

УДК 656

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>

ОБСЛЕДОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПОТОКОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА ВАЛИДАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕЗДНЫХ БИЛЕТОВ

А.И. Фадеев, С. АлхуссейниСибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применяемые сегодня методы определения спроса общественного транспорта предполагают большие затраты времени, ресурсов и высокую трудоемкость. В этой связи особую перспективу представляет изучение транспортного спроса на основе сбора, интеграции и анализа больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека: *Urban computing, Big data, Internet of things*.

Материалы и методы. В настоящей статье представлен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (*electronic travel tickets*): смарт-карты (*smart card*), транспортной карты, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (*electronic gadget*), реквизиты которых при выполнении валидации фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

Результаты. Алгоритм расчета пассажирских корреспонденций реализован в компьютерной программе с использованием реляционной СУБД MS SQL Server. Апробация эффективности разработанной методики и программного обеспечения осуществлена по данным системы пассажирского транспорта г. Красноярск.

Обсуждение и заключение. Описанный в статье метод расчета пассажирских потоков путем анализа операций валидации электронных проездных билетов и данных системы диспетчерского управления движением транспортных средств позволяет определять выполненные маршрутные и сетевые корреспонденции пассажиров и на этой основе осуществлять объективную оценку спроса общественного транспорта и технико-эксплуатационных показателей транспортной системы.

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

Поступила 17.11.20, принята к публикации 26.02.21.

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. Обследование пассажирских потоков путем анализа валидаций электронных проездных билетов / А.И. Фадеев, С. Алхуссейни. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 52-71.

© Фадеев А.И., Алхуссейни С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>

TRANSIT RIDERSHIP SURVEY BY ANALYSIS VALIDATION OF ELECTRONIC PASS TICKETS

Aleksandr I. Fadeev, Sami Alhousseini
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The methods used today for determining the demand on public transport come with a big waste of time, resources and a need for great effort. In this regard, a special perspective is to study the transit demand based on the collection, integration and analysis of large and diverse data, which were generated by various sources of human life: Urban computing, Big data, Internet of things.

Materials and methods. This article presents a method for determining (restoring) the correspondence of transit passengers by means of intelligent analysis of validation operations data of electronic travel tickets (smart card, transport card, magnetic card, mobile phone or other electronic devices (electronic gadgets)), which are recorded in the automated transportation management system during validation.

Results. The algorithm for calculating passenger correspondence is implemented in a computer program using the relational DBMS MS SQL Server. The effectiveness of the proposed algorithm was verified by calculating the passenger correspondence of public transport in the city of Krasnoyarsk (Russia).

Discussion and conclusion. The described method for calculating passenger flows, based on analyzing the data of validation operations of electronic tickets and data from the transit dispatch control system, makes possible to determine the route and passengers correspondence and, to carry out an objective assessment of the demand for public transport and the technical and operational indicators of the transit system.

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

Submitted 17.11.20, revised 26.02.21

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: Fadeev A.I., Alhousseini S. Transit ridership survey by analysis validation of electronic pass tickets. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):52-71. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>

© Fadeev A.I., Alhousseini S., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Данные о пассажирских потоках (спросе общественного транспорта, пассажирских корреспонденциях) применяются при решении большинства задач транспортного планирования¹ [1]. Транспортный спрос определяется с использованием четырехстадийной процедуры расчета или путем натурного обследования^{2,3} [2, 3, 4, 5]. Современная четырехстадийная процедура транспортного моделирования состоит из

- определения количества поездок (trip generation);
- расчета матрицы корреспонденций (trip distribution);
- разделения корреспонденций по видам передвижений (mode split, mode-share);
- распределения корреспонденций по сети (traffic assignment, route assignment, route choice).

Спрос общественного транспорта рассчитывается на третьем этапе данной процедуры, на котором осуществляется прогнозирование вероятности выбора способа передвижения различными доступными видами транспорта.

