

УДК 656

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>

EDN: SUGGFY

Научная статья



МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПАССАЖИРОВ ОБЩЕСТВЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ ИЗ ОПЕРАЦИЙ ВАЛИДАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕЗДНЫХ БИЛЕТОВ

А. И. Фадеев*, С. АлхуссейниСибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия9135335784@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,
eng.sami20143@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3028-0675>,
*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие методы определения пассажирских потоков вследствие их трудоемкости и ограниченной эффективности не позволяют осуществлять на должном уровне мониторинг транспортного спроса. В настоящее время для создания эффективных решений (в том числе на общественном транспорте) используются технологии, основанные на сборе, интеграции и анализе больших данных (Urban computing, Big data, Internet of things).

Материалы и методы. В рамках данного подхода разработана методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов (Electronic Travel Tickets): смарт-карт (smart card), транспортных карт, магнитных карт, мобильных телефонов или других электронных устройств (Electronic Gadgets), реквизиты которых фиксируются в автоматизированной системе оплаты проезда Automated Fare Collection (AFC) при выполнении операции валидации.

Методика, основанная на определении и оценке множества допустимых вариантов связанности последовательности пассажирских поездок, позволяет рассчитывать параметры пассажирских корреспонденций с учетом множества факторов, оказывающих влияние на выбор пассажиром маршрутов поездок. Например, в отличие от ранее выполненных исследований, учтена практика оплаты проезда в любой точке маршрута, не обязательно сразу же после посадки в транспортное средство.

Результаты. Доказано, что пассажирские корреспонденции, рассчитанные посредством разработанной методики, статистически соответствуют генеральному множеству поездок общественным транспортом в пределах допустимых погрешностей, в результате обеспечивается оценка характеристик спроса общественного транспорта.

Обсуждение и заключение. Применение разработанной методики позволяет организовать непрерывный мониторинг пассажирских потоков, технико-эксплуатационных показателей функционирования общественного транспорта и таким образом реализовать концепцию устойчивого развития общественного транспорта посредством проектирования транспортного предложения, соответствующего спросу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский поток, транспортный спрос, пассажирские корреспонденции, матрица пассажирских корреспонденций, общественный городской транспорт.

Статья поступила в редакцию 21.04.2022; одобрена после рецензирования 14.05.2022; принята к публикации 10.06.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фадеев А. И., Алхуссейни С. Методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 3 (85). С. 370-397. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>

© Фадеев А. И., Алхуссейни С., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>

EDN: SUGGFY

Original article

METHODOLOGY FOR DETERMINING PASSENGERS CORRESPONDENCE BY PUBLIC TRANSPORT FROM ELECTRONIC TICKETS VALIDATION OPERATIONS

Aleksandr I. Fadeev*, Sami Alhusseini

Siberian Federal University,

Krasnoyarsk, Russia

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

eng.sami20143@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3028-0675>,

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Current methods for determining passenger ridership, due to their complexity and limited efficiency, do not allow monitoring transport demand at the proper level (in terms of comprehensiveness and continuity). Nowadays, technologies based on the collection, integration and analysis of big data (Urban computing, Big data, Internet of things) are used to create effective solutions in many aspects of our lives (including for urban transit).

Materials and methods. Within the framework of this approach, a methodology for determining the correspondence of transit passengers from the operations of validating any kind of electronic travel tickets: smart cards, transport cards, magnetic cards has been developed. Each operations details are recorded in the Automated Fare Collection (AFC) system during the validation.

This methodology based on the definition and evaluation the set of acceptable options of passenger trips sequences, which form the passenger correspondence, taking into account many factors that effect on the route choice by a passenger. For example, in contrast to previous studies, the practice of paying for trip at any point on the route, not necessarily immediately after boarding the vehicle, was taken into account.

Results. It was proved that passenger correspondence calculated using the developed methodology statistically corresponds to the general set of transit passenger ridership within acceptable errors. The chaacteristics of transit demand is provided in the results.

Discussion and conclusion. The application of the developed methodology makes it possible to organize continuous monitoring of passenger flows, technical and operational indicators of the functioning of transit system and thus implement the concept of sustainable development of public transport by designing public transit supply that meets demand.

KEYWORDS: passenger flow, transit demand, passenger correspondence, matrix of passenger correspondence, urban transit.

The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 14.05.2022; accepted for publication 10.06.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

© Fadeev A. I., Alhusseini S., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Баланс спроса и предложения без излишнего объема инфраструктуры – это одно из основных условий устойчивости общественного транспорта, обеспечивающего экономичное, безопасное, надежное, экологически чистое и качественное удовлетворение мобильности населения: доступ к месту работы, учебы, товарам, услугам, социальным и культурно-бытовым объектам. Реализация данной концепции требует решения проблемы мониторинга транспортного спроса, т. е. формирования системы постоянного наблюдения за мобильностью населения, результаты которого обеспечивают обоснованные управленческие решения по формированию оптимального транспортного предложения.

Спрос на городской общественный транспорт, т. е. объемы и направления пассажирских потоков традиционно описывается матрицей корреспонденций (МК) [1]. Существующие методы определения МК вследствие их трудоемкости и ограниченной эффективности не позволяют осуществлять на должном уровне мониторинг транспортного спроса. В настоящее время для создания эффективных решений (в том числе на общественном транспорте) используются технологии, основанные на сборе, интеграции и анализе больших данных (Urban computing, Big data, Internet of things) [2].

В рамках данного подхода в настоящей статье рассмотрена задача определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством анализа операций валидаций электронных проездных билетов (Electronic Travel Tickets): смарт-карт (smart card), транспортных карт, магнитных карт, мобильных телефонов или других электронных устройств (Electronic Gadgets), реквизиты которых фиксируются в автоматизированной системе оплаты проезда Automated Fare Collection (AFC) при выполнении операции валидации. Информация, формируемая в AFC, представляет существенный интерес для решения задач планирования работы транспорта, поскольку позволяет рассчитывать спрос общественного транспорта, т. е. потребность населения в передвижениях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Состояние вопроса. Рассмотрим существующие подходы к решению рассматриваемой задачи, которые позволяют посредством данных AFC определять следующие параметры поездок пассажиров (пассажирских кор-

респонденций): остановочные пункты и время начала и завершения поездки, вид транспорта, расстояние поездки. Данная задача рассматривалась во многих исследованиях [3, 4, 5, 6].

В большинстве AFC городского общественного транспорта пассажир выполняет валидацию электронного билета один раз во время поездки. Оплата проезда производится на станции или в транспортном средстве, в котором пассажир осуществляет валидацию билета, как правило, сразу же после посадки, хотя в некоторых случаях до оплаты он может проехать одну-две остановки. В России иногда практикуется система расчетов за проезд в пункте назначения пассажира. Данный факт не учитывается в исследованиях зарубежных авторов. В операциях валидации фиксируются следующие данные [3, 7, 8, 9]: номер карты, время валидации, идентификатор устройства валидации, которые позволяют определить место операции (вокзал, станция метро, турникет станции метро, транспортное средство).

В некоторых системах также сохраняются дополнительные данные, например, в системе Transantiago (Сантьяго, Чили) известен тип карты [10]: студенческая, со скидкой, бесплатная и т. д. В работе Li [9] карты подразделены на: с фиксированной месячной оплатой, без ограничения числа поездок, бесплатная, льготная (скидка 50%), общая (скидка 10%). Эти данные могут быть использованы для классификации поездок по социальным группам населения.

По техническим причинам сырые данные операций валидации смарт-карт зачастую содержат ошибки, которые требуется локализовать: откорректировать, если возможно, или исключить операцию из рассмотрения [9].

В некоторых системах AFC, например Квинсленд Австралия [11], валидация выполняется в начале и конце поездок, т. е. в операции оплаты за проезд имеется идентификатор карты, маршрут, направление, время посадки, время выхода из транспорта, остановка посадки и выхода. Информация из данных систем полезна при тестировании алгоритмов расчета пассажирских корреспонденций из операций валидации [11].

В ранее проведенных исследованиях рассматривалась AFC Чикаго, перевозки метрополитеном в Нью-Йорке (Barry [3, 7]) и другие системы. В большинстве AFC [3, 4, 7, 12, 13, 14] не регистрируется местоположение операции валидации, координаты точки валидации устанавливаются по времени операции.

В большинстве случаев валидация электронного билета осуществляется в начале поездки. Началом поездки считается остановочный пункт, предыдущий операции валидации. Для определения данного пункта применяются следующие подходы:

– по расписанию движения автобусов (исследования Barry [3, 7], в которых решалась отдельная проблема, связанная с тем, что в системе Metocard время транзакции усекается до 6-минутного интервала, это приводит к неточностям в определении остановочного пункта посадки пассажира);

– посредством дополнительной обработки данных систем автоматического определения местоположения транспортного средства Automatic Vehicle Location (AVL), в которых фиксируется местоположение и временные отметки движения транспортного средства по маршруту [8, 10, 15]; для решения рассматриваемой задачи требуется связать базы данных: AFC и AVL.

В некоторых современных системах AFC и AVL интегрированы, в операции валидации фиксируется ее местоположение, например системы GoCard [11], Andante [16].

Жизнедеятельность человека сопровождается связанными поездками (рисунок 1), что позволяет устанавливать пассажирские

корреспонденции путем анализа цепочки операций валидации электронных проездных билетов. Применяемый метод заключается в построении последовательности пассажирских корреспонденций путем соединения данных, зафиксированных в операциях валидации электронного билета [3, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19].

Завершение корреспонденции определяется на основании остановочного пункта начала следующей поездки. При этом применяются следующие ключевые допущения [20, 21, 22]:

1. Остановочный пункт расположен на маршруте после валидации смарт-карты.

2. Он находится в пешеходной доступности от пункта начала следующей поездки. Расстояние пешеходной доступности рассчитывается как евклидова длина прямой между остановочными пунктами (завершения текущей и начала следующей поездки).

3. Пассажиры заканчивают свою последнюю поездку дня на остановке, с которой они начали свою первую поездку дня.

Первым сформулировал и апробировал приведённые предположения Barry [3]. На начальном этапе его исследования ограничивались станциями метро, в 2009 г. расширились на маршруты автобусов.

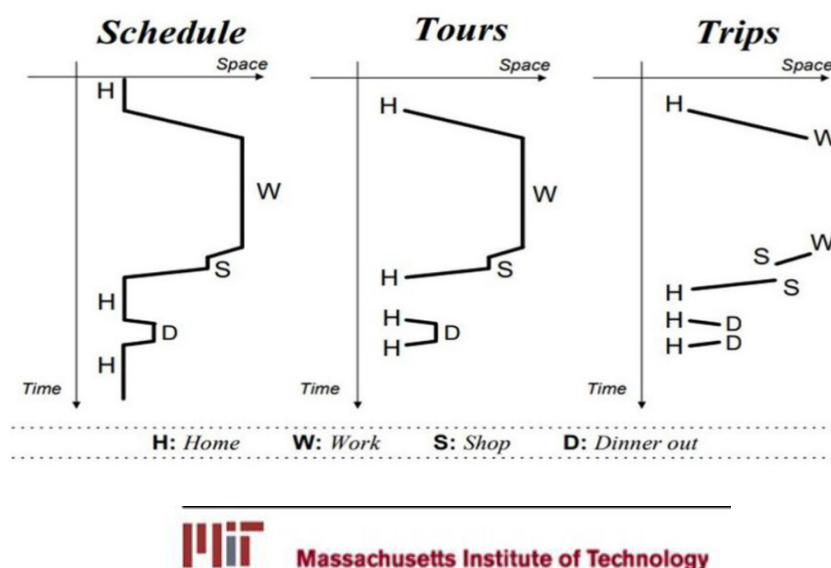


Рисунок 1 – Транспортное поведение жителя¹

Figure 1 – Passenger transport behavior¹

¹ Transportation systems analysis: demand and economics. Режим доступа: https://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-201j-transportation-systems-analysis-demand-and-economics-fall-2008/lecture-notes/MIT1_201JF08_lec05.pdf (дата обращения: 10.04.2022).

