания рынка междугородных пассажирских перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(56). С. 38–45. DOI 10.52170/1815-9262-2021-56-38.
9. Макарова Е. А., Елизаров С. Б., Муктепел С. В. Автоматизированная система прогнозирования пассажирских транспортных потоков на базе АСУ «Экспресс» // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2011. № 4. С. 21–27.
10. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., & Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. doi:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006
11. Alderighi M., Feder C, Nijkamp P, Ungureanu E. Simple pricing rules in complex air transport systems. *Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory?* Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320 doi: 10.4337/9781839100598.00027
12. Merrina A., Sparavigna, A., & Wolf, R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.
13. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Режим доступа: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (дата обращения: 22.05.2023)
14. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization // *Public Transport*. 2023: pp 1–32. /doi.org/10.1007/s12469-022-00319-y
15. Ibarra-Rojas, O., J., Delgado, R. Giesen, and J.C. Muñoz (2015). Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 77: 38-75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002.
16. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1-15. doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007
17. Casey H. J. (1955) Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. *Traffic Quarterly* IX. 1955: 23–35.
18. Erlander S. and Stewart N.F. (1990) *The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions*. VSP, Utrecht.
19. Abrahamsson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey. Technical report, IIASA, Laxenburg, Austria, 1998. 27 p.
20. Willumsen L. G. Estimation of OD matrix from traffic counts – A review. Working Paper. Inst. Transp. Stud. Univ. Leeds. 1978.
21. Доля К. В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций / К. В. Доля // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, №5. С. 437 – 443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443.
22. Нурминский Е. А. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей / Е. А. Нурминский, И. Н. Пугачев, Н. Б. Шамрай, В. Н. Седюкевич // *Наука и техника*. 2015. № 5. С. 39–45.
23. Горбачев П. Ф., Крикун В. И. Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном сообщении // *ВЕЖПТ*. 2013. № 3(62). С. 12–15.
24. Koppelman Franz S. and Hirsh, Moshe. (1984). *Intercity Travel Choice Behavior: Theory and Empirical Analysis*. Proceedings, Fifth International Conference on Travel Behavior, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Aix-en-Provence, France, 1991. pp. 227-244.
25. Brand, Daniel, et al. (1992). Forecasting High-Speed Rail Ridership. *Transportation Research Record*. 1992; No. 1341:12 – 18.
26. Peers, John B. and Bevilacqua, Michael, Alan M. Voorhees and Associates, Inc. (1976). *Structural Travel Demand Models: An intercity Application*. *Transportation Research Record*. No. 569. 124-135p.
27. Lu, M., Zhu, H., Luo, X., & Lei, L. (2015). Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2014/108180>
28. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964-973.

REFERENCES

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5.
2. Ortuzar J. D. Modelling transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. John Wiley & Sons, 2011. 586 p. URL: DOI:10.1002/9781119993308.
3. Shherbakov L. M. Jeffectivnost' mezhdugorodnyh avtobusnyh perevozok v usloviyah funkcionirovaniya ryn-ka transportnyh uslug [Efficiency of intercity bus transportation in the context of the transport services

market]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011; 3 (50): 63–65. (in Russ.)

4. Javid R., and E. Sadeghvaziri. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218.

5. Group K. Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs. Report 79, Transit Cooperative Research Program. *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 2002. 184 p.

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

7. Ryan F., Allard R. F., and Moura F., The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning, *Transport Reviews*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1059379>

8. Korjagin M. E., Chistjakov A. S. Baza dannyh dlja opisanija rynda mezhdugorodnyh passazhirskih pere-vozok [Long Distance Passenger Market Description Database]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2021; 1(56): 38–45. DOI 10.52170/1815-9262-2021-56-38. (in Russ.)

9. Makarova E. A., Elizarov S. B., Muktepavel S. V. Avtomatizirovannaja sistema prognozirovaniya passazhirskih transportnyh potokov na baze ASU «Jekspress» [Automated system for forecasting passenger traffic flows based on ACS “Ex-press”]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2011; 4: 21–27. (in Russ.)

10. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., & Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. doi:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006

11. Alderighi M., Feder C., Nijkamp P., Ungureanu E. Simple pricing rules in complex air transport systems. *Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory?* Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320 doi: 10.4337/9781839100598.00027

12. Merrina A., Sparavigna, A., & Wolf, R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.

13. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Available at: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (accessed: 22.05.2023)

14. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization. *Public Transport*. 2023: pp 1–32. /doi.org/10.1007/s12469-022-00319-y

15. Ibarra-Rojas, O., J., Delgado, R. Giesen, and J.C. Muñoz Planning, Operation, and Control of Bus

Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015; 77: 38–75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002.

16. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1–15. doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007

17. Casey H. J. (1955) Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. *Traffic Quarterly* IX. 1955: 23–35.

18. Erlander S. and Stewart N.F. (1990) The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions. VSP, Utrecht.

29. Abrahamsson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey. Technical report, IIASA, Laxenburg, Austria, 1998. 27 p.

20. Willumsen L. G. Estimation of OD matrix from traffic counts – A review. Working Paper. Inst. Transp. Stud. Univ. Leeds. 1978.

21. Dolja K. V. Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *Nauka i tehnika*. 2017; T. 16, no 5: 437 – 443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443. (in Russ.)

22. Nurminskij E. A., Pugachev I. N., Shamraj N. B., Sedjukevich V. N. Opredelenie passazhiropotokov v regional'noj transportnoj sisteme na osnove modifizirovannyh gravitacionnyh modelej [Determination of passenger traffic in the regional transport system on the basis of modified gravitation models]. *Nauka i tehnika*. 2015; 5. 2015: 39 – 45. (in Russ.)

23. Gorbachev P. F., Krikun V. I. Modelirovanie sprosa na perevozku passazhirov v prigorodnom soobshhenii [Modeling Demand for Commuter Transportation]. *VEZhPT*. 2013; 3(62):12–15. (in Russ.)

24. Koppelman Franz S. and Hirsh, Moshe. (1984). Intercity Travel Choice Behavior: Theory and Empirical Analysis. Proceedings, Fifth International Conference on Travel Behavior, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Aix-en-Provence, France, 1991. pp. 227–244.

25. Brand, Daniel, et al. (1992). Forecasting High-Speed Rail Ridership. *Transportation Research Record*. 1992; No. 1341:12 – 18.

26. Peers, John B. and Bevilacqua, Michael, Alan M. Voorhees and Associates, Inc. (1976). Structural Travel Demand Models: An intercity Application. *Transportation Research Record*. No. 569. 124 – 135 p.

27. Lu, M., Zhu, H., Luo, X., & Lei, L. (2015). Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2014/108180>

28. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964 – 973.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А. И. Постановка задачи, разработка математической модели планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, программное обеспечение, формулирование заключения.

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION STATEMENT

Aleksandr I. Fadeyev. Problem statement, mathematical model of transportation planning on an intercity regular bus line, software development, conclusion statement.

Aleksei M. Ilyankov. Participation in the preparation of initial data and calculations, review of literary sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Ильянков Алексей Михайлович – 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.