

Научная статья
УДК 656.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>
EDN: QXJVIP



АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Ю.А. Колебер

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
uljachabol@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Системы пассажирских перевозок крупных городов характеризуются большими масштабами развития, динамичностью и высоким уровнем неопределённости. Их функционирование носит двойственный характер: с одной стороны, они должны обеспечивать потребности населения в передвижениях с сохранением достаточного уровня качества транспортного обслуживания населения, с другой стороны, вносить вклад в развитие экономики города, региона, страны. Всё это определяет необходимость как оперативного, так и стратегического контроллинга городских пассажирских перевозок, который включает в себя, в частности, оценку результативности. Такая оценка необходима специалистам в области транспорта для формирования системы мер и воздействий, направленных на улучшение процессов внутри системы.

Материалы и методы. Нечеткая логика широко применяется в настоящее время для решения управленческих задач, в частности, для оценки функционирования сложных процессов и систем. Она позволяет выводить интегральные значения на основе большого количества разнородных исходных данных, учитывая многомерность системы.

Результаты. Сформирован алгоритм оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования, основанный на положениях теории нечёткой логики. Предложенный алгоритм позволяет определять результативность транспортного процесса по нескольким направлениям: в рамках отдельного показателя, по блокам (областям) оценки результативности, для каждого участника и для всей системы в целом. Новизна исследования заключается в том, что в процессе реализации алгоритма нечёткой логики предложен новый механизм нечеткого вывода, сочетающий простоту реализации и эффективность расчета.

Обсуждение и заключение. Сформированный алгоритм позволит специалистам в области транспорта оперативно осуществлять оценку, выявлять «слабые» места развития системы и своевременно принимать меры по их устранению. Научная ценность исследования заключается в формировании научных положений по расчету результативности сложных систем с использованием положений теории нечеткой логики. Сформированный алгоритм реализуется в специально созданном для целей исследования программном обеспечении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм, оценка результативности, система городского пассажирского транспорта общего пользования, нечеткая логика

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность анонимным рецензентам и своему научному руководителю Мочалину Сергею Михайловичу, д-ру техн. наук, проф. Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета «СибАДИ» за научное консультирование и поддержку в ходе исследований.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Колебер Ю.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Колебер Ю.А. Алгоритм оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 416-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

EDN: QXJVIP

ALGORITHM FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS

Yuliya A. Koleber

Siberian State Automobile and Road University,

Omsk, Russia

uljachabol@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Passenger transportation systems in large cities are characterized by large-scale development, dynamism, and a high level of uncertainty. Their functioning is dual: on the one hand, they must meet the needs of the population for movement while maintaining a sufficient level of public transportation service quality; on the other hand, they must contribute to the development of the economy of the city, of the region, and of the country. All this determines the demand for both operational and strategic controlling of urban passenger transportation, which includes, in particular, performance assessment. Such evaluation is necessary for specialists in the field of transport to form a system of measures and actions aimed at improving processes within the system.

Materials and methods. Nowadays fuzzy logic is widely used to solve management problems, in particular, to estimate the functioning of complex processes and systems. It allows you to derivate integral values based on a large number of heterogeneous input data, taking into account the multidimensional nature of the system.

Results. The algorithm for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport systems based on the principles of fuzzy logic theory has been developed. The proposed algorithm makes it possible to determine the effectiveness of the transport process in several areas: within a single indicator, by blocks according to the areas, for each participant and for the entire system as a whole. The novelty of the research lies in the fact that in the process of implementing the fuzzy logic algorithm, a new fuzzy inference mechanism has been proposed combining simplicity of realization and calculation efficiency.

Discussion and conclusion. The developed algorithm will allow experts in the field of transport to conduct the assessment quickly: identify weak points in the development of the system and take timely measures to eliminate them. The scientific value of the research lies in the development of scientific principles for calculating the effectiveness of complex systems using the concepts of fuzzy logic theory. The generated algorithm is implemented in the software specially designed for research purposes.

KEYWORDS: algorithm; effectiveness evaluation; urban public passenger transport system; fuzzy logic

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses gratitude to the anonymous reviewers and to her supervisor, Sergey Mikhailovich Mochalin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University "SibADI", for his scientific consulting and support during the research.

The article was submitted: February 04, 2026; approved after reviewing: March 20, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Koleber Yu.A. Algorithm for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 416-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

© Koleber Yuliya A., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы городского пассажирского транспорта общего пользования (СГПТОП) в крупных и крупнейших городах имеют сложную структуру, разновекторные интересы участников, отличаются динамичным и стохастичным развитием. Социально-экономический характер системы определяет частичное расхождение и обособление целей ее участников: с одной стороны, существует необходимость обеспечения потребности населения в передвижениях с соблюдением качества транспортного обслуживания, с другой стороны, в транспортном процессе участвуют перевозчики, стремящиеся максимизировать свою прибыль. Значения показателей функционирования СГПТОП находятся в непрерывном изменении, поскольку зависят от множества факторов, таких как погодные условия, наличие транспортных заторов, уровень автомобилизации, нестабильность пассажиропотока и др. В связи с этим процесс управления данными системами требует формирования научно обоснованных механизмов, учитывающих перечисленные характеристики.

Одним из составляющих этапов процесса управления является контроль, включающий в себя оценку результатов развития системы. При этом оценка может быть как оперативной, так и итоговой, характеризующей результат в конце заданного отчетного периода (этапа). С научной точки зрения представляется целесообразным формирование такого механизма оценки результативности СГПТОП, который бы учитывал интересы каждого из ее участников, мог быть реализован в любой момент времени для обеспечения оперативности принятия решений в условиях постоянной нестабильности и неопределенности, а также учи-

тывал бы сложность внутренних процессов и соблюдение нормативных требований.

Научные вопросы оценки результатов работы городского пассажирского транспорта общего пользования достаточно подробно отражены в работах как отечественных, так и зарубежных ученых. В процессе развития методов оценки функционирования СГПТОП развивался понятийный аппарат: так, если раньше в работах рассматривались вопросы оценки качества^{1,2,3}, эффективности⁴ [1, 2], результативности [3, 4] (при этом зачастую одно понятие в смысловой интерпретации подменялось другим), то в настоящее время появляются исследования по оценке доступности [5, 6], привлекательности пассажирских услуг. В зарубежных исследованиях используется преимущественно понятие «качество», поскольку большой акцент сделан на улучшение условий транспортного обслуживания населения, включая, в частности, экологические и этические аспекты. Однако использование того или иного понятия должно отражать специфику научного исследования и используемые для оценки показатели. В работе [7] изучен понятийный аппарат оценки СГПТОП и приведены отличительные признаки указанных понятий. Самым емким понятием применительно к оценке работы транспортной системы является результативность, поскольку она, согласно [7, с. 148–149], включает в себя вопросы эффективности и качества транспортных услуг.