Некоторые поездки пассажир выполняет видом транспорта, в котором электронный проездной билет не применяется, например в такси. Такие случаи поездок, не зафиксированных AFC, необходимо локализовать. Возникает несовместимость операций валидации, для выявления которой применяются следующие оценки [23]:

- единственная поездка в день;
- две валидации подряд происходят на одном и том же пункте, что свидетельствует о поездке, не зафиксированной AFC, или об оплате проезда одной картой двумя или более пассажирами;
- конечный пункт последней поездки невозможно определить, поскольку первая и последняя валидации выполняются на одном пункте [3].

Общепринятый подход определения времени завершения поездки заключается в оценке момента прибытия транспортного средства на остановочный пункт посредством данных системы AVL или по расписанию движения маршрута.

Разработанные алгоритмы формирования пассажирских корреспонденций позволяют интерпретировать от 60 до 88% операций валидации электронных билетов (таблица 1). Наличие нераспознанных операций обусловлено тем, что, как упоминалось выше, некоторые поездки выполняются без использования электронного проездного билета.

При расчете объема спроса на общественный транспорт требуется учесть, во-первых, неинтерпретированные операции валидации и, во-вторых, поездки пассажиров, не использующих электронный проездной билет. Данная задача рассмотрена в [23]. Для рас-

чета транспортного спроса необходимо установить удельный вес поездок, оплачиваемых электронными проездными билетами. В [23] показано, что удельный вес поездок по электронным билетам следует рассчитывать для каждого маршрута отдельно.

Неинтерпретированные валидации учитываются посредством соответствующих коэффициентов балансировки.

Из полученных маршрутных поездок определяются сетевые корреспонденции пассажира, т. е. перемещения от начального пункта (например, дом) до пункта назначения (например, работа), которые могут выполняться по нескольким маршрутам с пересадками. Расчет сетевых корреспонденций осуществляется на основании упорядоченной по времени цепочки маршрутных корреспонденций. Для каждой пары корреспонденций анализируются условия пересадки и при их удовлетворении маршрутные корреспонденции объединяются в сетевую [17, 23, 24].

В [23, 25] рассмотрен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов, который, в отличие от ранее проведенных исследований, обеспечивает:

- обработку операций валидации электронного билета как в начале, так и в конце поездки;
- расчет параметров пассажирских потоков, транспортного предложения и МК с учетом нераспознанных операций валидации;
- оценку репрезентативности полученных пассажирских корреспонденций генеральной совокупности транспортного спроса.

Таблица 1
Объем исследуемой выборки и удельный вес интерпретированных валидаций электронных билетов
Источник: составлено авторами.

Table 1
Sample volume and the share of interpreted e-ticket validations from different works
Source: compiled by the authors.

Автор	Объем выборки	Интерпретировано валидаций, %
A Alsger et al. (2016) [11]	161 446	76–84
A Alsger et al. (2015) [24]	473 525	88
N Nassir et al. (2011) [6]	84 413	61
Jinhua Zhao(2007) [8]	2 500 000	72
Cui (2006) [14]	2 736 454	79
А. И. Фадеев, С. Алхуссейни (2021) [23, 25]	6 340 518	65

В данном методе считается, что остановочный пункт, предыдущий оплате поездки, является началом корреспонденции пассажира. Однако на практике некоторые пассажиры могут оплатить поездку, проехав один-два остановочных пункта. В результате возникают погрешности расчета транспортного спроса.

В данной работе приведена методика расчета корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидации электронных проездных билетов, в которой учтен упомянутый недостаток: считается, что пассажир может осуществить оплату проезда в любой точке маршрута, не обязательно сразу же после посадки в транспортное средство.

2. Методика расчета корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидации электронных проездных билетов. Необходимо определить множество маршрутных (P) и сетевых (H) пассажирских корреспонденций, выполненных по электронному проездному билету.

На транспортной сети расположены остановочные пункты W , через которые проходят маршруты M , каждый из которых состоит из двух терминалов и последовательности промежуточных остановочных пунктов. Движение по маршрутам осуществляется в двух направлениях: прямом и обратном, т. е. в маршруте имеется два рейса, которые описываются парой последовательностей пунктов его траектории в зависимости от направления движения

$k=\{a,b\}$ (где a, b – прямое и обратное направление соответственно).

$$M=\{M^{\delta}:k=a,b\}; M\subset M; |M|=m; \quad (1)$$

$$M^{\delta} = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_t\}; M^{\delta} \subset M; w_i \in W, \quad (2)$$

где M^{δ} – δ -й рейс маршрута M ;

w_i – i -й остановочный пункт на транспортной сети;

m – число маршрутов.

В АФС фиксируется время выполнения операций валидации электронного проездного билета E , маршрут и транспортное средство, посредством которого осуществлена перевозка. Известна последовательность операций валидации электронного билета $E=\{e_1, e_2, \dots, e_k, \dots\}$, каждый элемент которой отражает поездку (маршрутную корреспонденцию) пассажира p_k .

В рейсе остановочный пункт начала поездки расположен перед точкой, в которой произведена операция валидации проездного билета, завершения поездки – после точки валидации электронного билета (рисунок 2). Обозначим множество остановочных пунктов W_k^- , расположенных в k -м рейсе до операции валидации электронного билета, и W_k^+ – после операции валидации, $W_k^- \subset W$; $W_k^+ \subset W$. Таким образом остановочный пункт начала пассажирской корреспонденции – это элемент множества W_k^- , а завершения – W_k^+ .

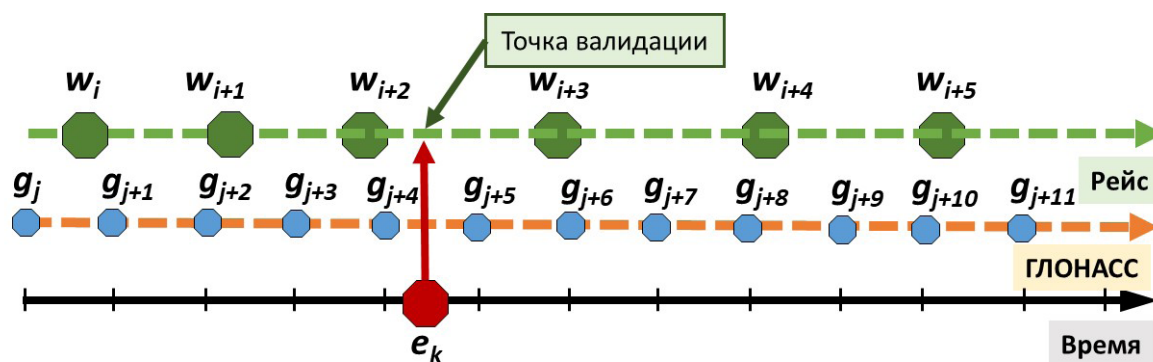


Рисунок 2 – Расчетная схема маршрутной пассажирской корреспонденции, где $w_i, w_{i+1}, \dots$ – остановочные пункты рейса; $g_j, g_{j+1}, \dots$ – навигационные отметки системы спутникового позиционирования; e_k – валидация электронного проездного билета
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Calculation scheme of a passenger trip, where: $w_i, w_{i+1}, \dots$ – stopping points of the route; $g_j, g_{j+1}, \dots$ – navigation marks of the satellite positioning system; e_k – e-ticket tap
Source: compiled by the authors.

Для определения точки валидации электронного билета и остановочных пунктов рейса используются навигационные отметки спутникового позиционирования подвижного состава, в которых содержатся следующие данные, необходимые для решения рассматриваемой задачи: транспортное средство, скорость движения, время и координаты (широта, долгота; Latitude and Longitude) навигационной отметки.

Прохождение через остановочный пункт фиксируется по навигационным отметкам в его зоне, которая задается радиусом. Формируется траектория движения транспортных средств через остановочные пункты:

$$R = G \times M = \{(g, w) : g \in G, w \in M, l(g, w) \leq l_w\}, \quad (3)$$

где $l(g, w)$ – расстояние между навигационной отметкой (g) и остановочным пунктом (w);

l_w – радиус зоны остановочного пункта.

Скорость транспортного средства, зафиксированная в навигационной отметке в зоне остановочного пункта, может быть больше нуля. По скорости в навигационных отметках не всегда можно установить факт остановки транспортного средства. Из рисунка 3 видно, что, если время остановки транспортного средства не превышает интервала между навигационными отметками, возможны случаи, при которых в навигационных отметках будет зафиксирована ненулевая скорость транспортного средства. Для некоторых транспорт-

ных средств интервал между навигационными отметками достигает 30 с. Поэтому считается, что операция посадки-высадки пассажиров на остановке совершается независимо от скорости в навигационной отметке.

При назначении радиуса зоны остановочного пункта учитывается несколько факторов. Радиус должен быть достаточно большим, чтобы компенсировать возможные ошибки координат, погрешности системы спутникового позиционирования, а также технологические особенности остановочного пункта, в котором может быть несколько мест остановки транспорта. При недостаточном радиусе навигационные отметки спутниковой системы могут не попасть в зону остановочного пункта. С другой стороны, большой радиус может быть причиной ложного фиксирования остановочного пункта, который не находится на пути следования транспортного средства.

На рисунке 4 приведена схема элемента траектории движения транспортного средства. В рассматриваемом примере в зоне остановочного пункта расположены четыре навигационные отметки, по j -й навигационной отметке определяется время прибытия на остановочный пункт. Соответственно по $j+3$ -й отметке устанавливается время отправления из остановочного пункта. В соответствии с данной схемой погрешность определения времени прибытия на остановочный пункт или отправления из остановочного пункта не превышает интервал между навигационными отметками.

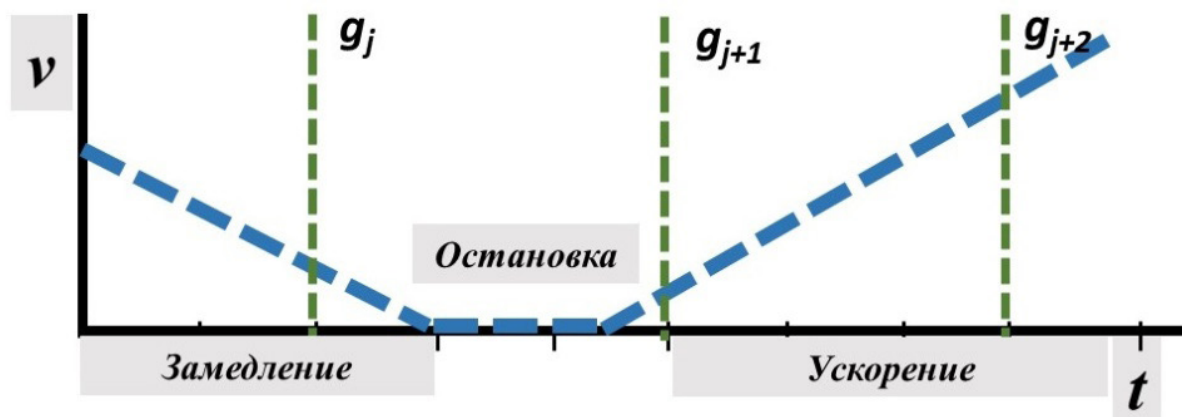


Рисунок 3 – Динамика движения транспортного средства через остановочный пункт, где $g_j, \dots$ – навигационные отметки спутниковой системы позиционирования
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The dynamics of the transport vehicle movement through the stopping point, where: $g_j, \dots$ – navigation marks of the satellite positioning system
Source: compiled by the authors.

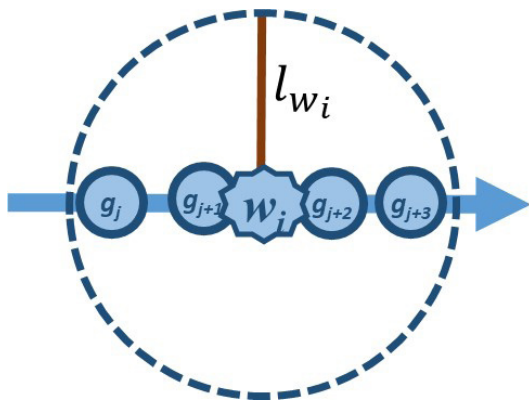


Рисунок 4 – Схема элемента траектории движения транспортного средства, где w_i – остановочный пункт; $g_j, \dots$ – навигационные отметки в зоне остановочного пункта;

l_{w_i} – радиус зоны остановочного пункта
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Elements of the transport vehicle trajectory, where: w_i – stopping point; $g_j, \dots$ – navigation marks in the area of the stopping point;

l_{w_i} – Stop-point zone radius
Source: compiled by the authors.

