

Научная статья
УДК 656.025.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-582-595>
EDN: HBDIND



РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ НА МАРШРУТЕ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А.Ю. Михайлов¹, О.А. Лебедева² ✉, И.М. Ерёмина²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

²Ангарский государственный технический университет,
г. Ангарск, Россия

✉ ответственный автор
kravhome@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оперативного получения информации для проведения расчетов, особенно в изучении закономерности формирования пассажирской составляющей в транспортной нагрузке. В настоящее время обстоятельством, мешающим успешному прогнозированию в области пассажирских перевозок, является недостаточная реализация моделей оценки корреспонденций на маршрутной сети городского пассажирского транспорта с использованием современных языков программирования. Многие методы не могут быть внедрены на предприятиях автомобильного транспорта, поскольку ощущается катастрофическая нехватка данных обследований. Поэтому целью исследования является реализация модели оценки матрицы корреспонденций на маршруте общественного транспорта как основы новых методов и алгоритмов обработки информации путем использования экосистемы специализированных библиотек PYTHON, что позволяет проводить вычисления с достаточно высокой скоростью без необходимости в дорогостоящем оборудовании.

Материалы и методы. Исследование проводилось с применением системы сбора информации об интенсивности пассажирских перевозок на наземных пассажирских транспортных средствах «ПОТОК» посредством получения данных с транспортного терминала «БАРС-01-Т» – суммарного количества пересечений инфракрасных датчиков «Луч-М».

Результаты. В исследовании предложен способ оперативной обработки информации для оценки матриц корреспонденций путем объединения методик восстановления интенсивности движения на дорогах с результатами обследований пассажиропотоков, используя метод наименьших модулей для нахождения оптимального решения.

В качестве инструмента оценки предлагается робастная оптимизация, позволяющая решать транспортные задачи в условиях неточности исходных данных. Для решения задачи использовались алгоритмы interior – point, simplex, revised simplex method, high-performance GHS, dual simplex method пакета PYTHON.

Обсуждение и заключение. Расширение функциональных возможностей методики позволяет сократить трудоемкость сбора информации об интенсивности перевозок пассажиров.

В данном исследовании представлена практическая модель оценки матриц по маршрутам общественного транспорта. Этот подход обеспечивает требуемую точность измерений при одновременном снижении затрат на сбор данных, поддерживая как планирование транспортной системы, так и более широкую функциональную оценку городских территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской пассажирский транспорт, система мониторинга «Поток», матрица корреспонденций, детекторы входа – выхода, библиотеки PYTHON

Статья поступила в редакцию 22.04.2026; одобрена после рецензирования 05.06.2026; принята к публикации 21.08.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Михайлов А.Ю., Лебедева О.А., Ерёмина И.М., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Михайлов А.Ю., Лебедева О.А., Ерёмина И.М. Реализация модели оценки матрицы корреспонденций на маршруте городского общественного пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 4. С. 582-595. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-582-595>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-582-595>

EDN: HBDIND

IMPLEMENTATION OF ORIGIN-DESTINATION MATRIX ESTIMATION MODEL FOR AN URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT ROUTE

Alexander Yu. Mikhailov¹, Olga A. Lebedeva² ✉, Irina M. Eremina²

¹Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

²Angarsk State Technical University,
Angarsk, Russia

✉ corresponding author
kravhome@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of this research stems from the need to quickly obtain information for calculations, particularly to study the regularities of passenger component in transport load. Currently, a major factor hindering successful forecasting in the field of passenger transportation is the insufficient implementation of models for estimating correspondence within urban passenger transport route networks via modern programming languages. The implementation of numerous methods at road transport enterprises is hindered by a severe lack of empirical survey data. Therefore, this study aims to implement a correspondence matrix estimation model for a public transport route as the basis for new data processing methods and algorithms, the use of specialized Python libraries enabling high performance computing without expensive equipment.

Materials and Methods. The data source for the experiment was a control tower equipped with the POTOK software package for monitoring passenger transportation. Primary data was collected from a BARS-01 T unit and Luch M.

Results. This study presents an efficient data processing method to estimate origin-destination matrices by integrating traffic flow reconstruction techniques with passenger flow data, using the least absolute deviations method to determine the optimal solution.

Robust optimization is proposed as an evaluation tool to address transport problems given inaccurate initial data. To solve the problem, the interior-point, simplex, revised simplex method, high-performance GHS, and dual simplex method algorithms from the Python package have been used.

Discussion and Conclusion. The extended functionality of this methodology reduces labor intensity in collecting passenger traffic data.

This study presents a practical model of evaluating matrices for public transport routes. This approach ensures the required measurement accuracy while reducing data collection costs, and supporting both transportation system planning and a broader functional assessment of urban areas.

KEYWORDS: urban passenger transport, Potok monitoring system, correspondence matrix, entry/exit detectors, PYTHON libraries

The article was submitted: April 22, 2026; approved after reviewing: June 05, 2026; accepted for publication: August 21, 2026.

All 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: Mikhailov A.Yu., Lebedeva O.A., Eremina I.M. Implementation of correspondence matrix assessment model for an urban public passenger transport route. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (4): 582-595. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-4-582-595>

© Mikhailov Alexander Yu., Lebedeva Olga A., Eremina Irina M., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Задача оценки матрицы корреспонденций на маршруте городского пассажирского транспорта общего пользования (ГПТ ОП) при организации пассажирских перевозок с высоким качеством при минимальных издержках является наиболее актуальной в автотранспортной отрасли. Изучение спроса образует динамическую многофакторную систему со сложными связями, проявляющимися в виде статистических закономерностей, требующих специального подхода. Развитие ГПТ ОП, обеспечивающее выполнение пассажирских перевозок в транспортных сетях с заявленным качеством и высокой экономической эффективностью [1], является приоритетом государственной политики субъектов Российской Федерации в сфере транспортного комплекса.

С увеличением числа транспортных средств и маршрутов многие города сталкиваются с проблемами перегруженности, неэффективного распределения ресурсов и ухудшения качества обслуживания пассажиров [2, 3, 4]. Системы мониторинга пассажироперевозок позволяют выявить наиболее загруженные направления, оптимизировать расписания и улучшить качество обслуживания, что ведет к повышению удовлетворенности пассажиров предоставляемыми услугами. Кроме того, внедрение современных информационных технологий позволяет транспортным компаниям работать в условиях ограниченных бюджетов, минимизируя затраты и повышая общую эффективность. В современных условиях системы мониторинга пассажиропотоков становятся важным инструментом для создания более эффективной транспортной сети.