Существующие научные исследования отличаются также по набору используемых для оценки показателей. Наиболее часто в качестве параметров оценки учеными выбираются время пассажиров на передвижения⁵ [8], интервал движения подвижного состава,

¹ Славина Ю.А. Научно-практические методы оценки качества обслуживания населения городским наземным пассажирским транспортом: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: дис. ... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Славина Юлия Андреевна. Волгоград, 2015. 194 с.

² Спирин И.В. Научные основы комплексной реструктуризации городского автобусного транспорта: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис.... на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Спирин Иосиф Васильевич. Москва, 2007. 39 с.

³ Якунина Н.В. Методология повышения качества перевозок пассажиров общественным автомобильным транспортом: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис. ...на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Спирин Иосиф Васильевич. Оренбург, 2013. 32 с.

⁴ Сафронов Э.А. Транспортные системы городов, регионов: учебное пособие для вузов с грифом Министерства образования РФ. М.: Изд-во АСВ, 2007. 272 с.

⁵ Пышный В.А. Повышение эффективности городского автомобильного транспорта: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Пышный Владислав Александрович. Орел, 2013. 20 с.

его наполняемость⁶ [9], уровень пересадочности⁷. Некоторые авторы наиболее комплексно подошли к формированию перечня оцениваемых показателей. В работах [4, 10, 11, 12] предложены модели оценки СГПТОП, учитывающие и обрабатывающие целый комплекс показателей, в том числе с использованием информационных технологий и систем. Однако все указанные исследования учитывают только одного участника системы – пассажира. Новый подход к оценке функционирования СГПТОП предложен в работах [3, 13]. Авторы [13] предлагают методику управления качеством пассажирских перевозок, включающую как показатели, отражающие качество обслуживания пассажиров, так и учет показателей доходов и расходов перевозчиков. Авторы [3] формируют показатели результативности сразу для трех участников системы: пассажира, заказчика транспортных услуг и перевозчика. Такой подход отвечает требованиям системности и учета интересов всех участников городских пассажирских перевозок и взят за основу в настоящем исследовании.

Отличаются изученные работы с применяемыми методами оценки результативности комплексных систем. Наиболее распространены следующие методы оценки функционирования СГПТОП: оценка качества транспортного обслуживания населения с использованием функции желательности, основанной на психофизиологическом законе Вебера-Фехнера⁸; использование шкалы оценивания [14], расчет интегрального показателя путем нахождения среднего арифметического всех используемых параметров с применением весовых коэффициентов [10], использование гравитационной модели [15], квадрантный анализ [2, 4], метод MAGDM (многоуровневое принятие решений) с множественными критериями [16], интеграция метода комплексной пропорциональной оценки (COPRAS) и метода определения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) [17], метод индексного нормирования [18]. В настоящее время многими авторами применяются методы оценки сложных систем, основанные на положениях теории не-

четкой логики, которая позволяет определять промежуточные значения для общепринятых оценок: да – нет, ложь – истина, описывать нечеткие понятия и делать нечеткие выводы, выступая удобным инструментом управления сложными системами [19, с. 42–43]. Главным недостатком нечеткой логики является зависимость результата от выбора типа и вершин функций принадлежности при настройке параметров логического вывода. Однако СГПТОП в силу своей сложности, динамичности и зависимости от факторов неопределенности требует применения экспертного подхода для обеспечения гибкости и непрерывной настройки процесса под заданные (часто меняющиеся условия). К такой системе достаточно сложно применять четко формализованные методы. Нечеткая логика использована в работах [20, 21, 22, 23, 24] для комплексной оценки качества обслуживания пассажиров. Эти работы являются ценным исследованием в области формирования моделей интегральных оценочных показателей и взяты за основу для настоящего исследования.

Все представленные методы имеют свою специфику и внесли большой вклад в развитие науки в области комплексной оценки показателей работы СГПТОП. В то же время с научной точки зрения представляется актуальным формирование механизмов оценки результативности функционирования СГПТОП, которые бы учитывали одновременно следующие положения:

1. Учет интересов всех участников транспортного процесса и возможность оценки результативности для каждого из них отдельно.
2. Возможность оценки результативности для каждой из систем показателей, сформированных автором и представленных в исследовании [25, с. 72].
3. Возможность расчета результативности системы в рамках значений каждого отдельного показателя.
4. Возможность анализа и оценки достаточно большого набора сгруппированных показателей, представленных в исследовании [25].

⁶ Яценко С.А. Повышение эффективности городских пассажирских перевозок на основе применения оптимальной структуры парка / С.А. Яценко, А.С. Константинов, М.А. Матвеева // Совершенствование образования в области городского транспортного планирования: материалы Международной научно-практической конференции. Иркутск: Иркутский государственный технический университет. 2012 С. 86–90.

⁷ Нгуен Тхи Тху Хыонг. Повышение качества обслуживания населения г. Ханоя автобусными перевозками за счет совершенствования технологии и организации перемещения пассажиров: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис. ... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Нгуен Тхи Тху Хыонг. Волгоград, 2015. 20 с.

⁸ Мун Э.Е., Рубец А.Д. Оптимизация перевозок пассажиров маршрутными такси. М.: Транспорт, 1986.

5. Возможность как горизонтальной оценки (по периодам), так и вертикальной оценки (рейтинг результатов работы перевозчиков).

Целью настоящего исследования является формирование методики оценки результативности СГПТОП, одновременно учитывающей приведенные выше положения. Основными задачами в ходе достижения поставленной цели будут являться формирование адаптированной к специфике СГПТОП математической модели оценки результативности, а также построение алгоритма реализации методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

СГПТОП является сложной, многофункциональной системой с достаточно большим количеством взаимосвязей и характеризуется определенной неустойчивостью и динамичностью своего развития. Управление такой системой, включая оценку ее функционирования, должно базироваться на системном подходе, который предполагает баланс целей участников, соответствие текущих целей глобальной стратегической цели и охват всех областей функционирования системы. В настоящее время расширяются возможности применения средств моделирования для описания сложных систем и процессов. Для разработки таких средств используется неклассическая логика, основанная, в частности, на теории нечеткой логики⁹. Потенциал применения нечеткой логики достаточно велик в условиях неопределенности и нечеткости, характерных для социально-экономических систем, к которым относится также и СГПТОП.

Нечеткая логика представляет знания, основанные не на четкой принадлежности, как в классической бинарной логике, а на степенях принадлежности. Истинность в нечеткой логике заменяется многозначными множествами истинности, как правило, в интервале от 0 до 1. В процессе движения от 0 к 1 степень истинности возрастает [26].

Типовой механизм реализации управления системами на основе нечеткой логики представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовой механизм реализации управления на основе нечеткой логики
Источник: составлено автором на основе данных работы [29].

Figure 1 – Typical mechanism of control implementation based on fuzzy logic
Source: compiled by the author based on data from work [29].

На этапе фазификации для каждой входящей переменной (лингвистической переменной) задается терм-множество – множество всех возможных ее значений. Мера принадлежности значений лингвистической переменной заданному терм-множеству задается функцией принадлежности. Функция принадлежности определяет степень соответствия переменной истинности. Самыми распространенными функциями принадлежности являются треугольная функция, трапециевидная функция и гауссова функция. При использовании типового механизма на этапе фазификации рассчитываются функции принадлежности на основе четких исходных значений входящих переменных.