Как упоминалось выше, на городских маршрутах, как правило, оплата проезда производится однократной валидацией электронного билета. В ранее разработанных алгоритмах [23, 25] по валидации определяется один из пунктов поездки – начальный, если оплата осуществляется в начале поездки или конечный, когда проезд оплачивается перед выходом из транспорта. В этих алгоритмах не учитываются случаи, если до оплаты пассажир проезжает более одного перегона.

В настоящей работе для расчета пассажирских корреспонденций применен подход, основанный на множестве допустимых вариантов X_{k+1}^k завершения k -й и начала $k+1$ -й пассажирской корреспонденции (рисунок 5), которое формируется

$$X_{k+1}^k = W_k^+ \times W_{k+1}^-; \quad (4)$$

$$l(w_{kj}^+, w_{k+1i}^-) < L_p; \quad w_{kj}^+ \subset W_k^+; \quad w_{k+1i}^- \subset W_{k+1}^-;$$

где l – евклидово расстояние между остановочными пунктами w_{ki}^+ и w_{k+1i}^- ;

L_p – расстояние пешеходной доступности.

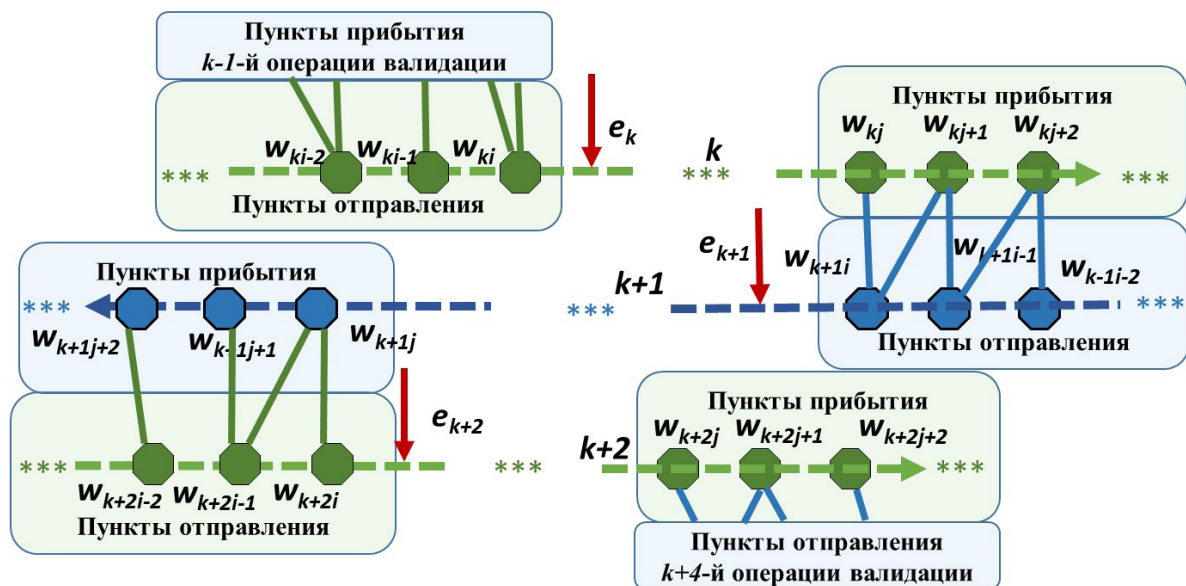


Рисунок 5 – Схема формирования вариантов пассажирских корреспонденций электронного проездного билета
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme for variants of passenger correspondence been generated
Source: compiled by the authors.

Возможные варианты k -й пассажирской корреспонденции – это декартово произведение множеств X_k^{k-1} и X_{k+1}^k . В результирующем множестве требуется определить элемент, который соответствует реальной поездке пассажира. Для этого в цепочке перемещений пассажира связанность предыдущей и последующей поездок X_{k+1}^k оценивается J критериями $y_1 = f_1(x), \dots, y_J(x) = f_J(x)$, составляющими вектор оценок. Z_i – шкала (множество значений) критерия f_i . Будем считать, что критерии ориентированы положительно, т. е. с ростом значений каждого критерия предпочтения возрастают.

В рассматриваемой задаче для оценки элементов множества X_{k+1}^k применяются следующие показатели (критерии):

– расстояние пешеходной доступности (евклидово расстояние между остановочными пунктами завершения предыдущей и начала следующей поездки);

– номер остановочного пункта от операции валидации (считается, что чем ближе остановочный пункт рейса к операции валидации электронного билета, тем выше вероятность начала пассажирской корреспонденции с этого пункта; в большинстве случаев пассажир оплачивает проезд сразу же после посадки в транспортное средство);

– частота использования остановочного пункта пассажиром (у пассажира имеются явно выраженные места притяжения, например дом, работа и т. д.).

Для решения задачи выбора векторный критерий «свертывается» [26]. Применяется аддитивная (5) или мультипликативная (6), (7) свертки критериев [27]:

$$F(f|v) = \sum_{j=1}^J v_j f_j; \quad (5)$$

$$F(f|v) = \prod_{j=1}^J v_j f_j; \quad (6)$$

$$F(f|v) = \prod_{j=1}^J f_j^{v_j}, \quad (7)$$

где v_j – значение весового коэффициента j -го критерия f_j .

В общем случае критерии могут иметь разные шкалы. Например, в нашем случае по-разному измеряется расстояние пешего перемещения и номер остановочного пункта от операции валидации. Критерии следует привести к сопоставимому виду, т. е. нормализовать [26]. Нормализованные критерии безраз-

мерны, их значения, как правило, находятся в одинаковых пределах, например от 0 до 1. Обычно применяются линейные функции нормализации [26, 27], например

$$\varphi(f_i) = f_i/f_i^*; \quad \varphi(f_i) = (f_i - f_{i*})/(f_i^* - f_{i*}), \quad (8)$$

где: f_i^*, f_{i*} – наибольшее и наименьшее значения критерия $f_i(x)$ на множестве возможных вариантов.

Для некоторых показателей полезность оцениваемого варианта увеличивается при уменьшении их значений. Например, в рассматриваемой задаче наиболее предпочтительным является вариант с наименьшим расстоянием пешеходного перемещения пассажира. Для таких случаев применяется линейная функция нормализации следующего вида:

$$\varphi(f_i) = 1 - f_i/f_i^*. \quad (9)$$

Функции нормализации используемых показателей (критериев):

а) расстояние между остановочными пунктами завершения предыдущей и начала следующей поездки:

$$\varphi(l_i^p) = 1 - \frac{l_i^p}{2L_p}, \quad l_i^p \leq 2L_p; \quad (10)$$

б) номер остановочного пункта от операции валидации:

$$\varphi(n_i^e) = \begin{cases} 1 - \frac{n_i^e}{n^{e*}}, & n_i^e \leq n^{e*}; \\ 0, & n_i^e > n^{e*} \end{cases}; \quad (11)$$

в) частота использования остановочного пункта (место притяжения пассажира):

$$\varphi(w_i) = \frac{n_i^w}{n^{w*}}, \quad (12)$$

где n^{e*} – наибольший номер остановочного пункта от операции валидации; для остановочных пунктов, номер которых больше n^{e*} , критерий (11) принимает нулевое значение;

n_i^w, n^{w*} – число операций с i -м остановочным пунктом к общему числу операций валидации электронного билета.

Использование в выражении (10) двойного расстояния пешеходной доступности объясняется на рисунке 6. Оно учитывает перемещения между местом притяжения пассажира и остановочными пунктами отправления и прибытия.

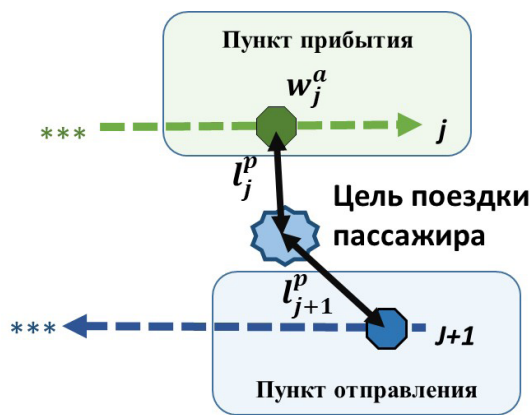


Рисунок 6 – Расчетная схема пешего движения пассажира между остановочными пунктами прибытия и отправления
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Scheme estimated passenger walking distance between stopping point and next boarding one
Source: compiled by the authors.

Таким образом, имеется l вариантов X_{k+1}^k связанности k -й и $k+1$ -й пассажирской корреспонденции. Предпочтительным является вариант, имеющий наибольшее значение агрегированного критерия (используется аддитивная свертка критериев):

$$K^{\Sigma} = v_l \varphi(l_i^p) + v_n \varphi(n_i^e) + v_w \varphi(w_i) \Rightarrow \max, \quad (13)$$

где v_l, v_n, v_w – веса критериев (10), (11), (12).

Задача определения значений весовых коэффициентов критериев v_l, v_n, v_w которые обуславливают выбор маршрутных пассажирских корреспонденций, формируемых из валидаций электронных проездных билетов. Очевидно, что результирующее множество должно соответствовать генеральной совокупности поездок пассажиров общественным транспортом. Оценку соответствия генеральной совокупности будем осуществлять по разнице между фактическими y_i ($i = \overline{1, z}$) и расчетными $f_i(v_l, v_n, v_w)$ ($i = \overline{1, z}$) параметрами пассажирских потоков. В соответствии с методом наименьших квадратов²:

$$\sum_i e_i^2 = \sum_i [y_i - f_i(v_l, v_n, v_w)]^2 \Rightarrow \min. \quad (14)$$

Необходимо определить минимум функции (14) по переменным весовым коэффициентам v_l, v_n, v_w . Для решения данной задачи нахождения безусловного экстремума функции нескольких переменных применяются численные методы³, например покоординатного спуска, градиента, наискорейшего спуска, сопряженных градиентов и т. д. Существенное значение имеет вопрос наличия локальных экстремумов, для выявления которых необходимо провести исследование функции (14).

Алгоритм расчета пассажирских корреспонденций электронного проездного билета. Формирование пассажирских корреспонденций из операций валидации электронных билетов предполагает обработку больших данных: десятков миллионов операций валидаций электронных билетов и сотен миллионов навигационных данных. Для такого массива информации применяются современные реляционные системы управления базами данных (СУБД), в настоящей работе используется MS SQL Server.

Расчет пассажирских корреспонденций состоит из следующих этапов:

Этап 1. Формирование траектории движения транспортных средств осуществляется из навигационных отметок системы спутниковой навигации в соответствии с выражением (3). Для каждого транспортного средства посредством языка SQL⁴ выполняется запрос, реализующий выражение (3). Из множества навигационных отметок выбираются элементы, которые находятся в зоне остановочных пунктов обслуживаемого маршрута (см. рисунок 4). Траектория движения транспортных средств описывается следующим реляционным отношением:

$$R(A, T, W, M^r, M^k, M^i), \quad (15)$$

где T – время навигационной отметки;

A – транспортное средство;

M^r, M^k – номер маршрута и направление движения соответственно;

W – остановочный пункт;

M^i – номер остановочного пункта в рейсе.

² Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 611 с.

³ Прокопенко Н. Ю. Методы оптимизации: учеб. пособие /Н. Ю. Прокопенко; Нижегород. гос. архитектур. – строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. 118 с. ISBN 978-5-528-00287-3.

⁴ SQL - structured query language, язык структурированных запросов, декларативный язык программирования, применяемый для создания, модификации и управления данными в реляционной СУБД.

Этап 2. Расчет допустимых вариантов связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей (k -й) поездки с пунктами начала следующей ($k+1$ -й) поездки.