Целью исследования является разработка инструментария для реализации модели оценки матрицы корреспонденций на маршруте ГПТ ОП на основе данных системы мониторинга пассажиропотоков.

В соответствии с целью работы требуется решить следующие задачи: произвести обзор существующих моделей оценки транспортного спроса; разработать или адаптировать алгоритм восстановления матриц корреспонденций для реализации на языке Python; проанализировать точность выбранных методов. Важным условием при выборе метода оценки межостановочной матрицы корреспонденций в транспортной сети является применение информации о пассажиропотоках, полученных с системы мониторинга «Поток» (с учетом имеющихся погрешностей исходных данных).

Повышение эффективности функционирования транспортной сети возможно обеспечить разработкой методов оценки матриц корреспонденций, которые строятся на основе информации о пассажиропотоках или интенсивности движения.

Исследования в области транспортного спроса по результатам различных вариантов обследований как пассажирских, так и транспортных потоков рассматриваются многими авторами. В разные годы аспектами обработки анкет для расчета пассажирских потоков в г. Иркутске занимался М.И. Шаров¹. Вопросу разработки методики оценки матриц корреспонденции транспортных потоков по данным замеров интенсивности дорожного движения внимание уделили Р.Ю. Лагерева² и другие^{3, 4}. Кроме упомянутых работ, в Российской Федерации этой тематикой занимаются А.В. Мартыненко, А.И. Фадеев, Л.Б. Миротин, Д.С. Корчагин, Н.В. Булычева, Л.А. Лосин, А.В. Ахромешин, Е.В. Швецова и др. [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Наиболее известны зарубежные работы Leurent F., Florian M.⁵, Lu C.-C., Maher M.J., Yang X., Vahidi M., Balakrishna R., Barceló J. и др. [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

¹ Шаров М.И. Совершенствование метода оценки транспортного спроса на перевозки городским пассажирским транспортом: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.10 / Шаров Максим Игоревич. Иркутск, 2008. 160 л. : ил.

² Лагерева Р.Ю. Методика оценки матриц корреспонденций транспортных потоков по данным интенсивности движения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.10 / Лагерева Роман Юрьевич. Иркутск, 2006. 183 л. : ил.

³ Михайлов А.Ю. Научные основы проектирования улично-дорожных сетей: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 18.00.04 / Михайлов Александр Юрьевич. Иркутск, 2004. 378 л. : ил.

⁴ Тебеньков С.Е. Оценка распределения потоков в коридоре автомобильного транспорта с размещаемыми на перегонках детекторами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 5(45). С. 157–161.

⁵ Florian M., Chen Y.: A Coordinate descent method for the bi-level OD matrix adjustment problem. Int. Trans. Oper. Res. 2(2), 165–179 (1995). [https://doi.org/10.1016/0969-6016\(95\)00001-n](https://doi.org/10.1016/0969-6016(95)00001-n)



Рисунок 1 – Математические методы решения задачи оценки межстановой матрицы корреспонденции
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Mathematical methods for solving the stop-to-stop O-D matrix estimation problem
Source: compiled by the authors.

Несмотря на многообразие направлений исследований в этой области – оценка спроса посредством использования имеющихся данных (анкетных обследований, замеров на сети, мобильных данных), актуальность мониторинга пассажиропотоков приобретает иную цель, сводящуюся к поиску не просто точной матрицы корреспонденций, а к нахождению такого решения, которое соответствует реальным данным на маршрутной сети.

Схематично можно систематизировать методы восстановления/оценки матриц корреспонденций на городском пассажирском транспорте на рисунке 1.

В соответствии с моделью восстановления корреспонденций, разработанной Bell M.G.⁶, в качестве исходных данных принимаются суммарные потоки исследуемой транспортной сети, но не оцениваются пары районов в отдельности (элементы OD). Этот подход применяется в случае возможности сбора данных с использованием автоматических устройств регистрации транспортных потоков. На первом этапе устанавливается взаимосвязь между зафиксированными на сети потоками и значениями корреспонденций.

Пусть вектор $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ – замеры интенсивности дорожного движения на n участках улично-дорожной сети. Обозначим через $p_{lk}^{i,j}$ долю корреспонденций между районами, которая использует дугу (i, j) . При этом принимается, что каждая поездка может быть осу-

ществлена только по единственному маршруту, то есть распределение потоков является детерминированным.

Следовательно, элемент p_{lk} равен 1, если дуга (i, j) принадлежит выбранному пути ρ_{lk} , и 0 в противном случае. Обозначим матрицу корреспонденций как $X = \{X_{lk}\}$, составим уравнение

$$Y = \sum_{1 \leq l, k \leq m} p_{lk} X_{lk}. \quad (1)$$

Далее производится поиск решения (1). Число дуг n , с точными исходными данными – потоками, значительно меньше количества пар OD, в этом случае число неизвестных превышает число уравнений, из-за чего система может обладать бесконечным множеством решений. Традиционный подход заключается в разработке решения специальной транспортной математической задачи в рамках линейного программирования. Существует два варианта: либо минимизация невязки между расчетными и измеренными значениями (восстановленная матрица корреспонденций и реально известная – очень редкое явление в практике транспортного планирования), либо решение выбирается так, чтобы минимизировать целевую функцию при поставленных ограничениях.

В транспортном моделировании матрица корреспонденций X задаёт объемы поездок между всеми парами остановочных пунктов

⁶ Bell M.G.: The estimation of origin-destination matrices by constrained generalised least squares. Transp. Res. Part B Methodol. 25(1), 13–22 (1991). [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(91\)90010-g](https://doi.org/10.1016/0191-2615(91)90010-g)

или зон. Подсчет числа пассажиров, прошедших через турникет или зафиксированных датчиками «Луч-М», устанавливаемых на дверных проемах, определяет размер корреспонденций сгенерированные или поглощенные конкретным остановочным пунктом. Для подсчета потоков на отдельных дугах сети требуется проведение дополнительных операций по их вычислению.

Восстановление (оценка) матрицы корреспонденций рассматривается как набор измеренных потоков, спроецированных на сетевых дугах, связь между неизвестной матрицей $X=\{X_{ij}\}$ и измеренными потоками $Y=\{Y_a\}$ задается линейными соотношениями (1):

$$Y = \sum_{1 \leq l, k \leq m} p_{lk} X_{lk}, \quad (2)$$

где p_{lk} – доля пассажиров двигающихся из l в k , использующих дугу a .