Треугольная функция принадлежности $\mu_j^A(x_i)$ рассчитывается по формуле (1)

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{m-a}, a < x < m \\ 1 - \frac{b-x}{b-m}, m < x < b \\ 0, x \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

где x_i – численное значение i -й входящей переменной;

a, m, b – это значения вершин функции принадлежности [19, с. 44].

⁹Титов А.В. О системном подходе к развитию общей теории управления и методов моделирования задач управления сложными системами // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2023): сборник научных трудов XVII Международной школы-симпозиума. К 105-летию ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», Симферополь-Судак, 14–27 сентября 2023 года. Симферополь: Индивидуальный предприниматель Корниенко Андрей Анатольевич, 2023. С. 413–418.

Трапецевидная функция принадлежности $(\mu_j^A(x_i))$ рассчитывается по формуле (2)

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, (x \leq a) \text{ or } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \end{cases}, \quad (2)$$

где a, b, c, d – это значения вершин функции принадлежности [19, с. 44].

Гауссова функция принадлежности $(\mu_j^A(x_i))$ рассчитывается по формуле (3)

$$\mu_j^A(x_i) = \exp \left[-\left(\frac{x-m}{\varphi} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где m – это центральное/среднее значение нечеткого множества;

φ – коэффициент, задающий ширину функции принадлежности [19, с. 45].

Вершины функций принадлежности определяются на основе экспертных оценок в зависимости от целей получения результата. Если каждый j -й эксперт определит границы интервала значений вершин для функций принадлежности $[a_j; b_j]$, то для трапецевидной функции принадлежности итоговые (обобщающие) значения вершин будут определяться по формулам (4), (5), (6), (7) [27]:

$$a = \min(a_j), \quad (4)$$

$$b = \min\{\max(a_j), \min(b_j)\}, \quad (5)$$

$$c = \max\{\max(a_j), \min(b_j)\}, \quad (6)$$

$$d = \max(b_j). \quad (7)$$

Для треугольной функции принадлежности вершины a и b будут определяться по формулам (4) и (7) соответственно, а вершина m будет рассчитана по формуле (8)

$$m = \frac{\min(a_j) + \max(b_j)}{2}. \quad (8)$$

Далее необходимо вычислить функцию принадлежности для исходящей (результатирующей) переменной. Однако данная функция принадлежности отличается, как правило, сложной формой и определяется на основе логического вывода, являющегося вторым этапом механизма реализации управления на основе нечеткой логики. Существует несколько алгоритмов нечеткого вывода: алгоритм Мамдани, алгоритм Сугено, алгоритм Ларсена и алгоритм Цукамото [28]. Самыми распространенными из них являются алгоритм Мамдани и алгоритм Сугено. Они отличаются между собой представлением правил. Если при использовании алгоритма Мамдани логические правила представлены в виде: ЕСЛИ $x = A$, ТО $y = B$, то при использовании алгоритма Сугено в заключение правил представлена функция: ЕСЛИ $x = A$, ТО $y = f(x)$ (где x и y – входящая и исходящая переменные соответственно, а A и B – значения нечетких подмножеств). Однако при наличии большого количества исходящих переменных использование представленных алгоритмов нечеткого вывода представляет собой трудоемкую процедуру, сопровождающуюся необходимостью формирования внушительной базы правил в случае применения системы Мамдани и сложностью выведения функций в случае применения системы Сугено. Поэтому в рамках настоящего исследования функцию принадлежности для исходящей (результатирующей) переменной предлагается определять путем применения правил соответствия термов для входящей и исходящей переменной по результатам фазификации, активации и агрегирования (объединения) функций принадлежности для исходящих переменных.

Последний этап механизма реализации управления на основе нечеткой логики – дефазификация – вычисление исходящей (результатирующей) переменной – результативности СГПТОП. Существует несколько методов дефазификации, наиболее простым и применимым из которых является метод центра тяжести [19, с. 45; 29]. При расчетах по данному методу должны быть учтены коэффициенты значимости, отражающие степень важности включения показателя в процесс оценивания результативности.

При использовании метода центра тяжести итоговая результативность будет рассчитываться по формуле (9)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}, \quad (9)$$

где w_i – коэффициент значимости i -й переменной;

y_i – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной;

$\mu(y_i)$ – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной лингвистической переменной.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проведенных исследований автором сформирован алгоритм оценки результативности СГПТОП, основанный на положениях нечеткой логики. Укрупненная схема этапов алгоритма показана на рисунке 2.

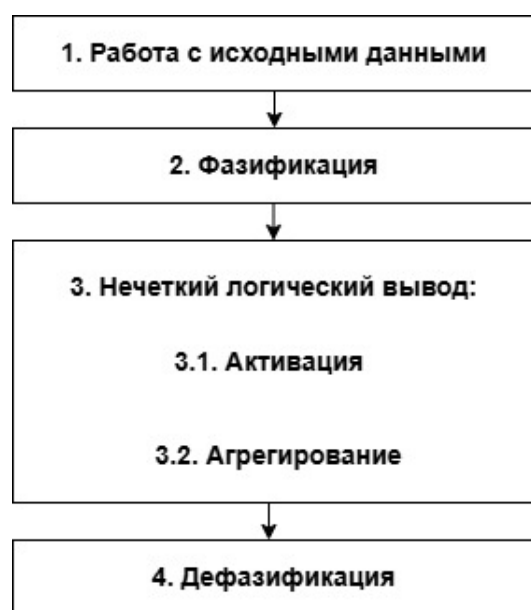


Рисунок 2 – Укрупненный алгоритм оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Comprehensive algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system
Source: compiled by the author.

Поскольку алгоритм является достаточно большим, для удобства он декомпозирован на несколько последовательных алгоритмов, представленных на рисунках 3, 4, 5, 6, 7.

На рисунке 3 представлен первый этап алгоритма – подготовка к расчетам. На данном этапе экспертами формируется перечень показателей (исходных данных, входящих переменных) оценки результативности СГПТОП в зависимости от целей и направлений процедуры оценивания. Каждому показателю присваивается коэффициент его значимости.

Далее показатели классифицируются по участникам и блокам (областям) системы показателей оценки результативности. Один и тот же показатель может относиться сразу к нескольким классификационным областям. При оценке деятельности нескольких перевозчиков вводятся значения показателей отдельно по каждому из них.

Данный этап определяется экспертами и зависит от целей и направлений оценки результативности.

Полный перечень показателей оценки результативности СГПТОП с разбивкой по блокам и участникам транспортного процесса приведен в отдельном исследовании автора [25]. Предложенный перечень основан как на результатах исследования трудов ученых, так и на основе действующей нормативно-правовой документации. Так, за основу взяты показатели, предлагаемые в социальном¹⁰ и региональном¹¹ стандартах транспортного обслуживания населения. Стоит отметить, что данный перечень не является исчерпывающим и строго регламентированным, и окончательное решение по набору исходных данных принимают специалисты, осуществляющие процедуру оценивания.