Для электронного проездного билета известно множество операций валидации, которое описывается следующим реляционным отношением:

$$E(I^o, I^t, T, M^r, M^k, A), \quad (16)$$

с атрибутами:

I^o – идентификатор операции валидации электронного проездного билета I^t ;

T – время операции валидации;

M^r, M^k – номер маршрута и направление движения соответственно;

A – идентификатор транспортного средства.

Элемент данного множества – это кортеж отношения, который обозначается как $e(i^o, i^t, t, m^r, m^k, a)$ или e_k (k -я операция валидации).

Из операции валидации известен номер маршрута ($e_k.m^r$). Рейс поездки пассажира $e_k.m^k$ определяется направлением движения по маршруту $d_k.m^k$, которое устанавливается из траектории движения транспортного средства (сформированной на этапе 1).

В соответствии с выражением (4) для текущей (k -й) пассажирской корреспонденции формируется множество допустимых вариантов связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей (k -й) поездки с пунктами начала следующей ($k+1$ -й) поездки.

Этап 2 состоит из следующих операций:

2.1. Определение ближайшего остановочного пункта w_{k1}^- ($w_{k1}^- \in W_k^-$), расположенного перед точкой валидации проездного билета e_k , и первого остановочного пункта после данной точки w_{k1}^+ ($w_{k1}^+ \in W_k^+$). Если операция валидации выполнена на остановочном пункте, $w_{k1}^- = w_{k1}^+ = w_{k1}$ и w_{k1}^+ определяются из фактической траектории транспортного средства по времени выполнения операции валидации:

Ближайший остановочный пункт перед операцией валидации

$$\min(r_a.t); r_a.t \geq e_k.t; r_a \in R_a, \quad (17)$$

первый остановочный пункт после операции валидации

$$\max(r_a.t); r_a.t \leq e_k.t; r_a \in R_a, \quad (18)$$

где r_a – кортеж отношения фактической траектории движения R_a -го транспортного средства;

$e_k.t$ – время выполнения k -й операции валидации.

2.2. В соответствии с выражением (5) формируется множество допустимых вариантов связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей (k -й) поездки с пунктами начала следующей ($k+1$ -й) поездки, которое описывается следующим реляционным отношением:

$$X(I^x, I_k^v, W_k, M_k^i, M_k^v, I_{k+1}^v, W_{k+1}, M_{k+1}^i, M_{k+1}^v, L^p), \quad (19)$$

где I^x – идентификатор варианта;

I_k^v, I_{k+1}^v – идентификатор k -й и $k+1$ -й операции валидации соответственно;

W_k, W_{k+1} – идентификатор остановочного пункта k -й и $k+1$ -й операции валидации соответственно;

M_k^i, M_{k+1}^i – номер остановочного пункта в рейсе по маршруту k -й и $k+1$ -й операции валидации соответственно;

M_k^v – номер ближайшего остановочного пункта, расположенного в маршруте после k -й операции валидации;

M_{k+1}^v – номер ближайшего остановочного пункта, расположенного в маршруте перед $k+1$ -й операцией валидации;

L^p – евклидово расстояние между пунктами W_k, W_{k+1} .

2.3. Для каждого элемента множества X_{k+1}^k рассчитываются значения оценочных критериев в соответствии с выражениями (10), (11) и (12), которые представлены следующим реляционным отношением:

$$\Phi(I, \Phi^l, \Phi^n, \Phi^w), \quad (20)$$

где Φ^l, Φ^n, Φ^w – значение соответствующего оценочного критерия: расстояния пешеходной доступности, номера остановочного пункта от операции валидации и удельного веса использования остановочного пункта пассажиром.

Этап 3. Расчет пассажирских корреспонденций. В соответствии с выражением (13) для каждого элемента множества X_{k+1}^k рассчитывается агрегированный критерий и по его наибольшему значению выбирается пункт завершения k -й и пункт начала $k+1$ -й поездок пассажира. Веса критериев v_l, v_n, v_w считаются известными.

В результате формируются маршрутные пассажирские корреспонденции электронного билета, которые описываются реляционным отношением

$$P(I^v, M^r, M^k, W^a, T^a, W^d, T^d, L), \quad (21)$$

где I^v – идентификатор операции валидации;

M^r, M^k – номер маршрута и направление движения соответственно;

W^a, W^d – идентификатор остановочного пункта начала и завершения пассажирской корреспонденции соответственно;

T^a, T^d – время начала и завершения пассажирской корреспонденции соответственно;

L – длина корреспонденции.

Длина пассажирской корреспонденции рассчитывается как сумма длин перегонов между пунктами начала и окончания корреспонденции в соответствии с рейсом транспортного средства. Время начала и завершения корреспонденции определяется из фактической траектории движения транспортного средства.

Как упоминалось выше, пассажир может выполнять поездки, которые не фиксируются в операциях валидации электронного билета, например такси. В этом случае прерывается цепочка поездок по электронному билету, некоторая часть операций валидации остается неинтерпретированной.

Этап 4. Расчет коэффициентов балансировки для учета неинтерпретированных пассажирских корреспонденций.

Для каждой неинтерпретированной пассажирской корреспонденции известна точка маршрута операции валидации электронного билета. Расчет коэффициентов балансировки осуществляется исходя из числа отправок пассажира в рамках транспортного района (transportation analysis zones, TAZ) операции валидации. Расчет коэффициентов балансировки производится для каждой неинтерпретированной операции валидации следующим образом:

4.1. Рассчитывается число отправок n^a и прибытий n^d пассажирских корреспонденций по транспортному району операции валидации, определенному радиусом, равным расстоянию пешеходной доступности L_p .

4.2. При расчете коэффициента балансировки учитывается условие, в соответствии с которым число отправок пассажира из транспортного района должно соответствовать числу прибытий, т. е. $n^a = n^d$.

Коэффициент балансировки определяется для интерпретированных операций электронного проездного следующим образом:

$$\phi_k = \phi'_k + \frac{1}{n^a}, \text{ если } n^a < n^d, l(e_k, p_k, i^a) \leq L_p, \quad (22)$$

$$\phi_k = \phi'_k + \frac{1}{n^d}, \text{ если } n^a > n^d, l(e_k, p_k, i^d) \leq L_p, \quad (23)$$

$$\begin{cases} \phi_k = \phi'_k + \frac{1}{2n^a}, \text{ если } n^a = n^d, l(e_k, p_k, i^a) \leq L_p \\ \phi_k = \phi'_k + \frac{1}{2n^d}, \text{ если } n^a = n^d, l(e_k, p_k, i^d) \leq L_p \end{cases}, \quad (24)$$

если $n^a \neq 0$ и $n^d \neq 0$,

где ϕ'_k – текущее значение коэффициента балансировки k -й корреспонденции электронного билета (в начале расчета $\phi'_k = 1$);

n^a – количество корреспонденций электронного билета с начальным пунктом на расстоянии пешеходной доступности от e_k ;

n^d – количество корреспонденций электронного билета с конечным пунктом на расстоянии пешеходной доступности от e_k ;

$l(e_k, p_k, i^a)$ расстояние между точкой валидации e_k и остановочным пунктом p_k, i^a (евклидова длина прямой между остановочными пунктами).

В соответствии с выражениями (22) – (24) каждая неинтерпретированная валидация балансируется через интерпретированные операции транспортного района следующим образом:

- число отправок увеличивается на 1, если прибытий n^a больше, чем отправок n^d ;
- если прибытий меньше, чем отправок – на 1 увеличивается число прибытий;
- если $n^a = n^d$, число отправок и прибытий увеличивается на 0,5.

Для случаев $n^a = 0$ или $n^d = 0$ коэффициент балансировки рассчитывается в рамках маршрута при расчете удельного веса поездок по электронным проездным билетам.

Этап 5. На основании маршрутных поездок (21) выполняется *расчет сетевых корреспонденций*. Алгоритм расчета приведен в [23, 25].

Определение спроса на общественный транспорт. Транспортный спрос представляется в виде матриц межостановочных маршрутных (ММК) или сетевых (МСК) пассажирских корреспонденций⁵, которые формируются как некая усредненная модель потребности населения в передвижениях по транспортной сети:

⁵ Online TDM Encyclopedia – Sustainable Transportation and TDM [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://co-dot.gov/projects/i70mountaincss/assets/docs/pdfs/online-tdm-encyclopedia-sustainable-transportation.pdf> (дата обращения 21.05.2022)

$$Q = \|T_{ij}\|; i, j = 1, \dots, n, \quad (25)$$

где T_{ij} – количество передвижений пассажиров, совершаемых за интересующий период времени между пунктами i, j .

Рассмотрим порядок определения ММК из операций валидации электронных билетов. При расчете ММК необходимо учесть удельный вес поездок по электронным билетам и нераспознанные операции валидации. Расчет количества поездок между пунктами ij осуществляется следующим образом:

$$T_{ij} = \sum_m \sum_{\substack{p_k.i^a=i \\ p_k.i^d=j \\ p_k.m^r=m}} \frac{\phi_k}{\alpha_m^r}, \quad (26)$$

где ϕ_k – коэффициент балансировки k -й пассажирской корреспонденции, посредством которого учитываются неинтерпретированные операции валидации ($\phi_k \geq 1$);

$p_k.i^a, p_k.i^d$ – пункт отправления и прибытия k -й пассажирской корреспонденции соответственно;

α_m^r – удельный вес перевозок по электронным билетам по m -му маршруту [28] ($0 < \alpha_m^r \leq 1$).

$$\alpha_m^r = (Q'_m - q_m)/Q_m, \quad (27)$$

где, Q'_m, Q_m – количество пассажиров, перевезенных по электронным билетам и общее

количество пассажиров m -го маршрута соответственно;

q_m – число несбалансированных неинтерпретированных корреспонденций по m -му маршруту.

3. Практическая реализация.

Апробация рассматриваемой методики осуществлена по данным системы общественного транспорта г. Красноярска за апрель 2019 г., предоставленных МКУ «Красноярсгортранс». Эта информация использована в работах [23, 25] с описанием предыдущего варианта методики мониторинга спроса общественного транспорта из валидаций электронных проездных билетов, что позволяет объективно оценить эффективность нового варианта методики.

МКУ «Красноярсгортранс» в формате СУБД MS SQL Server предоставлена следующая информация:

- навигационные данные спутникового позиционирования транспортных средств (таблица 2);
- описание маршрутной сети (таблица 3 и 4);
- операции валидации электронных проездных билетов (таблица 5).

Объем данных: 144 млн навигационных отметок системы спутникового позиционирования и более 6 млн операций валидации электронных билетов.

Таблица 2
Фрагмент навигационных отметок системы спутникового позиционирования,
где $Lat, Long$ – координаты (широта и долгота); V – скорость транспортного средства
Источник: составлено авторами.

Table 2
Fragment of navigation marks of the satellite positioning system, where:
 $Lat, Long$ – coordinates (latitude and longitude); V – vehicle speed
Source: compiled by the authors.

A	M^r	T	Lat	Long	V
EB 687	64	20.04.2019 5:15:19	56,04376	92,783055	7
EB 687	64	20.04.2019 5:15:29	56,04374	92,782662	10
EB 687	64	20.04.2019 5:15:39	56,04387	92,78243	9
EB 687	64	20.04.2019 5:15:49	56,04395	92,782273	6
EB 687	64	20.04.2019 5:15:59	56,04405	92,78205	2
EB 687	64	20.04.2019 5:16:09	56,04419	92,781848	7
EB 687	64	20.04.2019 5:16:19	56,04432	92,781655	7
EB 687	64	20.04.2019 5:16:29	56,04441	92,78137	7
EB 687	64	20.04.2019 5:16:39	56,04433	92,781105	7
EB 687	64	20.04.2019 5:16:49	56,04418	92,780775	8

Таблица 3

Фрагмент списка остановочных пунктов,
где *id* – идентификатор; *Nm* – наименование; *Lat*, *Long* – координаты (широта и долгота)
Источник: составлено авторами.

Table 3

Fragment of stopping points list,
where: *id* – identifier; *Nm* – name; *Lat*, *Long* – coordinates (latitude and longitude)
Source: compiled by the authors.