Наиболее вероятная – матрица X , порождающая потоки, максимально приближенные к наблюдаемым. Для поиска матрицы X производится постановка оптимизационной задачи максимизации (энтропии или правдоподобия) при заявленных ограничениях. Такая постановка приводит к устойчивости оценок даже при больших погрешностях измерений.

Задача максимизации функции $S(X)$, формулируется следующим образом:

$$Y_a = \sum_{1 \leq l, k \leq m} p_{lk} X_{lk} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где X^0 – априорная матрица, полученная из ранее проведенных обследований. Максимизация $S(X)$ эквивалентна поиску матрицы X , наименее удаленной от X^0 и удовлетворяющая ограничениям на наблюдаемых потоках (1). Чем меньше ограничений учитывается, тем сильнее влияние априорных данных. Решая задачу, минимизируем X^0 , чтобы рассчитанные по X потоки на контрольных дугах совпали с измерениями. Этот подход применяется в транспортном моделировании и дает более точные оценки, чем стандартные методы, не использующие априорную информацию.

Abrahamsson T.⁷ предложил и обосновал метод определения матрицы корреспонденций посредством минимизации взвешенной суммы, рассчитанной и априорной матриц:

$$\min_{g, \hat{v}} [\lambda_1 F_1(g, \hat{g}) + \lambda_2 F_2(v, \hat{v})], \quad (4)$$

где $\hat{g}$ – априорная матрица, то есть таблица элементов межостановочной матрицы корреспонденций, полученная ранее при обследовании; $\hat{v}$ измеренные потоки, F_1, F_2 – метрики точности (энтропия, квадрат ошибки); λ_1, λ_2 – веса элементов матрицы. Функция $v = \text{assign}(g)$ реализует процедуру распределения пассажиропотоков по элементам дорожной сети.

Такой подход обеспечивает совместную обработку экспертных прогнозов и инструментальных наблюдений, повышая надежность расчетов в условиях неполных или зашумленных данных. При отсутствии стартовой матрицы применяется альтернативная стратегия, базирующаяся на типичных паттернах движения транспорта в исследуемой системе.

Если априорная матрица отсутствует, применяют методы, основанные на закономерностях распределения потоков по сети. До настоящего времени эти закономерности мало изучались, что объясняется отсутствием простых и дешевых методов обследования. Определение маршрутов из зоны i в зону j чрезвычайно важно, так как оно позволяет правильно определить размеры движения транспортных средств или пассажиропотоков. Это можно сделать путем расчета веса элементов в матрице $p_{ij}^a \in [0, 1]$, показывающей, какая часть корреспонденции g_{ij} использует определенную дугу a . Тогда восстановленный поток на дуге вычисляется как взвешенная сумма:

$$v_a = \frac{1}{R} \sum_{ij} p_{ij}^a g_{ij}, a \in A, \quad (5)$$

где R – фактор, учитывающий, что одна корреспонденция может проходить через несколько дуг. Это соотношение задает функция распределения $\text{assign}(g)$.

Учитывая, что при помощи веса элементов в матрице не представляется возможным определить равновесное распределение Fisk C.⁸ предложил комбинированную модель

$$\sum_{ij} g_{ij} (\ln(g_{ij}) - 1). \quad (6)$$

В формуле (6) показано распределение корреспонденций g_{ij} по альтернативным

⁷ Abrahamsson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey. IIASA Interim Report. IIASA, Laxenburg, Austria: IR-98-02 (1998).

⁸ Fisk C. S. Trip matrix estimation from link traffic counts: The congested network case, Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier, vol. 23(5), pages 331-336, October 1989. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90010-0).

маршрутам h_{ijk} без изменения общего объема перевозок между зонами i и j . Интенсивность движения на звеньях сети $\hat{v}_a$ выводится как линейная комбинация маршрутных потоков h_{ijk} , где в качестве множителей выступают веса p_{ijk}^a , характеризующие участие конкретного пути k в формировании потока на участке a . Равновесное условие записывается в виде вариационного неравенства

$$C(h) \times (f - h) \geq 0, \quad (7)$$

где $C(h)$ – вектор стоимости передвижения, зависящий от сетевой загрузки, а f – вектор допустимых потоков. Это позволяет оценивать матрицу корреспонденций по данным потоков на дугах с учетом влияния загрузки сети на выбор маршрута, что является важным шагом в развитии методов восстановления OD-матриц.

На смену энтропийным методам были предложены модели Farhangian и LeBlanc⁹. В их подходе задача оценки матрицы корреспонденций формулируется как минимум квадрата отклонения восстановленной матрицы $g = \{g_{ij}\}$ от некоторой априорной оценки $\hat{g}$, при этом ограничения включают условия равновесного распределения потоков по сети (аналогичные задаче (6)).

Целевая функция имеет вид

$$\min_{g \geq 0} \sum_{ij} (g_{ij} - \hat{g}_{ij})^2, \quad (8)$$

где g_{ij} – априорная (исходная) матрица корреспонденций, например, полученная из предыдущих обследований или гравитационной модели. Критерий (8) требует, чтобы итоговая матрица g была как можно ближе к $\hat{g}$ в смысле суммы квадратов разностей (евклидовой нормы). Авторы рассматривают восстановление матрицы корреспонденций в рамках обобщенного метода наименьших квадратов. Предполагается, что имеются две группы данных, содержащие ошибки:

$$\hat{g} = g + n. \quad (9)$$

Априорная матрица $\hat{g}$ является истинной матрицей g , искаженной аддитивной ошибкой n (из-за погрешностей оценок, не репрезентативности выборки).

$$\hat{v} = v(g) + e. \quad (10)$$

Наблюдаемые потоки на дугах сети (с датчиков «Луч-М») равны сумме потоков $v(g)$, порождаемых истинной матрицей g через функцию распределения $\text{assign}(g)$, и ошибки измерений e (шумы датчиков, потери данных при передаче по GPRS).

Ошибки n и e предполагаются случайными с нулевыми средними и известными ковариационными матрицами (в простейшем случае – некоррелированными с постоянной дисперсией). Тогда GLS-оценка минимизирует взвешенную сумму квадратов невязок, а при равных весах и независимости – сводится к (8) плюс дополнительное слагаемое, учитывающее невязку по потокам. В исходной формулировке невязка по потокам включается в ограничения равновесного распределения, а не в целевую функцию.