¹⁰ Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 года № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» (с изменениями на 8 октября 2024 года).

¹¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2023 года № 2086 «Об утверждении требований к региональному стандарту транспортного обслуживания населения».

ЭТАП 1. РАБОТА С ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ

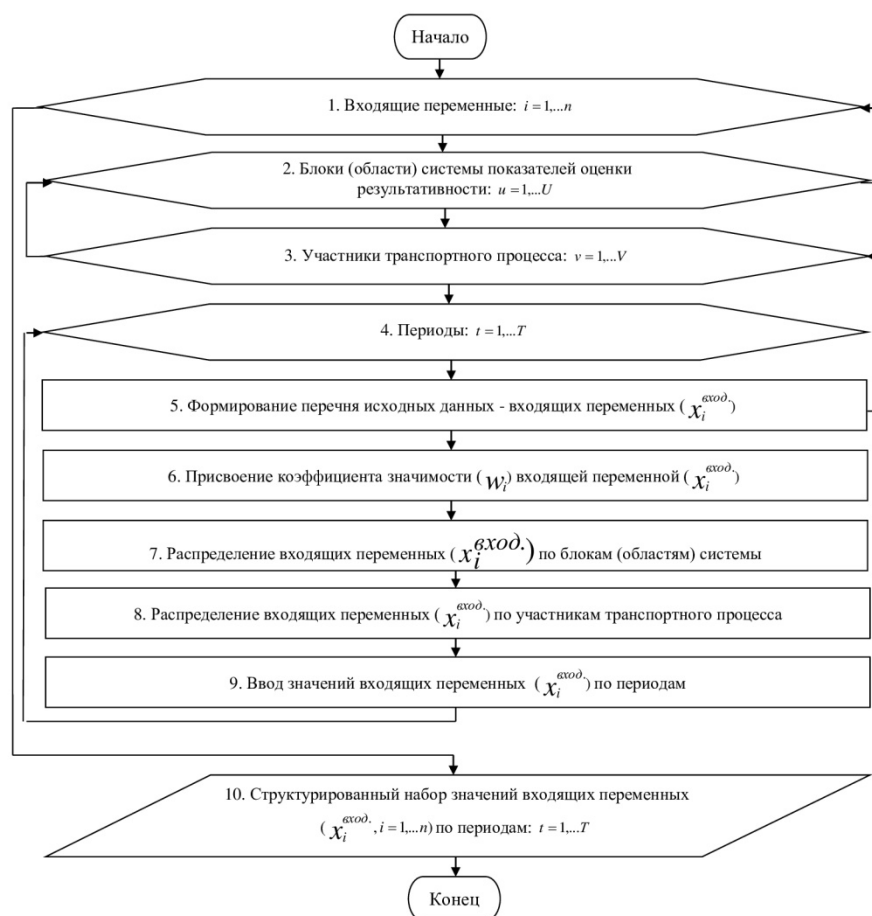


Рисунок 3 – Алгоритм этапа 1-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: работа с исходными данными
Источник: составлено автором.

Figure 3 – The 1-st stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: work with the initial data
Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлен второй этап алгоритма – фазификация. Создание терм-множеств осуществляется экспертами. Для каждого показателя набор терм-множеств зависит от его специфики. Это важно учитывать на данном этапе. Например, для некоторых показателей в наборе терм-множеств должна присутствовать терма «недопустимое значение». Это позволяет получать в итоге более точные и понятные для интерпретации оценочные значения.

Для задания вершин функций принадлежности осуществляется опрос экспертов, результаты которого обрабатываются по формулам (4)–(8) и выводятся итоговые значения вершин, принимаемые для дальнейших расчетов.

Расчет функций принадлежности для каждой исходящей переменной – результат фазификации – осуществляется по формулам (1)–(3) в зависимости от их типа.

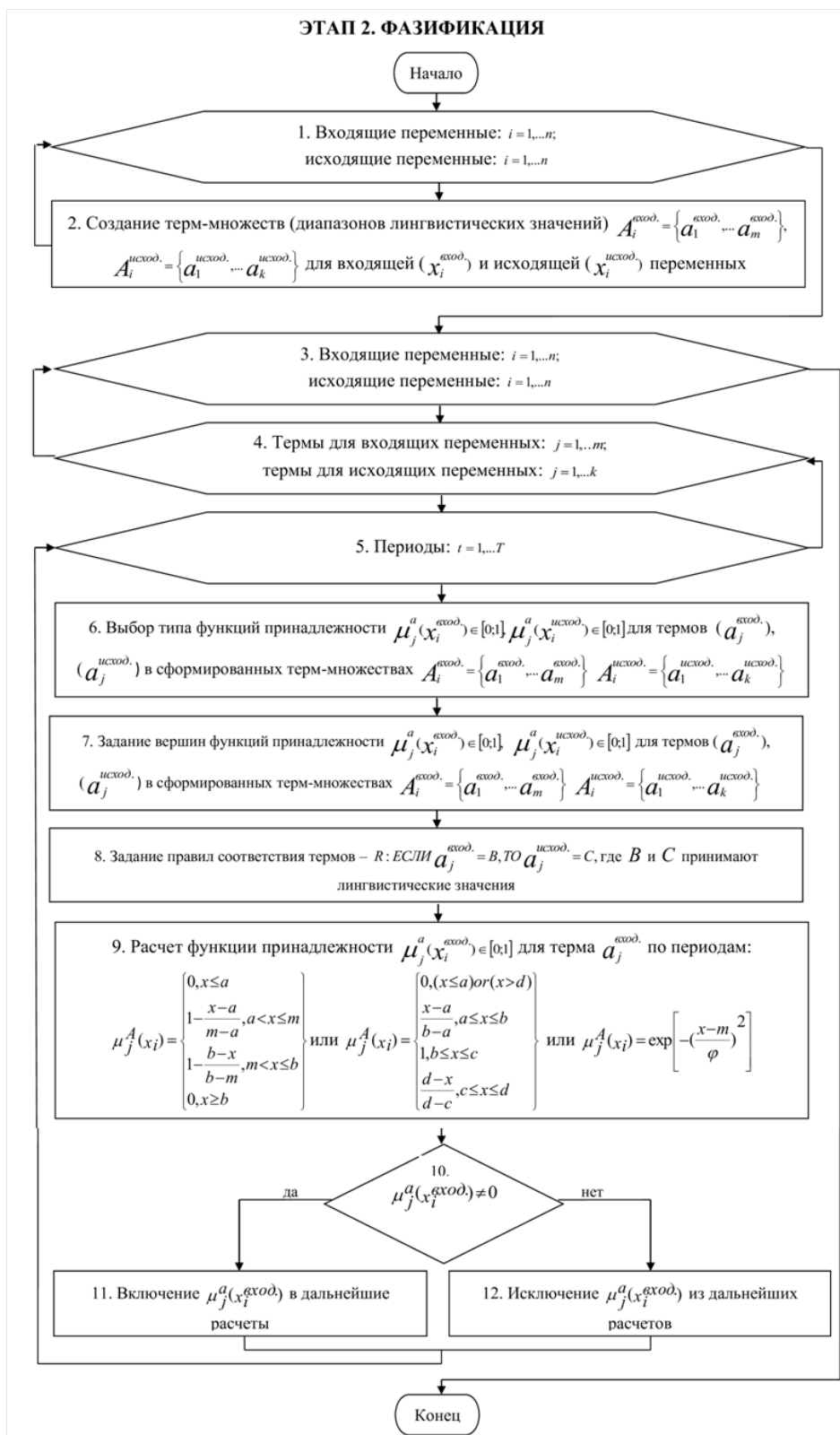


Рисунок 4 – Алгоритм этапа 2-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: фазификация
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The 2-nd stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: fuzzification
Source: compiled by the author.