<i>id</i>	<i>Nm</i>	<i>Lat</i>	<i>Long</i>
25	Школа (ул. Судостроительная)	55,982063	92,833626
27	ЛДК	55,983582	92,883812
29	Студенческая (ул. Свердловская)	55,983150	92,879295
32	Художественное училище	55,981358	92,862823
33	Хлебозавод (ул. Свердловская)	55,980495	92,856873
35	Юбилейная (ул. Свердловская)	55,979836	92,850945
37	Октябрьская (ул. Свердловская)	55,978786	92,841217
39	Станция «Енисей»	55,978127	92,835556
41	ОАО «Красфарма» (ул. Свердловская)	55,976963	92,820518

Таблица 4

Фрагмент рейсов маршрутов, где *L* – длина перегона; *L^Σ* – накопленная длина с начала маршрута
Источник: составлено авторами.

Table 4

Fragment of route trips, where: *L* – the length of the section; *L^Σ* – accumulated length from the beginning of the route
Source: compiled by the authors.

<i>M^r</i>	<i>M^k</i>	<i>Mⁱ</i>	<i>W</i>	<i>L</i>	<i>L^Σ</i>
10	A	8	66	0,2644	3,0087
10	A	9	95	0,2760	3,2848
10	A	10	116	0,4940	3,7788
10	A	11	118	0,8018	4,5806
10	A	12	120	0,5833	5,1640
10	A	13	122	0,4393	5,6033

Таблица 5

Фрагмент операций валидации электронных проездных билетов
Источник: составлено авторами.

Table 5

Fragment of e-ticket validation operations
Source: compiled by the authors.

<i>I^o</i>	<i>Iⁱ</i>	<i>T</i>	<i>M^r</i>	<i>M^k</i>	<i>A</i>
13119511	100010324	10.04.19 15:34:46	58		M 931 KK
13119512	100010324	10.04.19 17:23:06	95		EB 512
13119513	100010324	17.04.19 15:09:36	85		EE 183
13119514	100010324	18.04.19 9:23:22	61		K 119 OE
13119515	100010324	23.04.19 8:51:17	61		K 721 HP
13119516	100010324	02.04.19 17:58:22	95		EB 986
13119526	100010324	12.04.19 14:41:06	95		EB 988
13119527	100010324	14.04.19 14:49:29	95		EB 976
13119528	100010324	18.04.19 10:18:40	94		X 724 HX

Примечание. Направление движения по маршруту *M^k* определяется в процессе расчета из траектории движения транспортного средства (таблица 7).

Разработанная компьютерная программа расчета пассажирских корреспонденций из операций валидаций электронных проездных билетов состоит из основных разделов, представленных в таблице 6.

Фрагмент фактической траектории движения транспортных средств через остановоч-

ные пункты обслуживаемого маршрута (этап 1 расчетов) приведен в таблице 7. В расчетах использован радиус зоны остановочного пункта 175 м, если интервал между навигационными отметками больше 30 с, и 100 м – при меньших значениях интервала.

Таблица 6
Разделы (подсистемы) компьютерной программы расчета пассажирских корреспонденций из операций валидаций электронных проездных билетов городского общественного транспорта
Источник: составлено авторами.

Table 6
Sections (subsystems) of a computer program for calculating passenger correspondence from the operations of validating electronic travel tickets for urban public transport
Source: compiled by the authors.

Раздел	Описание	Время расчета, ч*
Этап 1	Формирование фактической траектории движения транспортных средств через остановочные пункты обслуживаемого маршрута	5
Этап 2	Определение допустимых вариантов связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей (k-й) поездки с пунктами начала следующей (k+1-й) поездки. Расчет оценочных показателей	50
Этап 3	Расчет пассажирских корреспонденций	4
Этап 4	Расчет коэффициентов балансировки, для учета неинтерпретированных пассажирских корреспонденций	4
Этап 5	Расчет сетевых пассажирских корреспонденций	5

Примечание. *Ориентировочное время рассматриваемого тестового примера на компьютере Intel Core i7 2.80GHz, ОП 16,0 ГБ, Windows 10 Pro.

Таблица 7
Фрагмент траектории движения транспортных средств
Источник: составлено авторами.

Table 7
Fragment of the vehicles movement
Source: compiled by the authors.

A	T	W	M ^r	M ^k	M ⁱ
3	21.04.19 12:16:00	335	6тр	A	19
3	21.04.19 12:16:00	336	6тр	B	11
3	21.04.19 12:16:10	335	6тр	A	19
3	21.04.19 12:16:10	336	6тр	B	11
3	21.04.19 12:16:20	335	6тр	A	19
3	21.04.19 12:16:20	336	6тр	B	11
3	21.04.19 12:16:30	335	6тр	A	19
3	21.04.19 12:16:30	336	6тр	B	11

В таблице 8 приведен фрагмент допустимых вариантов связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей (k-й) поездки с пунктами начала следующей (k+1-й) поездки, полученных в результате 2-го этапа расчета. Для каждого варианта связности осуществляется расчет оценочных показателей (таблица 9).

При известных весовых коэффициентах v_p, v_n, v_w можно определить интегральный критерий Φ^Σ , по наибольшему значению которого осуществляется выбор варианта связности x_{k+1}^k цепочки поездок по электронному проездному билету и на этой основе формируются пассажирские корреспонденции (см. рисунок 5).

Таблица 8

Допустимые варианты связности X_{k+1}^k пунктов завершения текущей поездки с пунктами начала следующей поездки (фрагмент)
Источник: составлено авторами.

Table 8

Possible options for connecting X_{k+1}^k the alighting points of the current trip with the boarding points of the next trip (fragment)
Source: compiled by the authors.

I^x	I_k^v	W_k	M_k^i	M_k^v	I_{k+1}^v	W_{k+1}	M_{k+1}^i	M_{k+1}^v	L^p
29030	13119546	741	29	9	13119524	742	30	30	0,04
30029	13119546	743	30	9	13119524	744	29	30	0,05
28030	13119546	739	28	9	13119524	742	30	30	0,45
31028	13119546	745	31	9	13119524	746	28	30	0,04
30030	13119546	743	30	9	13119524	742	30	30	0,59
32028	13119546	751	32	9	13119524	746	28	30	0,24
32027	13119546	751	32	9	13119524	752	27	30	0,07
31029	13119546	745	31	9	13119524	744	29	30	0,53
29029	13119546	741	29	9	13119524	744	29	30	0,55

Таблица 9

Результаты расчета значений оценочных критериев (фрагмент)
Источник: составлено авторами.

Table 9

Results of calculating the evaluation criteria values (fragment)
Source: compiled by the authors.

I^x	Φ^i	Φ^n	Φ^w	Φ^Σ
29030	0,96	1,00	0,03	1,98
30029	0,95	0,80	0,00	1,75
28030	0,55	1,00	0,03	1,57
31028	0,96	0,60	0,00	1,56
30030	0,41	1,00	0,03	1,43
32028	0,76	0,60	0,00	1,36
32027	0,93	0,40	0,00	1,33
31029	0,47	0,80	0,00	1,27
29029	0,45	0,80	0,00	1,25
33026	0,97	0,20	0,00	1,17
30028	0,51	0,60	0,00	1,11
31027	0,71	0,40	0,00	1,11
32029	0,29	0,80	0,00	1,09
34024	1,00	0,00	0,00	1,00

Для расчета пассажирских корреспонденций требуется определить значения весовых коэффициентов v_p, v_n, v_w таким образом, чтобы результирующее множество поездок пассажиров, полученных из операций валидации электронных проездных билетов, в максимальной

степени соответствовало генеральной совокупности поездок общественным транспортом. Оценку параметров генеральной совокупности будем выполнять по результатам натурного обследования пассажирских потоков.

Данные автоматизированного учета получены от МКУ «Красноярскгортранс». Выборочное обследование пассажиропотоков по 5 маршрутам осуществлено в апреле 2019 г. (в период, за который произведена обработка валидаций проездных билетов). Учет пассажиров выполнен с использованием специального оборудования, смонтированного в транспортных средствах. Объем данных составляет более 281 тыс. пассажиров, обследовано 6938 рейсов.

Сформируем две выборки маршрутных пассажирских корреспонденций: из валидаций электронных билетов (выборка 1) и натурного обследования пассажиропотоков (выборка 2). В качестве критерия соответствия данных выборок рассматривается квадрат разницы удельного веса входящих и выходящих пассажиров на остановочных пунктах маршрутов:

$$F(v_l, v_n, v_w) = \sum_i \sum_k \sum_j (q_{ikj}^v - q_{ikj}^*)^2 \Rightarrow \min, \quad (28)$$

где q_{ikj}^v, q_{ikj}^* – удельный вес входящих или выходящих пассажиров на j -м остановочном пункте k -го направления i -го маршрута, определенный из валидаций электронных билетов и натурного обследования пассажирских потоков соответственно.

Таким образом, необходимо установить минимум функции (32) по переменным весовых коэффициентов v_l, v_n, v_w . Проведем исследование функции (32), для этого построим график зависимости значений функции от переменных v_l, v_n, v_w .

Как упоминалось выше, расчет пассажирских корреспонденций осуществляется на основе допустимых вариантов связности пунктов завершения текущей поездки с пунктами начала следующей поездки. Для исследования функции (28) этап 3 расчета пассажирских корреспонденций выполняется при различных значениях переменных v_l, v_n, v_w , которые варьируются от 0 до 2,5 (см. таблицу 10, рисунок 7).

По результатам проведенного исследования можно заключить:

1. Точка минимума функции – это $v_l=1; v_n=1; v_w=0$. Значение интегрального критерия в точке минимума составляет 0,203.

2. Наибольшее влияние оказывает фактор расстояния между остановочными пунктами завершения предыдущей и начала следующей поездки (v_l). При исключении данного фактора $v_l=0$ критерий соответствия пассажирских корреспонденций из валидаций электронных билетов генеральной совокупности поездок ухудшается в 2 раза по сравнению с точкой минимума.

3. Номер остановочного пункта от операции валидации является вторым фактором по влиянию на критерий соответствия пассажирских корреспонденций генеральной совокупности. При $v_n=0$ критерий соответствия ухудшается на 75% (с 0,203 до 0,355).

4. Функция (28) не зависит от оценки частоты использования остановочного пункта (см. таблицу 10).

С использованием полученных значений весовых коэффициентов v_l, v_n, v_w выполнен расчет пассажирских корреспонденций. Сравним полученные результаты с предыдущим вариантом методики [23, 25], который будем называть методика 1, в отличие от методики, рассматриваемой в настоящей статье (методика 2). В таблице 11 приведено распределение операций валидации электронных билетов по дням апреля 2019 г., количество интерпретированных операций по обеим методикам. Из таблицы видно, что обе методики обеспечивают определение практически одинакового числа пассажирских корреспонденций: удельный вес интерпретированных операций составляет порядка 65%, если исключить три последних дня периода. К концу расчетного периода имеется тенденция снижения удельного веса распознанных операций, что объясняется отсутствием в базе данных операций валидации следующего месяца, связанных с поездками текущего периода.

Таблица 10
Результаты исследования функции (28)
Источник: составлено авторами.