Наиболее общая и теоретически обоснованная форма такой оценки дается обобщенным методом наименьших квадратов. Соответствующая оптимизационная задача имеет вид

$$\min \left[\frac{1}{2} (\hat{g} - g)' Z^{-1} (\hat{g} - g) + \frac{1}{2} (v - v(g))' W^{-1} (v - v(g)) \right], \quad (11)$$

где g – искомая матрица корреспонденций (переменная оптимизации); $\hat{g}$ – априорная (исходная) матрица, полученная до проведения измерений; $\hat{v}$ – вектор измеренных потоков на дугах сети;

$v(g)$ – значения потоков, полученные в результате сетевого распределения на основе матрицы g ; Z – ковариационная матрица погрешностей начального приближения $\hat{g}$; W – матрица, характеризующая точность замеров интенсивности движения $\hat{v}$.

Матрицы Z и W выполняют функцию весовых коэффициентов: Z – определяет, насколько сильно отклонение $\hat{g} - g$ влияет на целевую функцию. Если какой-либо элемент g_{ij} известен с высокой точностью, то соответствующая компонента Z^{-1} велика, и решение будет стремиться сохранить этот элемент близким к $\hat{g}_{ij}$. Напротив, если точность низкая, штраф за отклонение будет небольшим.

W – аналогично управляет вкладом невязки между модельными и измеренными потоками. Если измерение $\hat{v}$ очень надежно, то алгоритм будет требовать точного совпадения

⁹ LeBlanc L.J. and Farhangian K., Selection of a trip table which reproduces observed link flows, Transportation Research 16B, 1982. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(82\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(82)90041-0)

$v(g)$ с $\hat{v}$. Если же измерение зашумлено, допускается большее расхождение.

Для расчета (11) необходимо произвести оценку или искусственно задать Z и W . Существует несколько подходов к определению Z :

- на основе выборочных исследований¹⁰ (натурные обследования, отчетно-статистические, автоматизированные). При этом вычисленные значения подставляются в Z ;
- параметрические модели. Если выборочные данные отсутствуют, часто полагают Z диагональной, а ее диагональные элементы задают пропорционально самим значениям $\hat{g}_{ij}$. Такая модель соответствует предположению о пуассоновском распределении ошибок;
- экспертные оценки. В некоторых случаях значения дисперсий назначаются на основе опыта или технических характеристик метода получения $\hat{g}$ (например, если $\hat{g}$ получена из гравитационной модели с известной погрешностью);
- итеративное оценивание. В более сложных алгоритмах Z уточняется в процессе решения задачи (11) совместно с g .

Матрица W описывает точность измерений потоков $\hat{v}$. На практике наиболее распространенные варианты:

- диагональная матрица – поскольку ошибки на разных дугах обычно считаются независимыми, W задают диагональной. Тогда каждый диагональный элемент W равен дисперсии ошибки измерения на дуге a ;
- единичная матрица – если отсутствует информация о погрешностях измерений, часто принимают $W=I$ (все дисперсии равны 1). Это означает, что все измерения считаются одинаковыми, и веса не используются. Такой подход является простейшим, но не всегда оптимальным;
- использование данных оборудования. Если известны технические характеристики оборудования приборов, можно задать дисперсию как функцию от измеренной величины: $W_a = \sigma_a^2$, где σ_a – стандартная погрешность датчика на дуге a ;
- оценка по повторным замерам.

Важным этапом разработки модели является обоснованный выбор оптимизационных подходов. При мониторинге пассажиропотоков с использованием инфракрасных датчиков возникают погрешности, которые отмечены в технической документации оборудования. Для

оценки матрицы корреспонденций ГПТ ОП в работе предлагается применить оптимизационный подход, включающий робастный метод.

Альтернативным вариантом методу наименьших квадратов является метод наименьших модулей – минимизация суммы абсолютных модулей (МНМ). Оценка этого метода менее чувствительна к выбросам, поскольку рост абсолютного отклонения происходит линейно, его и предлагается применить к поставленной задаче. Необходимо продолжить исследования, так как за последние несколько десятилетий наблюдался стремительный технологический прогресс в области автоматического сбора и обработки данных, что привело к появлению больших архивов транзакционных данных. Многие отрасли претерпели фундаментальные преобразования в том, как они ведут бизнес после тщательного изучения влияния современных технологических процессов, которые позволяют максимально использовать новые возможности. Отрасль общественного транспорта отстает от многих других в использовании потенциала в области информационных технологий. Этот процесс масштабируется и подходит для внедрения в качестве автоматизации в производственную среду. Полученная таким образом матрица корреспонденций может обеспечить надежную основу для принятия решений различными транспортными ведомствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно подходу, описанному в работе [15], задача восстановления вектора корреспонденций $x \in R^m$, где m – число пар остановок или маршрутов, по измерениям пассажиропотоков $y \in R^n$, где n – число остановочных пунктов, на которых зафиксированы вход/выход пассажиров, может быть сформулирована как минимизация суммы абсолютных невязок. Формально:

$$\min \sum_{i=1}^n |e_i|, \quad e_i = y_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j. \quad (12)$$

Для приведения исходной системы ограничений к виду, удобному для применения различных методов, в каждое ограничение-равенство или неравенство вводятся неотрицательные искусственные переменные $g_i, h_i \geq 0$. После этого задача записывается в стандартной форме линейного программирования, где

¹⁰ Cascetta E., Nguyen S.: A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. Transp. Res. Part B Methodol. 22(6), 437–455 (1988). [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(88\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0191-2615(88)90024-0)

все ограничения-равенства, все переменные неотрицательны, а целевая функция дополняется штрафным слагаемым, обеспечивающим стремление искусственных переменных к нулю. Такое преобразование позволяет найти начальное допустимое базисное решение и затем получить оптимальное решение исходной задачи:

$$\min \sum_{i=1}^n (g_i + h_i).$$

При $Ax + g - h = y, x \geq 0, g \geq 0, h \geq 0$.

Вариативность математических методов, которыми возможно решить задачу линейной оптимизации – наименьших модулей (12) при восстановлении матрицы корреспонденций с использованием пакетов NumPy и SciPy языка программирования PYTHON, достаточно велика, рассмотрим те, что непосредственно включены в программное приложение:

Алгоритм внутренней точки относится к методам поиска оптимального решения в транспортных задачах, способного производить вычисления с неточными данными, которые последовательно приближаются к оптимальному решению, имея полиномиальную оценку сходимости, но требует задания начального приближения строго внутри области, и, может быть, трудозатратен при восстановлении плотных матрицах за счет низкой скорости вычислений.