ЭТАП 3. АКТИВАЦИЯ

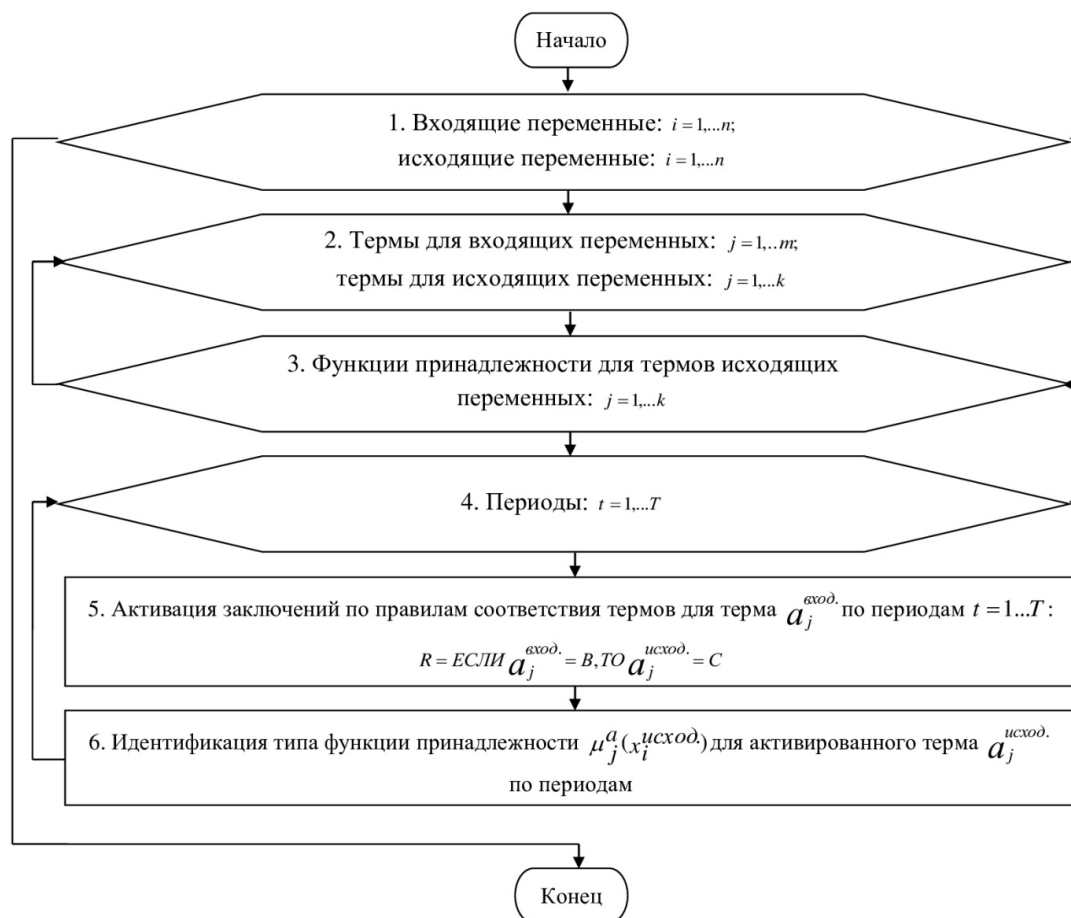


Рисунок 5 – Алгоритм этапа 3-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: активация
Источник: составлено автором.

Figure 5 – The 3-d stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: activation
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 представлен третий этап алгоритма – активация термов для исходящих переменных, которая осуществляется по заданным правилам соответствия термов. Каждый активированный терм соответствует функции принадлежности, заданной для него на этапе фазификации. Данный этап дает возможность перейти от входящих переменных к исходящим для продолжения дальнейших расчетов. Значения всех исходящих переменных лежат в интервале от 0 до 1. В результате обеспечивается переход от исходных данных, имеющих неодинаковую размерность к единому измери-

тельному интервалу, соответствующему классической теории результативности. В этом заключается большое преимущество нечеткой логики по сравнению с другими методами.

На рисунке 6 представлен четвертый этап алгоритма – агрегирование. Активированные функции принадлежности для исходящих переменных «обрезаются» на уровне их рассчитанных значений и объединяются (агрегируются) в одну функцию принадлежности, образуя определенную фигуру (в случае, если значение входящей переменной попало в более чем один терм).