Table 10
Results of function (32)
Source: compiled by the authors.

v_i	$f(v_l \vee v_n = 1; v_w = 1)$	$f(v n \vee v_l = 1; v_w = 1)$	$f(v w \vee v_l = 1; v_n = 1)$
0	0,423	0,355	0,203
0,5	0,216	0,226	
1	0,204	0,204	0,204
1,5	0,219	0,205	
2	0,227	0,207	
2,5		0,207	
Экстремум: $v_l=1; v_n=1; v_w=0$			0,203

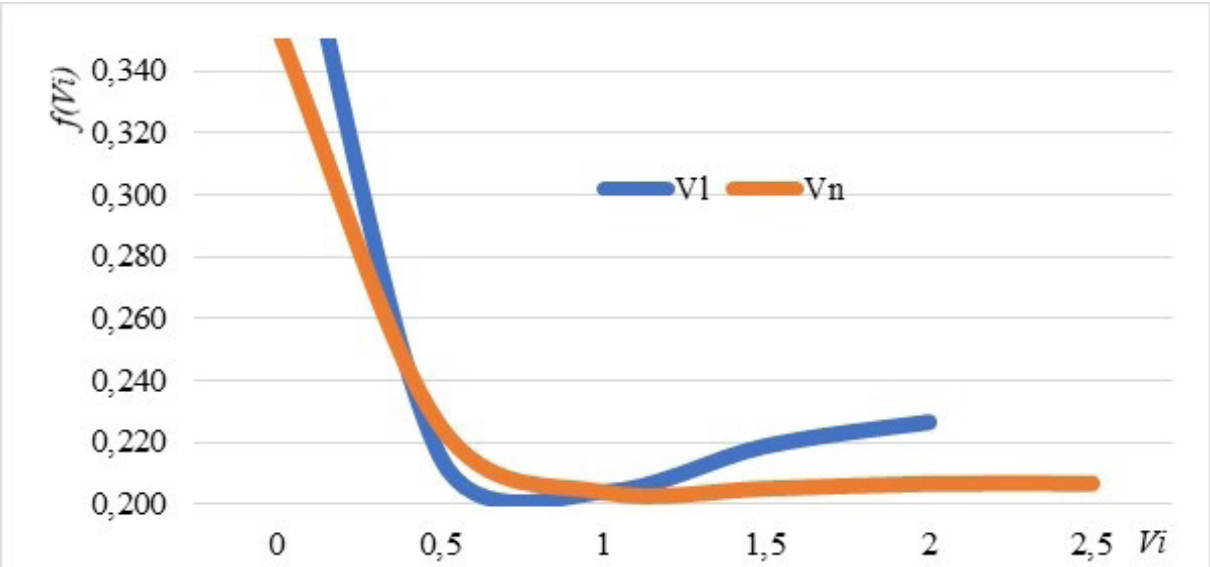


Рисунок 7 – Зависимость функции (28) от переменных v_l, v_n
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependence of the function (28) on v_l, v_n variables
Source: compiled by the authors.

Таблица 11
**Результаты обработки операций валидаций электронных проездных билетов
 общественного транспорта г. Красноярска (апрель, 2019 г.)**
 Источник: составлено авторами.

Table 11
**The results of processing validation operations of e-tickets
 in public transport of Krasnoyarsk city (April, 2019)**
 Source: compiled by the authors.

День месяца	Обработано валидаций				
	Всего	Интерпретировано (методика 1)		Интерпретировано (методика 2)	
		Кол-во	Уд.вес, %	Кол-во	Уд.вес, %
1	238789	152391	63,8	155108	65,0
2	253128	163643	64,6	165786	65,5
3	250250	163477	65,3	166549	66,6
4	253132	162679	64,3	165500	65,4
5	252721	160034	63,3	162598	64,3
6	164948	101464	61,5	102695	62,3
7	124539	77113	61,9	76973	61,8
8	238016	155675	65,4	156684	65,8
9	248460	163578	65,8	164200	66,1
10	247446	161197	65,1	162488	65,7
11	247844	163009	65,8	163103	65,8
12	242969	158770	65,3	158524	65,2
13	155113	101079	65,2	101240	65,3
14	116213	76060	65,4	75782	65,2
15	238363	155945	65,4	155781	65,4
16	255730	167073	65,3	166747	65,2
17	257936	168971	65,5	168661	65,4
18	239022	156863	65,6	156908	65,6
19	232266	149428	64,3	149298	64,3
20	160447	102859	64,1	102516	63,9
21	129981	85581	65,8	85938	66,1
22	241130	156714	65,0	157424	65,3
23	259047	164047	63,3	166277	64,2
24	235845	151504	64,2	153254	65,0
25	243887	156387	64,1	158725	65,1
26	235609	147355	62,5	149348	63,4
27	139348	85765	61,5	86398	62,0
28	116055	69071	59,5	69318	59,7
29	216090	125869	58,2	126819	58,7
30	231156	88322	38,2	85910	37,2
Σ	6465480	4091923	63,3	4116552	63,7

Как упоминалось выше, в методике 1 началом пассажирской корреспонденции считается остановочный пункт, предшествующий операции валидации. Это не всегда соответствует практике, пассажиры до оплаты поездки могут проехать одну-две остановки.

На некоторых маршрутах принято собирать плату за проезд перед выходом пас-

сажиром из транспортного средства. В этом случае остановочный пункт перед операцией валидации является завершением пассажирской корреспонденции. В методике 1 используются оценочные критерии для определения случаев валидации в конце поездки, которые существенно усложняют алгоритм.

В методике 2 отсутствует жесткая привязка к операции валидации пунктов начала и завершения корреспонденции. На рисунке 8 приведено распределение пассажирских корреспонденций по номеру остановочного пункта начала поездки от точки валидации электронного проездного билета. Из рисунка видно, что порядка 90% пассажиров осуществляют оплату за проезд на первом перегоне после посадки. Одну остановку до оплаты проезжает 5,4% пассажиров, 2 остановки – 2,1%. В конце проезда оплату осуществляют не более 5% пассажиров, такой способ сегодня в г. Красноярске практикуется на одном-двух маршрутах, на которых работают автобусы малого класса.

В таблице 12 приведен фрагмент пассажирских корреспонденций, сформированных посредством двух рассматриваемых методик. Из таблицы видно, что в некоторых корреспонденциях, сформированных по методике 2, пункт завершения отличается от методики

1. Это, например, корреспонденции 13119511 и 13119515, остановочные пункты завершения которых, определенные по методике 2, расположены на меньшем расстоянии пешеходного перемещения к остановке начала следующей поездки по сравнению с методикой 1. Также некоторые корреспонденции (например 13119512) имеют разные начальные остановочные пункты, поскольку в методике 2 начало пассажирской корреспонденции не обязательно ближайший пункт к операции валидации электронного проездного билета. Большая часть пассажирских корреспонденций, сформированных по методике 1 и методике 2 совпадают, поскольку, как упоминалось выше, порядка 90% пассажиров оплачивают проезд сразу же после посадки в транспортное средство, что отражается в обеих методиках. Длина пассажирских корреспонденций, сформированных по методикам 1 и 2, различается незначительно (на 1–2 км).

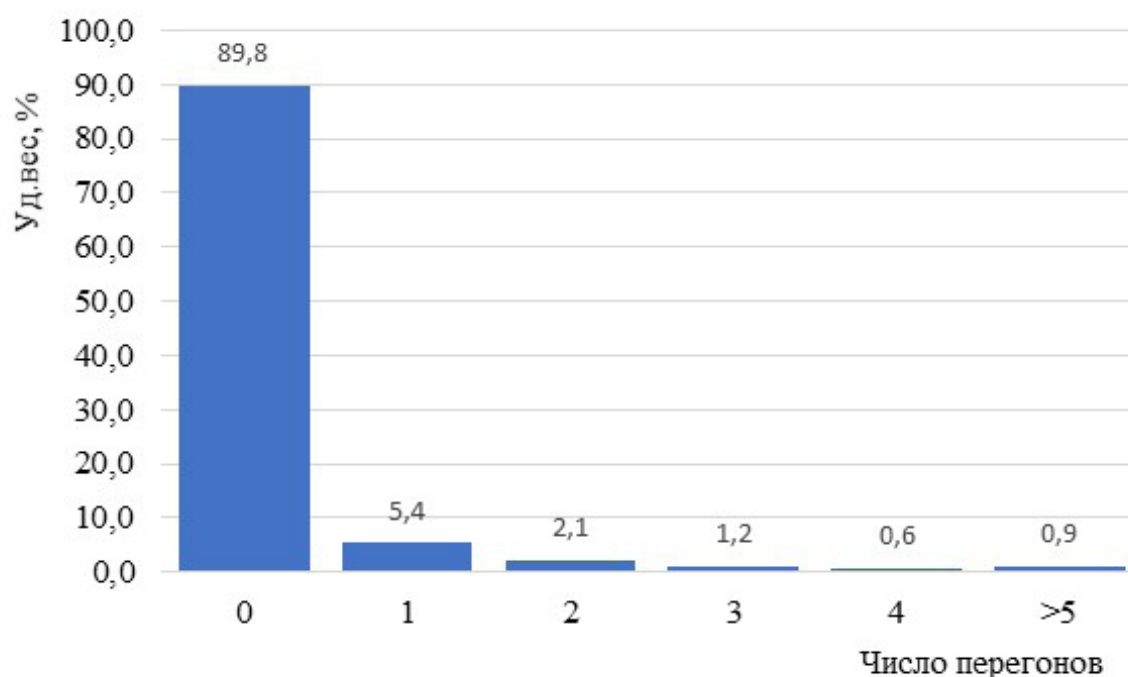


Рисунок 8 – Распределение пассажирских корреспонденций по номеру остановочного пункта начала поездки от точки валидации электронного проездного билета
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Distribution of passenger correspondence by the number of the stopping point passed before the operation of validating electronic ticket took a place
Source: compiled by the authors.

На рисунке 9 приведена схема связей начальных и конечных остановочных пунктов пассажирских корреспонденций двух электронных проездных билетов. На схеме радиус окружности пропорционален количеству прибытий или отправок пассажира, пункты отправления обозначены розовым цветом, прибытия – синим. На схеме остановочный пункт с наибольшим числом отправок (с наибольшим радиусом окружности) расположен вблизи места жительства пассажира. Остановочный пункт с наибольшим числом прибытий – это основное место притяжения пассажира (работа, учеба и т. д.). Кроме этого, можно выделить остановочные пункты культурно-бытовых корреспонденций, выполняемых с разной периодичностью.

На рисунке 10 дано распределение количества перевезенных пассажиров по часам буднего дня, определенное из валидаций электронных билетов по методикам 1 и 2 (2019 г) и сплошного обследования пассажирских потоков (2011 г.) общественного транспорта г.

Красноярска. Из рисунка видно, что поездки пассажиров по электронным билетам соответствуют динамике пассажирских потоков по часам суток из натурного обследования. Некоторые расхождения объясняются изменениями в структуре транспортного спроса, произошедшие с 2011 г.

В таблице 13 приведено распределение пассажирских корреспонденций по длине поездки. Из таблицы можно сделать вывод об одинаковой зависимости удельного веса поездок от длины пассажирских корреспонденций, полученных по методикам 1 и 2, а также из натурных обследований пассажирских потоков. Средняя дальность поездки пассажиров составляет 6,29 км по данным валидаций электронных проездных билетов и 6,66 км из обследования 2006 г. Разница в 5,6% между средней дальностью поездки пассажира в 2006 и 2019 гг. объясняется изменением системы маршрутов и спроса общественного транспорта.

Таблица 12

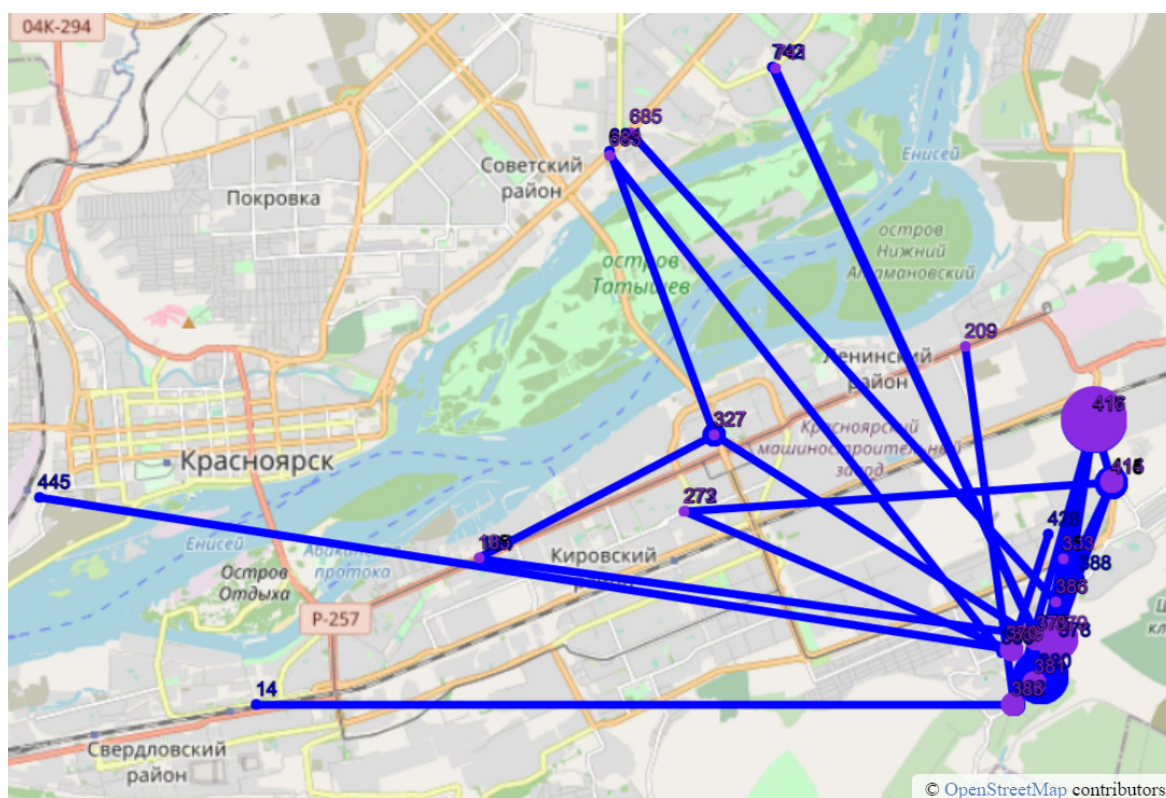
Список сформированных маршрутных корреспондентов с использованием методик 1 и 2 (фрагмент)
Источник: составлено авторами.