Симплекс-метод достаточно прост в реализации, эффективен при решении задач среднего размера, размерность которых не превышает нескольких тысяч переменных – алгоритм линейного программирования оптимизирует значение целевой функции на каждой итерации. Однако неэффективен для сильно разреженных задач специальной структуры, к которым и относятся матрицы корреспонденций. При росте размерности имеет смысл переходить на highs-ipm или общий интерфейс highs.

Ревизионный симплекс-метод – модифицированная версия классического симплекс-метода, которая работает только с существенной информацией: базисной матрицей, обратной к ней и текущим решением. Вместо хранения и пересчета всей симплекс-таблицы на каждой итерации ревизионный метод сохраняет: базисную матрицу; текущее базисное решение, вектор относительных оценок (редуцированных стоимостей) для небазисных переменных. Все необходимые вычисления производятся без явного построения полной таблицы. За счет этого требуется меньше операций с пол-

ными матрицами, чем классический симплекс, подходит для больших задач (сотни-тысячи переменных), но сложнее в программной реализации и может страдать от заикливания, для очень крупных задач (миллионы переменных) уступает методам внутренней точки.

В отличие от классических реализаций высокопроизводительный метод внутренней точки highs-ipm решает системы через прямую факторизацию, динамически выбирая нормальные уравнения или расширенную систему. Применение факторизации позволяет достичь достаточно высокую производительность на разреженных задачах, а регуляризация дает возможность стабильной работы при использовании разномасштабных данных (пересекающихся маршрутов, корреспондирующих пар остановочных пунктов или районов, недостаточное количество наблюдений для получения выборки). При внедрении метод внутренней точки демонстрирует корреляцию между временем решения и размерностью задачи, но не поддерживает возможность использовать предыдущие варианты решения или его приближение в качестве начальной точки для другой задачи.

Интерфейс highs-ds – это высокопроизводительный двойной симплекс-метод, реализованный в виде отдельного решателя с поддержкой параллельных вычислений через прикладное программирование (API). Используя библиотеки для матричных вычислений, которые поддерживают стандарт OpenMP (numpy, scipy), и применяя техники ускорения сходимости, такие как стратегия выбора веса ребер, позволяющую осуществить выбор метода, влияющий на скорость и надежность сходимости; предварительная обработка для упрощения задачи, что также сокращает время решения; способность использовать оптимальную базисную матрицу из предыдущего варианта в качестве начальной точки. Это позволяет получить преимущество при решении задач, которые незначительно отличаются друг от друга при параметрическом анализе, изменении коэффициентов целевой функции, изменении границ, ограничений или переменных.

Автоматический выбор highs производится за счет оценки таких параметров, как размерность задачи, разреженность матрицы ограничений, наличие целочисленных переменных. К преимуществам относят: пользователю не требуется глубокое знание внутренних алгоритмов решателя; универсальность – единый интерфейс для задач линейного, смешан-

но-целочисленного и квадратичного программирования. К ограничениям можно отнести невозможность напрямую влиять на выбор метода или его настройки, так как автоматический выбор не всегда может быть идеальным для конкретной, нестандартной задачи. Он подходит для большинства стандартных сценариев и делает оптимизацию доступной, не требуя глубоких знаний в области вычислительных методов.

Рассмотрим пользовательский интерфейс разработанного программного приложения восстановления матрицы корреспонденций на основе данных входа/выхода (рисунок 2). В левой боковой панели представлено меню параметров: ввод исходных данных; настройка гравитационной модели; настройка робастной модели; вывод данных (выходные данные).

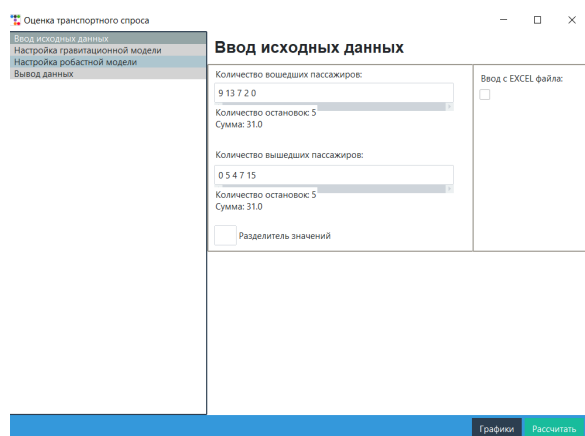


Рисунок 2 – Интерфейс программного окна «ввод исходных данных»¹¹

Figure 2 – Input data window interface¹¹

Существует два основных поля ввода данных – количество вошедших/вышедших пассажиров: этот раздел позволяет пользователю вводить данные о количестве пассажиров, совершающих посадку/высадку на остановочных пунктах. Для ввода предусмотрено текстовое поле. Предусмотрено введение данных как вручную, так и с импортом информации из Microsoft Excel.

На рисунке 3 приведен интерфейс программного окна «настройка гравитационной

модели». В программном приложении предложен простой, но функциональный интерфейс, предназначенный для настройки и запуска моделирования гравитационной модели. Пользователь может настроить количество итераций, точность и указать выходные диапазоны.

Программный интерфейс состоит из полей, которые позволяют задать параметры для моделирования гравитационной модели: количество итераций, которые будет выполнять модель; точность (процент погрешности); вывод гравитационной модели (диапазон итераций для отображения или сохранения данных).

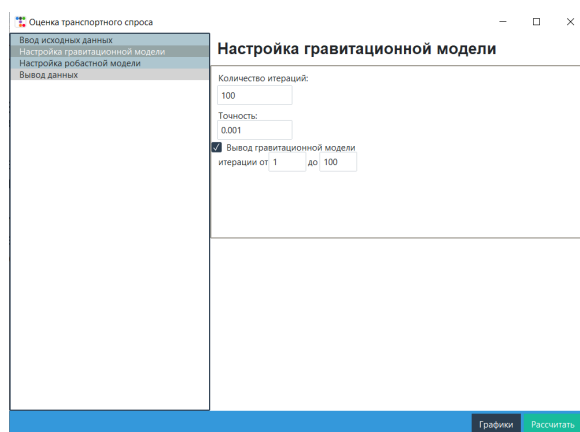


Рисунок 3 – Интерфейс программного окна «настройка гравитационной модели»¹²

Figure 3 – Gravity model setup window interface¹²

На рисунке 4 приведен пример интерфейса программного окна «настройка робастной модели» с примером ввода значений. Центральная часть интерфейса отображает настройки «робастной модели». Выпадающее меню «метод расчета» позволяет осуществить выбор алгоритма, с помощью которого будет проведено определение матрицы корреспонденций. После выбора метода программное обеспечение выполнит расчеты и отобразит результаты в основной области. Используемые в приложении методы относятся к передовым оптимизационным решениям.