ЭТАП 4. АГРЕГИРОВАНИЕ

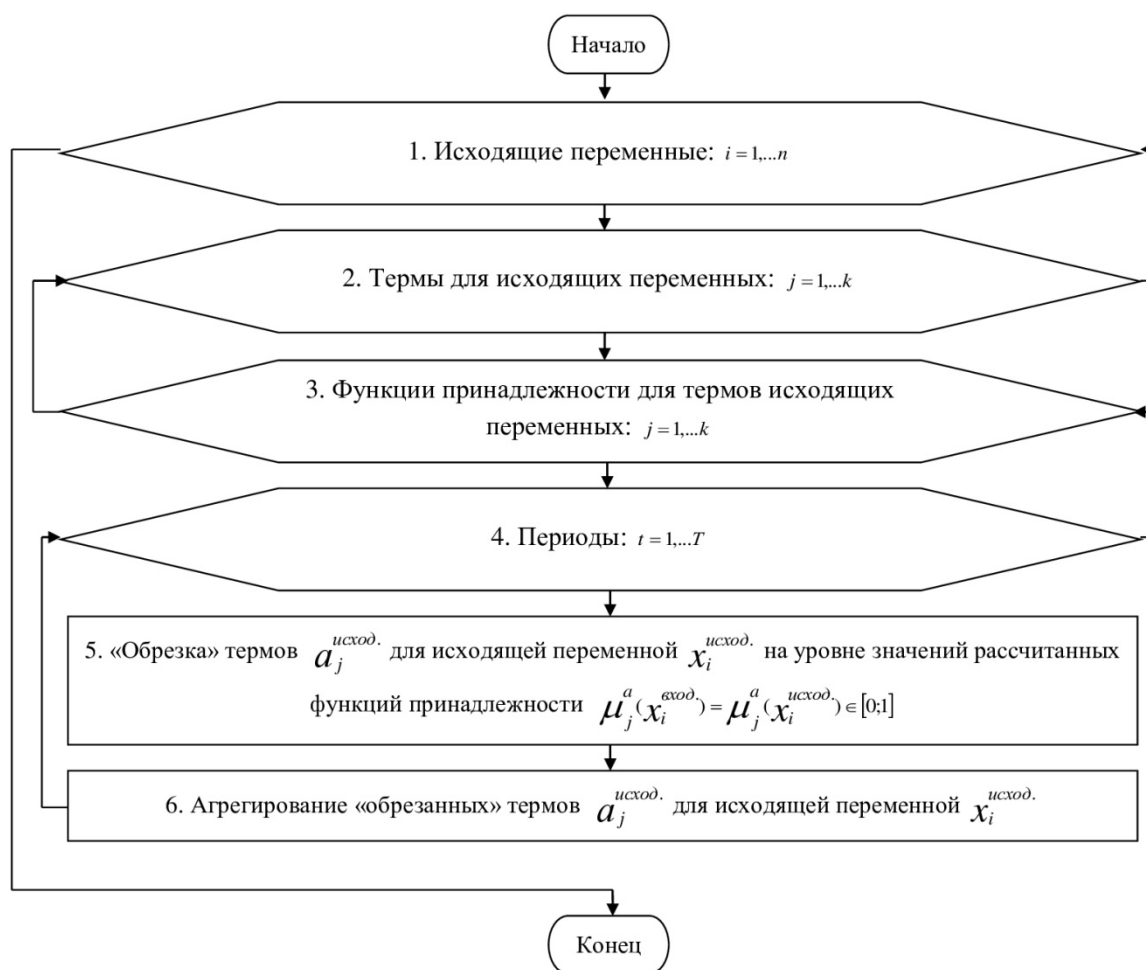


Рисунок 6 – Алгоритм этапа 4-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: агрегирование
Источник: составлено автором.

Figure 6 – The 4-th stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: aggregation
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлен пятый этап алгоритма – деаггрегация: получение и обработка результата. На основе значений функций принадлежности для исходящих переменных осуществляется расчет самих значений исходящих переменных по формулам (1)–(3),

только в обратную сторону (известны функции принадлежности).

Итоговая результативность рассчитывается путем нахождения центра тяжести получившейся фигуры по формуле (9) с использованием коэффициентов значимости.

ЭТАП 5. ДЕФАЗИФИКАЦИЯ: ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА

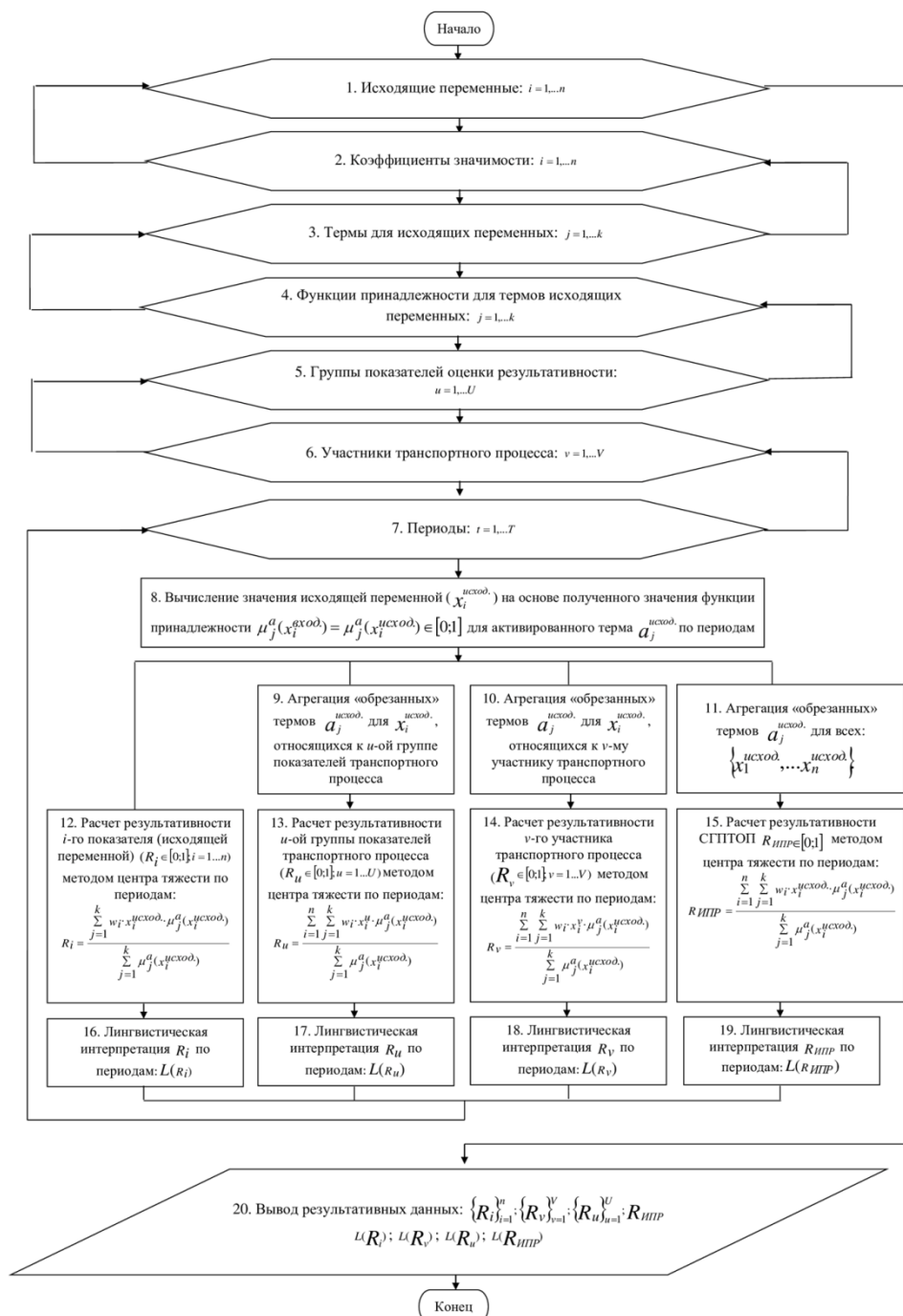


Рисунок 7 – Алгоритм этапа 5-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: дефазификация
 Источник: составлено автором.

Figure 7– The 5-th stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: defuzzification
 Source: compiled by the author.

Стоит отметить, что предложенная адаптированная модель оценки результативности СГПТОП позволяет, с одной стороны, рассчитать результативность для каждого отдельного участника системы, с другой стороны, обеспечить расчет результативности по блокам и для всей системы в целом с учетом противоречий целей ее участников за счет включения в агрегирование функций принадлежности всех участников.