Table 12

List of generated trips using methods 1 and 2 (fragment)
Source: compiled by the authors.

Методика	Идентификатор	Маршрут IdSt*		Начало		Конец		Расстояние, км	
				Время	IdSt*	Время	Поездки	Пешее	
1	13119511	58	В	327	15:34	267	15:43	2,8	0,48
2	13119511	58	В	327	15:34	185	15:48	4,4	0,04
1	13119512	95	А	190	17:23	379	18:03	10,8	0,09
2	13119512	95	А	184	17:19	379	18:03	12,0	0,09
1	13119513	85	А	428	15:09	369	15:18	2,9	0,12
2	13119513	85	А	428	15:09	369	15:18	2,9	0,12
1	13119514	61	В	368	9:23	683	9:47	9,7	0,05
2	13119514	61	В	368	9:23	683	9:47	9,7	0,05
1	13119515	61	В	368	8:51	683	9:16	9,7	0,05
2	13119515	61	В	386	8:46	685	9:17	11,2	0,02
1	13119516	95	А	413	17:58				
2	13119516	95	А	415	17:56	379	18:04	2,3	0,09
1	13119517	85	В	382	8:22	416	8:45	7,0	0,02
2	13119517	85	В	382	8:20	416	8:41	7,0	0,02
1	13119518	78	А	417	14:41	353	14:45	2,0	0,33
2	13119518	78	А	417	14:40	353	14:45	2,0	0,33
1	13119519	61	А	327	10:43	375	11:00	6,3	0,44
2	13119519	61	А	327	10:42	375	11:00	6,3	0,44
1	13119520	95	В	380	11:55	416	12:04	3,6	0,02
2	13119520	95	В	380	11:54	416	12:04	3,6	0,02

Примечание. IdSt – идентификатор остановочного пункта.



а



б

Рисунок 9 – Схема связей начальных и конечных остановочных пунктов пассажирских корреспонденций электронного проездного билета:
а – электронный билет 100010324; б – электронный билет 100010341
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Scheme of connections between the boarding and alighting points of passenger correspondence from an electronic ticket transaction
Source: compiled by the authors.

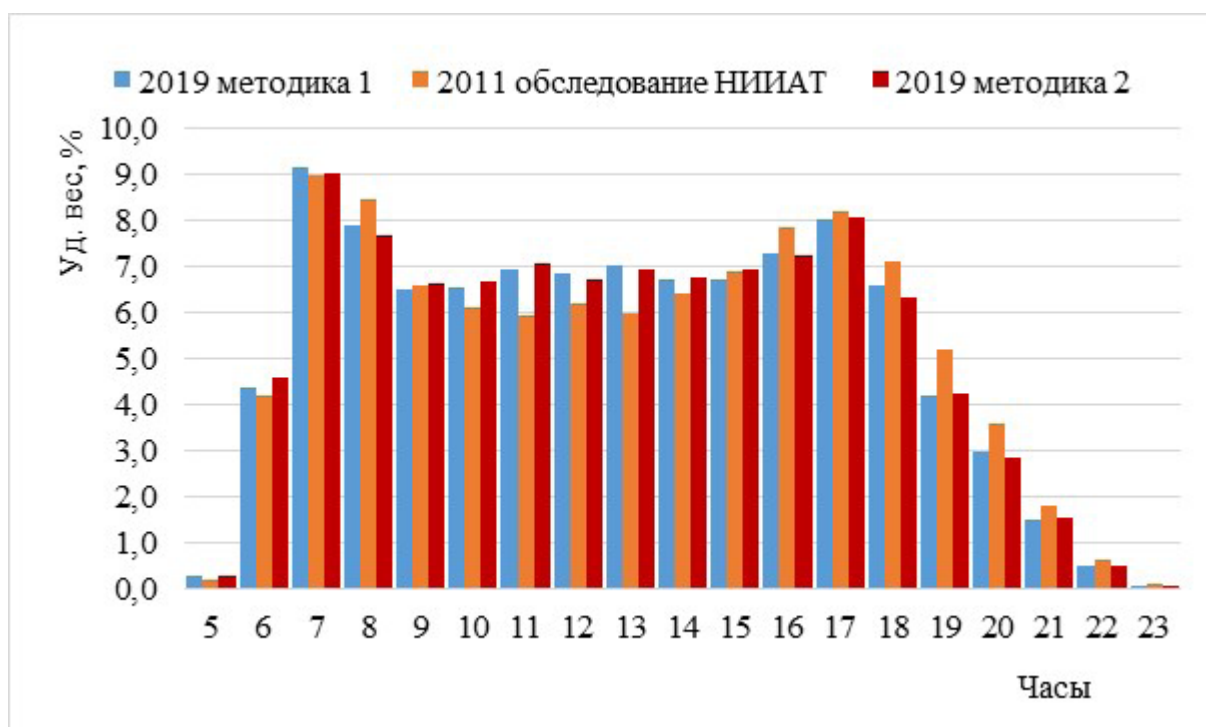


Рисунок 10 – Динамика количества перевезенных пассажиров по часам суток городским пассажирским транспортом общего пользования г. Красноярск
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Dynamics of hourly passengers number carried by urban public transport of the Krasnoyarsk city
Source: compiled by the authors.

Таблица 13
Распределение пассажирских корреспонденций по длине поездки
Источник: составлено авторами.

Table 13
Distribution of passenger correspondence by trip length
Source: compiled by the authors.

Пределы варьирования, км	Валидации октябрь 2019 г.		Обследование 2006 г.	Обследование 2011 г.
	Методика 1	Методика 2		
0-5	49,9	49,8	49,5	46,3
5-10	32,2	32,2	29,2	32,0
10-15	12,1	12,1	13,2	14,4
15-20	4,2	4,2	5,6	5,6
20-25	1,3	1,3	1,9	1,4
25-30	0,3	0,3	0,5	0,2
30-35	0,0	0,0	0,1	0,0

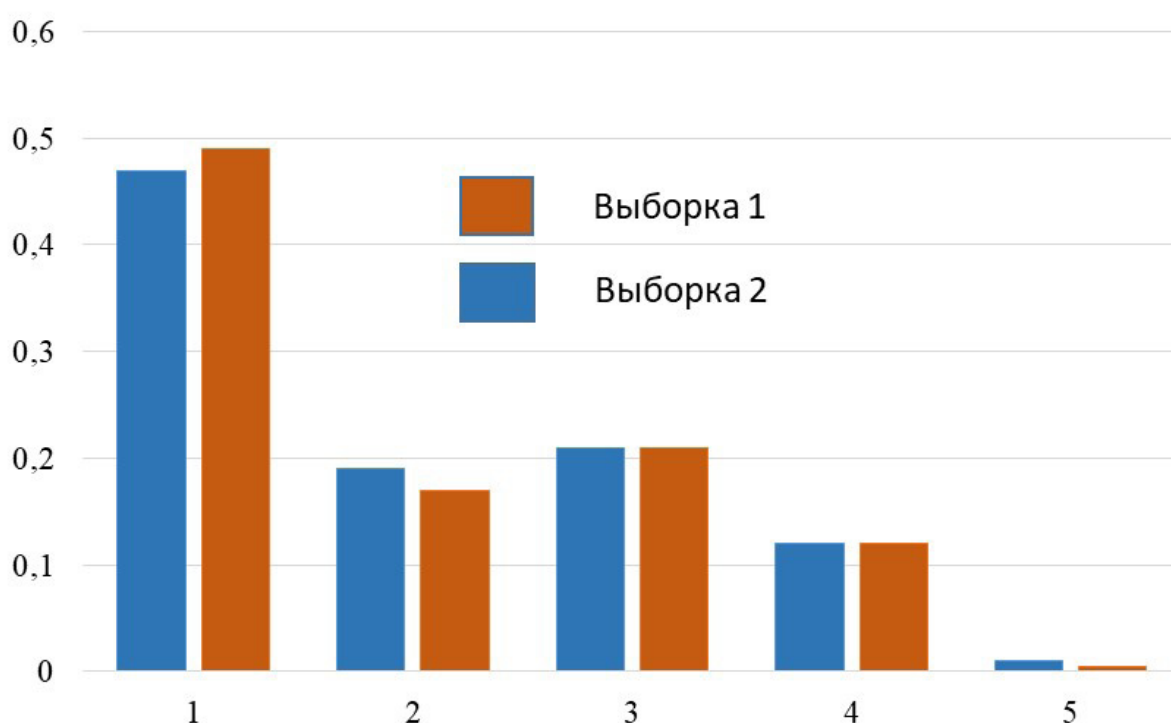


Рисунок 11 – Гистограмма распределения числа вошедших пассажиров по длине маршрута № 26 (прямое направление, вошло пассажиров)
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Histogram of the passengers boarding number distribution along the length of route No. 26 (direct direction)
Source: compiled by the authors.

4. Репрезентативность результатов.

Необходимо установить соответствие пассажирских корреспонденций, определенных по валидациям электронных проездных билетов, всем поездкам пассажиров общественным транспортом. Методика, позволяющая решить данную задачу, приведена в [23].

Оценка репрезентативности выборки поездок по электронным билетам осуществляется путем сравнения ее с результатами выборочного автоматизированного учета пассажиров. Рассматриваются две выборки маршрутных пассажирских корреспонденций: из валидаций электронных билетов (выборка 1) и натурного обследования пассажиропотоков (выборка 2). Сравнивается распределение по длине маршрута количества входящих и выходящих пассажиров в данных выборках.

Маршрут разделен на k непересекающихся интервалов. Для каждого интервала рассчитывается удельный вес вошедших и вышедших пассажиров в соответствии с выборками 1 и 2. Таким образом формируются

две независимые несвязные выборки. Для их сравнения применяется критерий Стьюдента (t -критерий), который позволяет найти вероятность того, что оба средних значения в выборках относятся к одной и той же совокупности.

На рисунке 11 дана гистограмма распределения числа вошедших пассажиров одного из маршрутов, которая позволяет выдвинуть гипотезу о том, что обе выборки относятся к одной и той же совокупности.

В результате проведенных расчетов получено: наибольшее значение статистики составляет 2,450 (маршрут № 26, прямое направление, вышло пассажиров). Из Excel получаем P -значение 0,02. Большинство значений критерия превышает критическое значение 1,860. Таким образом делаем вывод: пассажирские корреспонденции из валидаций электронных проездных билетов обеспечивают оценку параметров спроса общественного транспорта в пределах допустимых погрешностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для обеспечения мобильности населения актуальной проблемой является создание системы мониторинга спроса общественно-го транспорта с целью постоянного контроля пассажирских потоков населения, параметры которых служат для обоснования управленческих решений по формированию оптимально-го транспортного предложения.

2. Существующие методы определения пассажирских потоков вследствие их трудоемкости и ограниченной эффективности не позволяют осуществлять на должном уровне мониторинг транспортного спроса. Сегодня широкое распространение получают технологии, основанные на сборе, интеграции и анализе больших данных Big data, Urban computing.