Натурные обследования пассажирских потоков применяются с целью изучения параметров транспортного спроса: распределения пассажирских корреспонденций по направлениям, колебаний во времени, оценки расчетных методов транспортного спроса [2], калибровки расчетных моделей.

Один из основных недостатков существующих методов определения транспортного спроса – большие затраты времени, ресурсов и высокая трудоемкость [6, 7, 8, 9]. Отчасти данная проблема решается за счет оборудования транспортных средств системами автоматизированного учета пассажиров. Однако такое оборудование требует дополнительных затрат и устанавливается далеко не во всех случаях.

В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения транспортного спроса, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в

пространствах жизнедеятельности человека: мобильными телефонами, транспортными средствами и т.д. (Urban computing, Big data, Internet of things, IoT) [10, 11]. Рассматриваемый подход применяется для решения основных проблем, с которыми сталкиваются города: загрязнение воздуха, потребление энергии, транспортный трафик и т. д.

В рамках данного подхода (Urban computing, Big data) определенный интерес представляет интеллектуальный анализ операций валидации **смарт-карт** (smart card). Данная задача рассмотрена в [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Исследования проводились в странах, где используются смарт-карты для сбора оплаты за проезд. Считается [24], что информация систем оплаты проезда посредством смарт-карт позволяет определить матрицу пассажирских корреспонденций без применения дорогостоящих процедур анкетирования пассажиров.

Системы сбора платы за проезд по смарт-картам хранят местоположение пункта посадки пассажира. В большинстве систем места выхода пассажира не фиксируются и, соответственно, не записываются в базу данных. Пункт завершения поездки можно определить на основании пункта начала следующей поездки, если пассажир все поездки оплачивает смарт-картой.

В разработанных методиках удельный вес идентифицированных поездок составляет 66% [14], 62% [25], 80% [16]. Для компенсации нераспознанных поездок в работе [16] предлагается использовать поправочный коэффициент, рассчитываемый как отношение общего числа поездок к количеству идентифицированных корреспонденций.

В настоящей статье рассмотрен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (electronic travel tickets): **смарт-карты** (smart card), транспортной **карты**, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (electronic gadget), реквизиты которых при выполнении валидации

¹ Martin W. A., McGuskin N. A. Travel Estimation Techniques for Urban Planning. National Cooperative Research Program Report 365. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC. 1998.

² кимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М.Р. Якимов. – Москва: Логос. 2013.

³ Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. – Москва: Логос. 2013.

фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

Таким образом требуется определить множество выполненных маршрутных (P) и сетевых (H) пассажирских корреспонденций. Сетевые корреспонденции (поездки с пересадками) рассчитываются из маршрутных: сетевая корреспонденция пассажира состоит из одной или нескольких последовательных маршрутных корреспонденций. При этом, в отличие от существующих методов, необходимо обеспечить:

- обработку операций валидации электронного билета как в начале, так и в конце поездки;
- расчет параметров пассажирских потоков и матрицы корреспонденций с учетом нераспознанных операций валидации;
- анализ цепочки корреспонденций за длительный период;
- оценку репрезентативности полученных пассажирских корреспонденций генеральной совокупности поездок;
- эффективные критерии совместимости операций, посредством которых рассчитываются пункты отправления и назначения пассажира.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении транзакции валидации электронного билета в информационной системе фиксируются следующие данные: идентификатор (Id) проездного билета, время совершения операции, Id транспортного средства. Необходимо привязать валидацию к остановочному пункту маршрута. Для этого используются пакеты навигационных данных системы диспетчерского управления движением, содержащие Id транспортного средства, номер маршрута, время формирования пакета, координаты транспортного средства (широта и долгота). Посредством этих данных рассчитывается фактическая траектория движения транспортных средств по маршрутной сети, которая представляется реляционным отношением

$$W(A, I, T^a, T^d) , \quad (1)$$

где A – Id транспортного средства;

I – Id остановочного пункта;

T^a, T^d – время прибытия на остановочный пункт и время отправления соответственно.