Предложенный алгоритм достаточно трудоемкий для ручных вычислений, поэтому для его реализации было создано специальное программное обеспечение¹², в котором достаточно быстро можно произвести необходимые расчеты и получить графический анализ модели: результаты расчетов могут быть визуализированы с помощью 3D-графиков. Программное обеспечение написано на языке C# (си-шарп). Для лучшей визуализации выбрана технология windows forms.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет комплексного характера транспортно-го процесса уже давно является основой для научных исследований. Для оценки результативности сложных процессов и систем, в частности СГПТОП, ученые используют различные математические модели, которые со временем совершенствуются и способны учитывать достаточно большое количество факторов. Развитию таких моделей способствуют, в частности, современные информационные технологии, позволяющие обрабатывать большой объем данных за достаточно небольшое время, автоматизируя процесс принятия решений. Большое распространение для оценки комплексных систем получила нечеткая логика, положения которой явились базой для исследования.

Разработан алгоритм оценки результативности СГПТОП, который позволяет:

- учитывать большой объем исходных данных;
- учитывать данные, имеющие разные измерительные характеристики (как качественные, так и количественные);
- осуществлять оценку с позиции всех участников системы, учитывая «конфликт» их интересов;

- осуществлять оценку одновременно в разных форматах измерения: для отдельного показателя/участника/блока системы оценки результативности;

- рассчитывать интегральный показатель результативности всей системы в целом.

Новизной исследования является адаптированная процедура нечеткого логического вывода, позволяющая учесть многочисленные параметры СГПТОП без применения сложных и многочисленных правил.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оленина Е.А. Повышение эффективности пассажирских перевозок // Железнодорожный транспорт. 1999. № 7. С. 60–63.
2. Putra A. Adris. Transportation system performance analysis urban area public transport // International Refereed Journal of Engineering and science. 2013. 2 (6). pp. 1-15.
3. Мочалин С.М., Каспер М.Е. Формирование расчетных показателей для оценки результативности функционирования системы городского общественного пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 37–47. EDN YNHMUZ.
4. Raoniar R., Rao M., Senathipathi V. Public Transport Performance Evaluation Techniques - A Review. 2015. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/305992592_Public_Transport_Performance_Evaluation_Techniques_-_A_Review (дата обращения: 29.01.2026).
5. Glock JP., Gerlach Ju. Berlin Pankow: a 15-min city for everyone? A case study combining accessibility, traffic noise, air pollution, and socio-structural data // Eur. Transp. Res. Rev. 2023. Vol. 15. No. 7. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-2710.1186/s12544-023-00577-2>
6. Mocanu T., Joshi J., Winkler C. A data-driven analysis of the potential of public transport for German commuters using accessibility indicators // Eur. Transp. Res. Rev. 2021. Vol. 13, No. 54. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-2710.1186/s12544-021-00507-0>
7. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Развитие понятийного аппарата в области оценки организации городских пассажирских перевозок // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 1. С. 136–155. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-273>. EDN KQWAGD.
8. Спирин И.В. Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах // Мир транспорта. 2020. Т. 18, № 3(88). С. 218–227. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-28-43>. EDN HTJUMM.

¹² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616632 Российская Федерация. Оценка результативности функционирования городского наземного пассажирского транспорта общего пользования с применением метода нечеткой логики: заявл. 12.03.2025; опубл. 18.03.2025 / Ю.А. Колебер, С.М. Мочалин, Е.В. Пискунов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет». EDN XLYRMX.

9. Фадеев А.И., Фомин Е.В. Методика решения задачи определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 1(132). С. 42–45. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-218-227>. EDN YMMWJT.
10. Елифанов В.В., Тюрин А.С. Повышение качества перевозок в системе городского пассажирского автомобильного транспорта на основе оценки удовлетворенности потребителей: монография; под ред. М.Ю. Обшивалкина. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 195 с.
11. Dziaduch I., Peternek P. Assessing Public Transport Quality Using AHP and SUTI Indicator 4: A Case Study of the Sustainable Mobility Plan in Wrocław, Poland // Sustainability. 2024. 16 (24), 11182. <https://doi.org/10.3390/su162411182>
12. De Aquino J.T., de Melo F.J.C., Jerônimo T.d., de Medeiros D.D. Evaluation of Quality in Public Transport Services: The Use of Quality Dimensions as an Input for Fuzzy TOPSIS // International Journal of Fuzzy Systems. 2019. 21 (1). PP. 176-193. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0524-1>
13. Володькин П.П., Загорский И.О. Оценка качества регулярных перевозок как критерия эффективности организации транспортного обслуживания населения // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2010. № 5. С. 22–25. EDN MGUIXZ.
14. Лизогуб Р.П. Оценка эффективности качества регулярных перевозок в системе управления городским пассажирским транспортом // Сборник научных работ серии «Экономика». 2021. № 21. С. 134–143. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4892501>. EDN RVFQTC.
15. Андреев С.А. Разработка метода оценки качества транспортного обслуживания населения в системах планирования городских транспортных систем // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 5(108). С. 84–92. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-10>
16. Cai Y.A generalized integrated framework for urban public transport operations evaluation based on interval neutrosophic TODIM and EDAS technique // Soft Comput. 2024. Vol. 28. pp. 10331–10344. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-09787-9>
17. Solanki V.S., Agarwal P.K. Identification of key performance indicators using hybrid COPRAS-TOPSIS for urban public transit systems by evaluating with AHP and FAHP // Multimed Tools Appl. 2024. Vol. 83. pp. 82439–82469. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18851-3>
18. Мочалин С.М., Каспер М.Е. Выбор метода оценки результативности функционирования комплексных систем в теории пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1(59). С. 60–69. EDN YTMCLZ.
19. Колебер Ю.А., Мочалин С.М., Пискунов Е.В. Применение нечеткой логики для оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-2(90). С. 41–50. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)). EDN BVQNSI.
20. Гусев С.А., Славина Ю.А. Сравнительный анализ методик оценки качества функционирования системы городского наземного пассажирского транспорта // Научная мысль. 2015. № 2. С. 25–29. EDN TUFJSN.
21. Клявин В.Э., Ризаева Ю.Н., Гринченко А.В. Комплексный показатель качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 2(81). С. 51–57. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2\(81\)-51-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57). EDN CFZFIH.
22. Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems // Sustainability. 13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
23. Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment // Sustainability. 2020. No. 12. <https://doi.org/10.3390/su12124996>
24. Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems // Sustainability. №13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
25. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Формирование набора показателей для оценки результативности функционирования городского пассажирского транспорта общего пользования // International Journal of Advanced Studies. 2025. Т. 15, № 1. С. 65–90. EDN KQWAGD.
26. Saleh I., Alhady S.S.N., Rahiman W. Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Performance as Speed Controller. In: Ibrahim, H., Iqbal, S., Teoh, S., Mustafa, M. (eds) 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2017; Vol 398. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6_40
27. Карпова Н.А. Применение методов нечеткой логики при оценке и прогнозировании финансовой устойчивости консолидированных групп компаний // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 5(30). <https://doi.org/10.15862/199EVN515>
28. Blej M., Azizi M. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 22. pp. 11071-11075.
29. Ермаков С.А., Болгов А.А., Чурсин А.Г. Нечеткая логика на основе экспертных оценок как альтернативный инструмент для оценки риска в условиях неопределенности // Информация и безопасность. 2022. Т. 25, № 2. С. 247–262. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.2.009>. EDN AKMKSC.