В рамках данного подхода в настоящей статье представлено решение задачи определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством анализа операций валидаций электронных проездных билетов (Electronic Travel Tickets): смарт-карт (smart card), транспортных карт, магнитных карт, мобильных телефонов или других электронных устройств (Electronic Gadgets), реквизиты которых фиксируются в автоматизированной системе оплаты проезда Automated Fare Collection при выполнении операции валидации.

Разработанная методика расчета пассажирских корреспонденций из операций валидации электронных проездных билетов, интегрированных с данными глобальной навигационной спутниковой системы, в отличие от ранее выполненных исследований, учитывает практику оплаты проезда в любой точке маршрута, не обязательно сразу же после посадки в транспортное средство.

3. Теоретически обоснованная методика определения спроса на городской общественный транспорт, основанная на определении и оценке множества допустимых вариантов связанности последовательности пассажирских поездок посредством критерия, формируемого из вектора оценочных показателей, позволяет рассчитывать параметры пассажирских корреспонденций с учетом множества факторов, оказывающих влияние на выбор пассажиром маршрутов поездок.

При помощи разработанной методики интерпретируется порядка 65% поездок по электронным проездным билетам.

4. Разработанный метод определения значений весовых коэффициентов оценочных

показателей, которые обуславливают выбор маршрутных пассажирских корреспонденций, формируемых из валидаций электронных проездных билетов, позволяет рассчитывать результирующее множество поездок пассажира по критерию соответствия генеральной совокупности спроса общественного транспорта.

5. Доказано, что пассажирские корреспонденции из валидаций электронных проездных билетов позволяют оценить параметры спроса общественного транспорта в пределах допустимых погрешностей.

6. Применение разработанной методики расчета спроса на городской общественный транспорт из операций валидации электронных билетов обеспечивает непрерывный мониторинг пассажирских потоков, технико-эксплуатационных показателей функционирования общественного транспорта и таким образом позволяет реализовать концепцию устойчивого развития общественного транспорта посредством проектирования транспортного предложения, соответствующего спросу.

7. Направлением дальнейших исследований является:

- анализ факторов выбора из допустимых вариантов связанности пассажирских корреспонденций, таких как оборудование остановочных пунктов, место их расположения, например рядом с магазинами, лечебными заведениями и т. д.;

- формирование комплекса отчетных форм для использования в работе органов и организаций управления общественным транспортом;

- интеграция имеющегося программного обеспечения в систему учета оплаты проезда и диспетчерского управления движением транспорта для создания промышленной технологии непрерывного мониторинга пассажирских потоков общественного городского транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селиверстов Я. А., Селиверстов С. А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2–3 (217–222). С. 49–70
2. Zheng Y, Capra L, Wolfson O, and Yang H, Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. ACM Trans. Intell. Syst. Technol., vol. 5, no. 3, pp. 1–55, Sep. 2014.
3. Barry J.J., Freimer R., Slavin H.L. Use of entry-only automatic fare collection data to estimate linked transit trips in New York City. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. 2009; 2112: 53–61.

4. Alfred Chu K., Chapleau R., 2008. Enriching archived smart card transaction data for transit demand modeling. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 063, 63–72
5. Munizaga M. A., Palma C., Mora P., 2010. Public transport O–D matrix estimation from smart card payment system data. In: 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Paper No. 2988.
6. Nassir N. Khani A., Lee S.G., Noh H., Hickman M. Transit stop-level origin–destination estimation through use of transit schedule and automated data collection system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2263: 140–150.
7. Barry J. J. Newhouser R., Rahbee A., Sayeda S. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. *Transportation Research, Record* 1817, 2002. Pp.183–187.
8. Zhao J., Rahbee A., Wilson N. Estimating a rail passenger trip origin–destination matrix using automatic data collection systems. *Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 22, 2007. Pp.376–387.
9. Li D., Lin Y., Zhao X., Song H., Zou N. (2011) Estimating a Transit Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Fare Collection System. In: Xu J., Yu G., Zhou S., Unland R. (eds) *Database Systems for Adanced Applications. DASFAA 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6637. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20244-5_48
10. Munizaga M., Palma C. Estimation of a disaggregate multimodal public transport OD matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C*, Vol. 24, 2012. Pp.9–18.
11. Alsger A., Assemi B., Mesbah M., Ferreira L., Validating and improving public transport origin–destination estimation algorithm using smart card fare data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 68, 2016, Pages 490–506.
12. Gordon J., Koutsopoulos H., Wilson N., Attanucci J., 2013. Automated inference of linked transit journeys in London using fare-transaction and vehicle location data. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 2343, 17–24.
13. Farzin J. M., 2008. Constructing an automated bus origin–destination matrix using farecard and global positioning system data in Sro Paulo, Brazil. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 2072, 30–37
14. Cui A. Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
15. Zhao, J. 2004. The planning and analysis implications of automated data collection systems: rail transit OD matrix inference and path choice modeling examples. (MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology).
16. Nunes, A. A., Dias, T. G., & e Cunha, J. F. (2015). Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 17(1), 133–142.
17. Wang W., John P., Nigel H. M., Bus passenger origin–destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London. *Journal of Public Transportation*. 2011; 14(4).
18. Munizaga M. A., Devillaine F., Navarrete C., Silva D., 2014. Validating travel behaviour estimated from smartcard data. *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 44, 70–79.
19. Hofmann, M., O'Mahony, M., 2005. Transfer journey identification and analyses from electronic fare collection data. In: *Intelligent Transportation Systems, Proceedings IEEE*, pp. 34–39.
20. Joana H. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system / Joana Horaa, Teresa Galvão Diasa , Ana Camanhoea , Thiago Sobral // *Transportation Research Procedia* 27 (2017). pp. 664–671.
21. Nunes A. A., Dias, T. G., Cunha, J. F., 2016. Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 17. pp 133–142. doi:10.1109/TITS.2015.2464335
22. Trépanier M., Tranchant N., Chapleau R. Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2007. vol. 11. pp.1–14
23. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Обследование пассажирских потоков путем анализа валидаций электронных проездных билетов // *Вестник СибАДИ*. 2021; 18 (1):52–71. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>
24. Alsger A. Mesbah M., Ferreira L., Safi H. Use of smart card fare data to estimate public transport origin–destination matrix. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015; 2535: 88–96.
25. Fadeev A. I., Alhousseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012001. p. 9
26. Подиновский В. В., Потапов М. А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra // *Бизнес-информатика*. 2013. № 3 (25). С. 41–48.
27. Фетинина Е. П., Кораблина Т. В., Соловьева Ю. А. Типологические аспекты многокритериального выбора вариантов: монография/СибГИУ. Новокузнецк, 2003. 118 с.

REFERENCES

1. Seliverstov Ja. A., Seliverstov S. A. Metody i modeli postroenija matric transportnyh korre-spondenci [Methods and models for constructing matrices of transport correspondence] *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie*. 2015; 2-3(217-222): 49–70 (In Russ.)
2. Zheng Y, Capra L, Wolfson O, and Yang H, Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 5. no. 3. pp. 1-55, Sep. 2014.

3. Barry J. J., Freimer R., Slavin H. L. Use of entry-only automatic fare collection data to estimate linked transit trips in New York City. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2009; 2112:53-61.
4. Alfred Chu K., Chapleau R., 2008. Enriching archived smart card transaction data for transit demand modeling. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 063, 63–72
5. Munizaga M. A., Palma C., Mora P., 2010. Public transport O–D matrix estimation from smart card payment system data. In: 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Paper No. 2988.
6. Nassir N. Khani A., Lee S. G., Noh H., Hickman M. Transit stop-level origin–destination estimation through use of transit schedule and automated data collection system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 2011; 2263: 140-150.
7. Barry J.J. Newhouser R., Rahbee A., Sayeda S. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. *Transportation Research, Record* 1817, 2002. pp.183-187.
8. Zhao J., Rahbee A., Wilson N. Estimating a rail passenger trip origin- destination matrix using automatic data collection systems. *Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2007; vol. 22: 376-387.
9. Li D., Lin Y., Zhao X., Song H., Zou N. (2011) Estimating a Transit Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Fare Collection System. In: Xu J., Yu G., Zhou S., Unland R. (eds) *Database Systems for Adanced Applications. DASFAA 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6637. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20244-5_48
10. Munizaga M., Palma C. Estimation of a disaggregate multimodal public transport OD matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C*, 2012; Vol. 24: 9-18.
11. Alsger A., Assemi B., Mesbah M., Ferreira L., Validating and improving public transport origin–destination estimation algorithm using smart card fare data, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016; Volume 68: 490-506.
12. Gordon J., Koutsopoulos H., Wilson N., Attanucci J., 2013. Automated inference of linked transit journeys in London using fare-transaction and vehicle location data. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 2343, 17–24.
13. Farzin J.M., 2008. Constructing an automated bus origin–destination matrix using farecard and global positioning system data in Sro Paulo, Brazil. *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 2072, 30–37.
14. Cui A. Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
15. Zhao, J. 2004. The planning and analysis implications of automated data collection systems: rail transit OD matrix inference and path choice modeling examples. (MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology).
16. Nunes, A. A., Dias, T. G., & e Cunha, J. F. (2015). Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. *IEEE transactions on intelligent transportation systems.* 2015; 17(1): 133-142.
17. Wang W., John P., Nigel H.M., Bus passenger origin–destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London. *Journal of Public Transportation.* 2011; 14(4).
18. Munizaga M.A., Devillaine F., Navarrete C., Silva D., 2014. Validating travel behaviour estimated from smartcard data. *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 44, 70–79.
19. Hofmann, M., O'Mahony, M., 2005. Transfer journey identification and analyses from electronic fare collection data. In: *Intelligent Transportation Systems, Proceedings IEEE*, pp. 34–39.
20. Joana H. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system / Joana Horaa, Teresa Galvão Diasa, Ana Camanhóa, Thiago Sobral. *Transportation Research Procedia.* 2017; 27: 664–671
21. Nunes A. A., Dias T. G., Cunha J. F., 2016. Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 17. pp 133–142. doi:10.1109/TITS.2015.2464335
22. Trépanier M., Tranchant N., Chapleau R. Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, 2007. pp.1-14
23. Fadeev A.I., Alhusseini S. Transit ridership survey by analysis validation of electronic pass tickets. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2021;18(1):52-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>
24. Alsger A. Mesbah M., Ferreira L., Safi H. Use of smart card fare data to estimate public transport origin–destination matrix. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 2015; 2535: 88-96
25. Fadeev A.I., Alhusseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport ,2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012001. p. 9
26. Podinovskij V.V., Potapov M.A. Metod vzveshennoj summy kriteriev v analize mnogokriterial'nyh reshenij: pro et contra [The method of the weighted sum of criteria in the analysis of multi-criteria decisions: pro et contra]. *Biznes-informatika.* 2013; 3(25): 41 – 48 (In Russ.)
27. Fetinina E. P., Korablina T. V., Solov'eva Ju. A. *Tipologicheskie aspekty mnogokriterial'nogo vybora variantov: Monografija* [Typological aspects of the multi-criteria choice of options: Monograph] SibGIU. Novokuzneck, 2003: 118 (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А. И. Разработка методики расчета транспортного спроса из валидаций электронных проездных билетов, разработка программного обеспечения, методики оценки репрезентативности выборочной совокупности поездов генераль-

ному множеству пассажирских корреспонденций, анализ полученных данных, формулирование заключения.

Алхуссейни С. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, оценка репрезентативности выборочной совокупности поездок генеральному множеству пассажирских корреспонденций.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeev, Development of a methodology for calculating transport demand from the validation of electronic travel tickets, software development, and development of a methodology for evaluating the representativeness of a sample set of trips to a general set of passenger correspondence, analysis of the data obtained, and formulation of a conclusion.

Sami Alhousseini, an analysed status of the problem, literary sources review, participation in preparation and analysis input data for calculations, evaluation of the representativeness of the sample set of trips to the general set of passenger correspondence.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, доц. кафедры транспорта.

Алхуссейни Сами – аспирант кафедры транспорта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Dr of Sci., Associate Professor of the Transport Department.

Sami Alhousseini – Postgraduate student of the Transport Department.