¹¹ Кулакова И.М., Лебедева О.А., Ерофеев Е.В. Оценка транспортного спроса с применением матричных моделей: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025610798; правообладатель ФГБОУ ВО «АНГТУ»; заявка № 2024691673; дата рег. 14.01.2025. Ангарск, 2023. 1 с.

¹² Кулакова И.М., Лебедева О.А., Ерофеев Е.В. Оценка транспортного спроса с применением матричных моделей. ... 2023. 1 с.

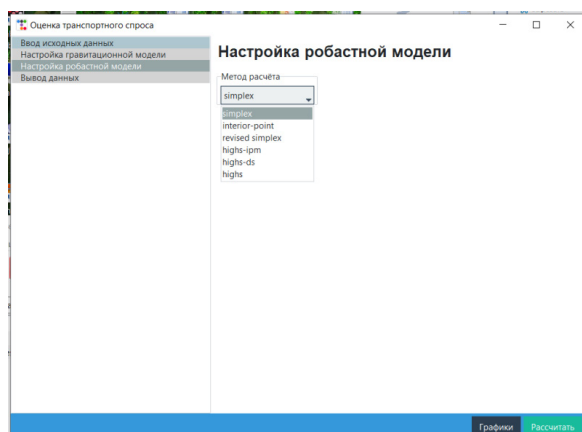


Рисунок 4 – Интерфейс программного окна «настройка робастной модели»¹³

Figure 4 – Robust model setup window interface¹³

Большое число работ по моделированию транспортных систем, а также наличие различных подходов к разработке и использованию моделей делают настоятельно необходимой задачу их содержательного сравнения и оценки. Естественно, было бы нереально предпринимать попытку анализа всех аспектов моделирования, поэтому в данной работе основное внимание уделено моделям определения матрицы пассажирских корреспонденций, а также различным аспектам моделирования – выбор критериев оптимальности, информационное обеспечение моделей для определения наиболее перспективных методов моделирования. Исходная информация о функционировании системы управления ГПТ ОП поступает по контуру обратной связи в реальном масштабе времени. Время расчета ограничено достаточно жестко. С учетом этой особенности представляется целесообразным идти по пути разработки самостоятельных моделей для задач планирования и управления.

В процессе тестирования разработанного программного обеспечения были апробированы различные методы решения поставленной задачи. В соответствии с предложенной методикой производилась: подготовка исходных данных, – используя технические средства для автоматизации определения величины входа и выхода пассажиров на каждой остановке, производилась фиксация этой информации в базе данных. Исходный набор данных приводился к виду суточных объемов посадки и высадки по каждому пункту. Далее проводилась

калибровка матрицы корреспонденций через гравитационный подход. На завершающем этапе сопоставлялись эталонная и смоделированная матрицы, после чего рассчитывалась величина среднеквадратичного отклонения (RMSE) для оценки точности модели.

Полученные результаты позволили выявить погрешности технического оборудования и обосновать необходимость перехода к робастным оптимизационным методам, которые менее чувствительны к выбросам и неточностям измерений. Дополнительно в программной реализации возможно внесение корректировок в начальные параметры гравитационной модели (точность).

При тестировании программного приложения был сделан вывод, что для расширения оценки невязки возможно выполнить доработку приложения включающую оценку точности путем применения различных метрик качества (среднеквадратическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, средняя абсолютная процентная ошибка); доработка должна учитывать наличие или отсутствие предварительной фильтрации зашумленных значений пассажиропотока. Такой подход позволит не только сравнить точность расчетов, но и выявить систематические ошибки, вносимые моделью, что важно для дальнейшей робастной оптимизации.

В рамках тестирования разработанной программной реализации в качестве эмпирической базы исследования выступил городской пассажирский маршрут, состоящий из 29 остановочных пунктов. В ходе суточного мониторинга для каждой точки маршрута регистрировались фактические показатели посадки и высадки пассажиров. Матрица корреспонденций размером 29×29 была построена на основе выборочных обследований и данных автоматического подсчета. Задача восстановления матрицы корреспонденций решалась шестью различными методами оптимизации, доступными в библиотеке HiGHS и классическом симплекс-методе. По результатам теста метод ревизии (RMSE =6,114) и метод внутренней точки (RMSE =6,471) дают схожие результаты, а simplex, highs-ds, highs-ipm и highs – большую среднеквадратическую ошибку (от 22,267 до 44,025). Разница между RMSE для revised simplex и interior point составляет всего 0,357 (менее 6% от меньшего значения). Это указывает на то, что оба метода дают стати-

¹³ Там же.

стически неразличимую точность восстановления матрицы корреспонденций. С практической точки зрения они взаимозаменяемы. Такая точность вполне достаточна для большинства практических примеров. Значения RMSE для simplex, highs-ds, highs-ipm и highs в 4–7 раза выше, чем у лидеров. Такое резкое ухудшение не является случайным и объясняется свойствами данных. Высокая чувствительность стандартных симплексных и высокопроизводительных HiGHS-реализаций к шумам измерений делает их неприменимыми, тогда как модифицированный симплекс-метод и классический метод внутренней точки (с корректной настройкой) дают удовлетворительную точность ($RMSE \approx 6,1\text{--}6,5$). Полученные результаты служат основой для дальнейшего внедрения робастных подходов, в которых неопределенность входных данных учитывается на уровне постановки задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В заключении хочется отметить, что все задачи, поставленные в исследовании, достигнуты.

Выполнена реализация алгоритмов гравитационной и робастной моделей для восстановления матриц корреспонденций на языке Python с использованием библиотек NumPy и SciPy, что является актуальным направлением в современном транспортном моделировании. Выбор Python обусловлен наличием специализированных библиотек, высокой вычислительной эффективностью благодаря векторизации, гибкостью в настройке функций затухания и встроенными механизмами обеспечения сходимости и робастности алгоритмов.