Как упоминалось выше, операция валидации проездного билета может быть осуществлена как в начале, так и в конце поездки, т.е. остановочный пункт валидации билета – это пункт отправления или назначения поездки пассажира. Считаем, что пассажир осуществляет валидацию электронного билета в течение движения до следующей остановки, если оплата осуществляется в начале поездки или на перегоне перед выходом из транспорта (оплата в конце поездки). На рисунке 1 приведена иллюстрация принципа определения остановочного пункта валидации при оплате проезда в начале поездки. К i -му остановочному пункту относятся все валидации, выполненные после прибытия в данный пункт до прибытия в следующий $i+1$ -й остановочный пункт, т.е. к i -й остановке относятся j -я и $j+1$ -я валидации электронного билета. $j+2$ -я, $j+3$ -я и $j+4$ -я операции относятся к $i+1$ -му остановочному пункту. Так, при валидации билета в начале поездки пунктом отправления пассажира считается остановка, предыдущая к транзакции, если валидация в конце поездки – первая остановка после оплаты проезда является пунктом назначения пассажира.

Таким образом формируется реляционное отношение множества транзакций валидации электронных билетов

$$R(D, S, M, K, A, I, T^a, T^d) , \quad (2)$$

где D – Id транзакции (уникальный номер транзакции валидации);

S – Id проездного билета;

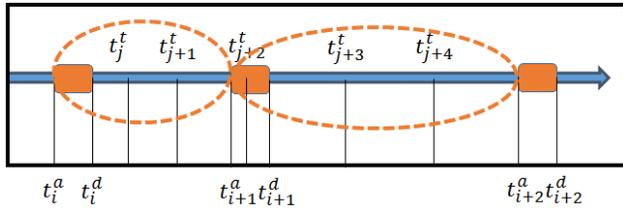
M, K – номер маршрута и направление движения соответственно;

A – Id транспортного средства;

I – Id остановочного пункта;

T^a – время прибытия на остановочный пункт;

T^d – время отправления из остановочного пункта.



t_j^t – время валидации;
 t_i^a – время прибытия на остановку;
 t_i^d – время отправления с остановки;
 t_j^t – the time taken to validate;
 t_i^a – time of the vehicle arrival;
 t_i^d – departure time from the bus stop

Рисунок 1 – Схема определения остановочного пункта валидации электронного билета

Figure 1 – Diagram of determining a stopping point for an electronic ticket validation

Транзакция валидации – это кортеж отношения, который обозначается как $r(d, s, m, k, a, i, t^a, t^d)$.

Множество маршрутных корреспонденций – это

$$P(D, I^b, T^b, I^e, T^e, L), \quad (3)$$

где D – Id транзакции валидации;
 I^b, I^e – Id начального и конечного пунктов корреспонденции соответственно;
 T^b, T^e – время начала и окончания корреспонденции;
 L – длина поездки.

Сетевая корреспонденция состоит из одной или нескольких взаимосвязанных маршрутных корреспонденций, т.е.

$$h_j = \{p_x, p_{x+1} \dots\}. \quad (4)$$

Рассмотрим алгоритм определения маршрутных корреспонденций пассажира, который основан на анализе упорядоченного по времени множества валидаций электронного проездного билета (операций оплаты за проезд одного пассажира), выбранного за определенный период времени. Алгоритм последовательно повторяется для каждого электронного проездного билета.

Как упоминалось выше, в транзакции валидации электронного билета зафиксирован один из пунктов поездки. При оплате проезда в начале поездки – это начальный пункт, в конце поездки – конечный. Противоположный пункт поездки (конечный или начальный) определяется на основании анализа смежной транзакции. При оплате проезда в начале поездки смежной является следующая транзакция, в

конце поездки – предыдущая транзакция.