REFERENCES

- Olenina E.A. Improving the efficiency of passenger transportation. *Rail transport*. 1999. No. 7. pp. 60-63. (in Russ.)
- Putra A. Adris. Transportation system performance analysis urban area public transport. *International Refereed Journal of Engineering and science*. 2013. no. 2 (6): 1-15.
- Mochalin S.M., Kasper M.E. Formation of calculation indicators for assessing the performance of the urban public passenger transport system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. No. 6(58). pp. 37-47. (in Russ.) EDN YNHMUZ.
- Raoniar R., Rao M., Senathipathi V. Public Transport Performance Evaluation Techniques. A Review. 2015. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/305992592_Public_Transport_Performance_Evaluation_Techniques_-_A_Review (accessed 29.01.2026).
- Glock JP., Gerlach Ju. Berlin Pankow: a 15-min city for everyone? A case study combining accessibility, traffic noise, air pollution, and socio-structural data. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023. Vol. 15. No. 7. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00577-2>
- Mocanu T., Joshi J., Winkler C. A data-driven analysis of the potential of public transport for German commuters using accessibility indicators. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2021. Vol. 13. No. 54. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00507-0>
- Koleber Yu.A., Mochalin S.M. Development of a conceptual apparatus in the field of assessing the organization of urban passenger transportation. *International Journal of Advanced Studies*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 136-155. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-273>. (in Russ.) EDN KQWAGD.
- Spirin I.V. Determination of passengers' time costs for travel in cities. *World of Transport and Transportation*. 2020. Vol. 18. No. 3(88). pp. 218-227. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-28-43>. (in Russ.) EDN HTJUMM.
- Fadeev, A. I., Fomin E.V. Metodika resheniya zadachi opredeleniya optimal'noi struktury parka podvizhnogo sostava gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018. T. 22. № 1(132). S. 42-45. (in Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-218-227>. EDN YMMWJT.
- Epifanov V.V., Tyurin A.S. *Improving the quality of transportation in the urban passenger road transport system based on consumer satisfaction assessment: Monograph*. Ulyanovsk State Technical University. 2017: 195. (in Russ.)
- Dziaduch I., Peternek P. Assessing Public Transport Quality Using AHP and SUTI Indicator 4: A Case Study of the Sustainable Mobility Plan in Wrocław, Poland. *Sustainability*. 2024. 16 (24), 11182. <https://doi.org/10.3390/su162411182>
- De Aquino J.T., de Melo F.J.C., Jerônimo T.d., de Medeiros D.D. Evaluation of Quality in Public Transport Services: The Use of Quality Dimensions as an Input for Fuzzy TOPSIS *International Journal of Fuzzy Systems*. 2019. 21 (1). pp. 176-193. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0524-1>
- Volod'kin P.P. Zagorskii I.O. Evaluation of the quality of regular transportation as a criterion for the effectiveness of the organization of public transport services. *Transport: science, equipment, management*. 2010. No. 5. pp. 22-25. (in Russ.) EDN MGUIXZ.
- Lizogub R.P. Evaluation of the efficiency of regular transportation quality in the urban passenger transport management system. Collection of scientific papers in the series «Economics». 2021. No. 21. pp. 134-143. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4892501>. (in Russ.) EDN RVFQTC.
- Andreev S.A. Development of a Method for Assessing the Quality of Public Transport Services within Urban Transportation Planning Systems. *World of Transport and Transportation*. 2023. Vol. 21, No. 5(108). pp. 84-92. (in Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-10>
- Cai Y.A generalized integrated framework for urban public transport operations evaluation based on interval neutrosophic TODIM and EDAS technique. *Soft Comput.* 2024. Vol. 28. pp. 10331–10344. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-09787-9>
- Solanki V.S., Agarwal P.K. Identification of key performance indicators using hybrid COPRAS-TOPSIS for urban public transit systems by evaluating with AHP and FAHP. *Multimed Tools Appl.* 2024. Vol. 83. pp. 82439–82469. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18851-3>
- Mochalin S.M., Kasper M.E. Evaluating methods' application of complex systems' effectiveness in the automobile passenger transport theory. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018. Vol. 15. No. 1(59). pp. 60-69. (in Russ.) EDN YTMCLZ.
- Koleber YU.A., Mochalin S.M., Piskunov E.V. Applying fuzzy logic to evaluation the effectiveness of the functioning of the public urban passenger transport systems. *World of transport and technological machines*. 2025. No. 3-2(90). pp. 41-50. (in Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)). EDN BVQNSI.
- Gusev S.A., Slavina YU.A. Comparative analysis of methods for assessing the performance of the urban ground passenger transport system. *Scientific thought*. 2015. No. 2. pp. 25-29. (in Russ.) EDN TUFJSN.
- Klyavin, V.EH., Rizaeva YU.N., Grinchenko A.V. Comprehensive indicator of the quality of passenger transportation by road. *World of transport and technological machines*. 2023. No. 2(81). pp. 51-57. (in Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2\(81\)-51-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57). EDN CFZFIH.
- Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems. *Sustainability*. 13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
- Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment. *Sustainability*. 2020. No. 12. <https://doi.org/10.3390/su12124996>
- Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for

Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems. *Sustainability*. №13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>

25. Koleber Yu.A., Mochalin S.M. Formation of a set of indicators to assess the effectiveness of the functioning of urban public passenger transport. *International Journal of Advanced Studies*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 65-90. (in Russ.) EDN KQWAGD.

26. Saleh I., Alhady S.S.N., Rahiman W. Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Performance as Speed Controller. In: Ibrahim, H., Iqbal, S., Teoh, S., Mustafa, M. (eds) *9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2017; Vol. 398. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6_40

27. Karpova N.A. Application of methods of fuzzy logic in valuation and forecasting of financial capability of the consolidated groups of companies. Online journal «Science Studies». 2015. Vol. 7. No. 5(30). (in Russ.) <https://doi.org/10.15862/199EVN515>

28. Blej M., Azizi M. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. No. 22. pp. 11071-11075.

29. Ermakov S.A., Bolgov A.A., Chursin A.G. Fuzzy logic based on expert assessments as an al-

ternative tool for risk assessment in conditions of uncertainty. *Information security*. 2022. Vol. 25. No. 2. pp. 247-262. (in Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.2.009>. EDN AKMKSC.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колебер Юлия Андреевна – ст. преп. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6844-1895>,

Researcher ID: JDW-2885-2023,

Scopus Author ID: 57219312035,

SPIN-код: 5455-7507,

e-mail: uljachabol@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koleber Yuliya A. – Senior Lecturer, Economics, Logistics and Quality Management Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6844-1895>,

Researcher ID: JDW-2885-2023,

Scopus Author ID: 57219312035,

SPIN-code: 5455-7507,

e-mail: uljachabol@mail.ru