Расчет межостановочных матриц корреспонденций и оценка их точности выполнялись на реальных данных. Практическим итогом исследования стало создание программного модуля на Python, предназначенного для анализа данных пассажиропотоков. Данный инструмент обеспечивает автоматизированный расчет показателей, опираясь на статистику посадки и высадки в транспортном средстве на каждой остановке маршрута. Определить при помощи программной реализации матрицу корреспонденций значительно быстрее, с повышенной достоверностью при сравнительно низкой стоимости и трудоемкости обследования. Предлагаемая система обработки информации о пассажиропотоках может быть использована как в условиях получения первичной информации вручную при

помощи учетчиков, так и в условиях автоматической регистрации информации о входе и выходе пассажиров при помощи технических средств для эффективного функционирования работы городской транспортной системы, получения данных о пассажирообмене, оперативного внесения корректировок в расписание и интервалы движения городского транспорта, снижения времени и стоимости планировочных решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тишкова А.О., Паршакова К.А., Бондаренко Н.С. [и др.]. Устойчивость городской пассажирской автотранспортной системы // *Транспорт Урала*. 2025. № 1 (84). 72–77. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-72-77>
2. Зайцев И.А. Научно-практические аспекты формирования маршрутной сети пассажирского сообщения // В сборнике: *Фундаментальная и прикладная наука: научно-методические и практические аспекты. Сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции*. Анапа, 2025. С. 16–22. <https://doi.org/10.57112/2523-2523-2025-4-16-22>
3. Пумбрасова Н.В., Упадышева Е.В. Повышение эффективности пассажирских перевозок в условиях применения инновационных систем управления транспортными потоками // *Научные проблемы водного транспорта*. 2023. № 77. С. 183–198. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.412>
4. Обшивалкин М.Ю., Епифанов В.В., Генералова К.А. К вопросу удовлетворенности пассажиров качеством перевозок на муниципальном транспорте // В сборнике: *Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта. Сборник научных трудов по материалам 83-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ*. М., 2025. С. 24–29. <https://doi.org/10.31992/978-5-7996-2025-24-29>
5. Коновалова Т.В., Рассоха В.И., Лебедев Е.А., Миротин Л.Б., Надирян С.Л., Соскова В.В. Автоматизированная система построения матрицы пассажирских корреспонденций населения на примере г. Краснодара // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2024. № 12. С. 40–46. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-12-40-46>
6. Штукатурова Е.С., Якунин Н.Н. Гравитационные модели в оценке транспортного спроса пригородных пассажирских перевозок: теоретические основы, методы применения // В сборнике: *Прогрессивные технологии в транспортных системах. Материалы XX Международной научно-практической конференции*. Оренбург, 2025. С. 415–420. https://doi.org/10.51915/9785741033456_415
7. Мартыненко А.В., Сайфутдинов Д.Ж. Адекватность гравитационной модели для железнодорожных пассажиропотоков // *Мир транспорта*. 2023. Т. 21, № 1 (104). С. 75–86. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-9>

8. 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>
9. Корчагин Д.С., Поморцев Д.В., Евтюков С.С. Интеллектуальный анализ данных о маршрутной сети городского общественного пассажирского транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-2 (90). С. 116–125. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)-116-125](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-116-125)
10. Булычева Н.В., Лосин Л.А. Роль информационного обеспечения в моделях прогнозирования потоков пассажиров и транспорта // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2023. № 3 (74). С. 97–104. <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2023-3-97-104>
11. Лосин Л.А. Исследование сходимости матриц межрайонных корреспонденции в гравитационной модели // В сборнике: Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем. Сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 2024. С. 62–68. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2024.83.006>
12. Ахромешин А.В., Пышный В.А. Применение гравитационного подхода к решению транспортных задач // Техника и технология транспорта. 2024. Т. 32, № 1. <https://doi.org/10.52151/2311-0678-2024-32-1-14>
13. Швецова Е.В., Шуть В.Н. Алгоритм организации перевозок на основе критического элемента матрицы корреспонденций // Транспорт Урала. 2023. № 2 (77). С. 34–40. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-34-40>
14. Leurent F., Sun D., Xie X. On heterogeneous sampling rates in origin–destination matrix estimation based on trajectory data and link counts // Transportation Research Record. 2023. Т. 2677. № 1. С. 1169–1180. <https://doi.org/10.1177/03611981221105051>
15. Lu C.-C., Zhou X., Zhang K.: Dynamic origin–destination demand flow estimation under congested traffic conditions. Transp. Res. Part C Emerging Technol. 34, 16–37 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.05.006>
16. Maher M.J., Zhang X., Van Vliet D.: A bi-level programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows. Transp. Res. Part B Methodol. 35(1), 23–40 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(00\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(00)00017-5)
17. Yang X., Lu Y., Hao W.: Origin-destination estimation using probe vehicle trajectory and link counts. J. Adv. Transp. (2017). <https://doi.org/10.1155/2017/4341532>
18. Vahidi M., Shafahi Y. Time-dependent estimation of origin–destination matrices using partial path data and link counts // Transportation. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11116-023-10385-z>
19. Balakrishna R., Ben-Akiva M., Koutsopoulos H.N.: Time-dependent origin-destination estimation without assignment matrices. Transp. Simul. Beyond Tradit. Approaches (2019). <https://doi.org/10.1201/9780429093258-12>
20. Barceló J., Montero L., Bulles M., Serch O., Carmona C.: A kalman filter approach for exploiting bluetooth traffic data when estimating time-dependent od matrices. J. Intell. Transp. Syst. 17(2), 123–141 (2013). <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.764793>

REFERENCES

1. Tishkova A.O., Parshakova K.A., Bondarenko N.S. i dr. Ustojchivost' gorodskoj passazhirskoj avtotransportnoj sistemy. *Transport Urala*. 2025. № 1 (84). 72–77. (in Russ.) <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2025-1-72-77>
2. Zajcev I.A. Nauchno-prakticheskie aspekty formirovaniya marshrutnoj seti passazhirskogo soobshcheniya // V sbornike: Fundamental'naya i prikladnaya nauka: nauchno-metodicheskie i prakticheskie aspekty. Sbornik nauchnyh trudov po materialam IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Anapa, 2025. S. 16–22. (in Russ.) <https://doi.org/10.57112/2523-2523-2025-4-16-22>
3. Pumbasova N.V., Upadysheva E.V. Povyshenie effektivnosti passazhirskih perevozok v usloviyah primeneniya innovacionnyh sistem upravleniya transportnymi potokami. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*. 2023. № 77:183–198. (in Russ.) <https://doi.org/10.37890/jwt.vi77.412>
4. Obshivalkin M.YU., Epifanov V.V., Generalova K.A. K voprosu udovletvorennosti passazhirov kachestvom perevozok na mezhmunicipal'nom transporte // V sbornike: Aktual'nye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta. Sbornik nauchnyh trudov po materialam 83-j mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoj konferencii MADi. Moskva, 2025. S. 24–29. (in Russ.) <https://doi.org/10.31992/978-5-7996-2025-24-29>
5. Konovalova T.V., Rassoha V.I., Lebedev E.A., Mirotn L.B., Nadiyan S.L., Soskova V.V. Avtomatizirovannaya sistema postroeniya matricy passazhirskih korrespondencij naseleniya na primere g. Krasnodara. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik*. 2024. № 12. S. 40–46. (in Russ.) <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-12-40-46>
6. Shtukaturova E.S., Yakunin N.N. Gravitacionnye modeli v ocenke transportnogo sprosa prigorodnyh passazhirskih perevozok: teoreticheskie osnovy, metody primeneniya // V sbornike: Progressivnye tekhnologii v transportnyh sistemah. Materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Orenburg, 2025. S. 415–420. (in Russ.) https://doi.org/10.51915/9785741033456_415
7. Martynenko A.V., Sajfutdinov D.ZH. Adekvatnost' gravitacionnoj modeli dlya zhelezнодорожных passazhiropotokov. *Mir transporta*. 2023. Т. 21. № 1 (104). S. 75–86. (in Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-9>
8. Fadeev A.I., Il'yankov A.M., Ukaderov V.V. Raspredelenie korrespondencij po seti v zadachah proektirovaniya perevozok gorodskim passazhirskim transportom obshchego pol'zovaniya. *Vestnik Sibirsk-*

ogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2023. T. 20. № 3 (91). S. 362-386. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

9. Korchagin D.S., Pomorcev D.V., Evtyukov S.S. Intellektual'nyy analiz dannyh o marshrutnoy seti gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2025. № 3-2 (90). S. 116-125. (in Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)-116-125](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)-116-125)

10. Bulycheva N.V., Losin L.A. Rol' informacionnogo obespecheniya v modelyakh prognozirovaniya potokov passazhirov i transporta. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya*. 2023. № 3 (74). S. 97-104. (in Russ.) <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2023-3-97-104>

11. Losin L.A. Issledovanie skhodimosti matric mezhrajonnykh korrespondencii v gravitacionnoy modeli // V sbornike: Problemy preobrazovaniya i regulirovaniya regional'nykh social'no-ekonomicheskikh sistem. Sbornik nauchnykh trudov. Sankt-Peterburg, 2024. S. 62-68. (in Russ.) <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2024.83.006>

12. Ahromeshin A.V., Pyshnyj V.A. Primenenie gravitacionnogo podhoda k resheniyu transportnykh zadach. *Tekhnika i tekhnologiya transporta*. 2024. T. 32. № 1. (in Russ.) <https://doi.org/10.52151/2311-0678-2024-32-1-14>

13. Shvecova E.V., SHut' V.N. Algoritmi organizatsii perevozok na osnove kriticheskogo elementa matricy korrespondencii. *Transport Urala*. 2023. № 2 (77). S. 34-40. (in Russ.) <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-2-34-40>

14. Leurent F., Sun D., Xie X. On heterogenous sampling rates in origin-destination matrix estimation based on trajectory data and link counts. *Transportation Research Record*. 2023. T. 2677. № 1. S. 1169-1180. <https://doi.org/10.1177/03611981221105051>

15. Lu C.-C., Zhou X., Zhang K.: Dynamic origin-destination demand flow estimation under congested traffic conditions. *Transp. Res. Part C Emerging Technol.* 34, 16–37 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.05.006>

16. Maher M.J., Zhang X., Van Vliet D.: A bi-level programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows. *Transp. Res. Part B Methodol.* 35(1), 23–40 (2001). [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(00\)00017-5](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(00)00017-5)

17. Yang X., Lu Y., Hao W.: Origin-destination estimation using probe vehicle trajectory and link counts. *J. Adv. Transp.* (2017). <https://doi.org/10.1155/2017/4341532>

18. Vahidi M., Shafahi Y. Time-dependent estimation of origin-destination matrices using partial path data and link counts. *Transportation*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11116-023-10385-z>

19. Balakrishna R., Ben-Akiva M., Koutsopoulos H.N.: Time-dependent origin-destination estimation without assignment matrices. *Transp. Simul. Beyond Tradit. Approaches* (2019). <https://doi.org/10.1201/9780429093258-12>

20. Barceló J., Montero L., Bulles M., Serch O., Carmona C.: A kalman filter approach for exploiting bluetooth traffic data when estimating time-dependent od matrices. *J. Intell. Transp. Syst.* 17(2), 123–141 (2013). <https://doi.org/10.1080/15472450.2013.764793>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Михайлов А. Ю. Разработка методики проведения исследований.

Лебедева О.А. Обработка статистических данных, моделирование пассажиропотоков.

Ерёмина И.М. Выбор среды обработки, редактирование материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Mikhailov A. Yu. Development of the research methodology.

Lebedeva O. A. Processing statistical data, passenger flow modeling.

Eremina I.M. Selection of processing environment, editing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михайлов Александр Юрьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Автомобильный транспорт и строительно-дорожные машины» Иркутского национального исследовательского технического университета (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

SPIN-код: 2498-7773,

Author ID: 385530,

Scopus ID: 57193751842,

e-mail: mikhaylovay@gmail.com

Лебедева Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Управление на автомобильном транспорте» Ангарского государственного технического университета (665835, г. Ангарск, квартал 85а, д.5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3571-4065>,

SPIN-код: 4860-2344,

Author ID: 675968,

Scopus ID: 57193747564,

e-mail: kravhome@mail.ru

Ерёмина Ирина Михайловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильный транспорт и строительно-дорожные машины» Ангарского государственного технического университета (665835, г. Ангарск, квартал 85а, д.5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9031-0245>,

SPIN-код: 8864-3549,

Author ID: 680795,

Scopus ID: 57221051522,

e-mail: iyelkina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhailov Alexander Yu. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Motor Transport and Road Construction Machinery, Irkutsk National Research Technical University (IRNTU) (83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Irkutsk region).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1946-0659>,

SPIN-code: 2498-7773,

Author ID: 385530,

Scopus ID: 57193751842,

e-mail: mikhaylovay@gmail.com

Lebedeva Olga A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Road Transport Management, Angarsk State Technical University (5 block 85a, Angarsk, Irkutsk region, 665835).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3571-4065>

SPIN-code: 4860-2344

Author ID: 675968

Scopus ID: 57193747564

e-mail: kravhome@mail.ru

Eremina Irina M. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computing machines and complexes, Angarsk State Technical University (665835, Irkutsk region, Angarsk, block 85a, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9031-0245>,

SPIN-code: 8864-3549,

Author ID: 680795,

Scopus ID: 57221051522,

e-mail: iyelkina@mail.ru