Текущая и смежная транзакции должны отвечать условиям связанности, т.е. валидации электронного билета в обеих транзакциях должны быть выполнены в начале или конце поездки. В противном случае определить маршрутную корреспонденцию пассажира (начальный или конечный пункт поездки) невозможно, анализируемая текущая транзакция валидации билета остается нераспознанной.

Схемы связанных транзакций даны на рисунке 2, а и 2, б. Транзакции на рисунке 2, в не отвечают данному условию, т.к. остановочные пункты валидации расположены зеркально: в конце j -й поездки и начале $j+1$ -й поездки.

Таким образом, корреспонденция может быть определена при выполнении одного (а или б) из следующих условий:

а) операция валидации выполнена в начале поездки, расстояние между пунктами валидации текущей и следующей транзакций больше пешеходной доступности и в подмножестве остановочных пунктов маршрута текущей транзакции, расположенных за пунктом валидации, имеется остановочный пункт, находящийся в пешеходной доступности от пункта валидации следующей поездки (см. рисунок 2, а);

б) операция валидации выполнена в конце поездки, расстояние между пунктами валидации текущей и предыдущей транзакций больше пешеходной доступности и в подмножестве остановочных пунктов, расположенных в маршруте текущей транзакции перед пунктом валидации, имеется остановочный пункт в пределах пешеходной доступности от пункта валидации предыдущей транзакции (см. рисунок 2, б).

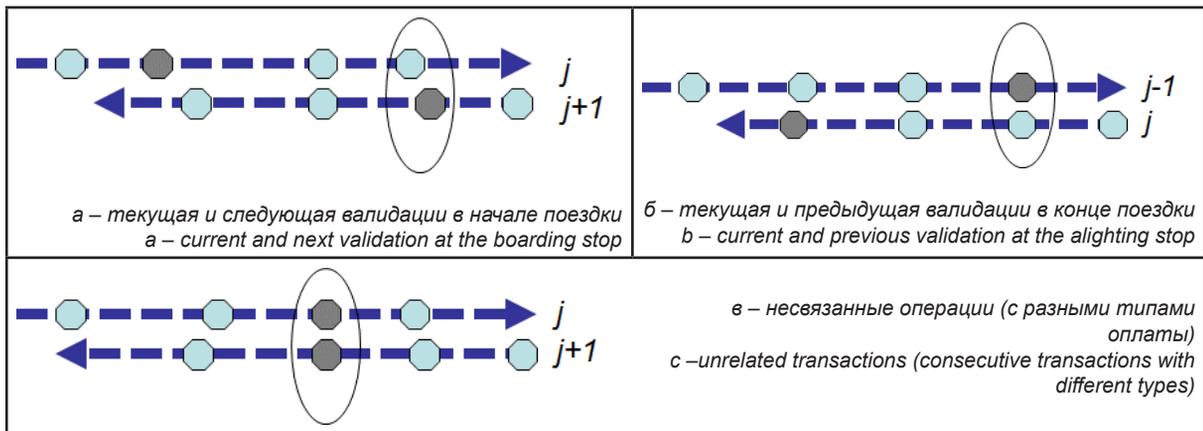


Рисунок 2– Возможные варианты следования транзакций валидации электронного билета, где – остановочный пункт валидации

Figure 2 – Possible consecutive transaction of validation electronic travel tickets, where: – validation stopping point

Таким образом можно записать условия связанных транзакций:

а) при оплате в начале поездки

$$l(i_j, i_{j+1}) > L_p; \min l(i_j^+, i_{j+1}) < L_p; \quad (5)$$

б) при оплате в конце поездки

$$l(i_j, i_{j-1}) > L_p; \min l(i_j^-, i_{j-1}) < L_p, \quad (6)$$

где L_p – расстояние пешеходной доступности остановочных пунктов;

i_j, i_{j+1}, i_{j-1} – пункт валидации текущей, следующей или предыдущей транзакции соответственно;

i_j^+ – остановочный пункт маршрута, следующий за пунктом валидации текущей транзакции;

i_j^- – остановочный пункт маршрута, расположенный перед пунктом валидации текущей транзакции.

Между остановочными пунктами рассчитывается евклидово расстояние по географическим координатам.

На основании вышеизложенного сформулирован алгоритм *определения маршрутных корреспонденций*.

Имеется упорядоченное по времени множество транзакций валидации электронного проездного билета за определенный период времени $R' \subset R$.

1. Выбирается текущая j -я транзакция $r_j(d_j, s_j, m_j, k_j, a_j, i_j, t_j^a, t_j^d)$. В начале расчета текущей является первая транзакция валидации проездного билета. В дальнейшем те-

кущая – это следующая транзакция за ранее обработанной.

Если все транзакции обработаны, расчет операций билета закончен. Осуществляется переход к формированию массива данных и обработке валидаций следующего билета. Расчет завершается после обработки всех электронных билетов.

Если текущая транзакция выбрана, переход к п. 2.

2. Текущая транзакция проездного билета в начале поездки. Из упорядоченного по времени множества транзакций электронного билета выбирается следующая $j+1$ -я транзакция. При ее отсутствии переход к п. 3.

Проверяются условия (5). Если не выполняются – переход к п. 3.

Иначе остановочный пункт текущей транзакции $r_j(i, t^d)$ является началом j -й корреспонденции $p_j(i^b, t^b)$, остановочный пункт i_j^+ является пунктом окончания j -й корреспонденции. Время окончания j -й корреспонденции t_j^e определяется из траекторий движения транспортных средств по маршрутной сети, полученных по результатам обработки данных спутниковой навигации (1). Для этого во множестве пунктов множества W определяется элемент (кортеж) $w_x(a, m, k, i, t^a, t^d)$, соответствующий пункту i_j^+ окончания j -й корреспонденции.

Длина корреспонденции l_j рассчитывается как сумма длин перегонов между пунктами начала i_j^b и окончания корреспонденции i_j^e маршрута m_j и направления k_j .

Переход к п. 1.

3. Текущая транзакция проездного билета в конце поездки. Из упорядоченного по времени множества транзакций электронного билета выбирается предыдущая к текущей, т.е. $j-1$ -я транзакция. При ее отсутствии поездка пассажира по j -й транзакции остается неопределенной, переход к п. 1.

Проверяются условия (6). Если не выполняется – поездка по j -й транзакции остается неопределенной, переход к п. 1.

Иначе остановочный пункт текущей транзакции $r_j(i, t^a)$ является завершением j -й корреспонденции $p_j(i^e, t^e)$, пункт i_j^- является пунктом начала j -й корреспонденции. Время начала j -й корреспонденции t_j^b определяется из траекторий движения транспортных средств по маршрутной сети (1).

Длина поездки L_j рассчитывается как сумма длин перегонов между пунктами начала i_j^b и окончания поездки i_j^e , маршрута поездки m_j и направления k_j .

Переход к п. 1.

Схема алгоритма дана на рисунке 3.

Расчет сетевых корреспонденций осуществляется на основании полученного множества маршрутных межостановочных корреспонденций, которые для каждого электронного билета упорядочиваются по времени $\{p_1, p_2, \dots, p_j, p_{j+1}, \dots\}$. Проверяя возможность объединения последовательных корреспонденций по условиям пересадочности (рисунок 4), получаем множество сетевых корреспонденций H , каждый элемент которого представляет собой одну или несколько связанных маршрутных корреспонденций. Две маршрутные корреспонденции объединяются в сетевую при выполнении следующих условий пересадочности:

а) пункт завершения текущей маршрутной корреспонденции (i_j^e) находится в пределах пешеходной доступности (L_p) от пункта начала следующей корреспонденции (i_{j+1}^b):

$$l(i_j^e, i_{j+1}^b) < L_p; \quad (7)$$

б) интервал времени между завершением текущей корреспонденции (t_j^e) и началом следующей (t_{j+1}^b) не превышает время пересадки (T_p):

$$(t_{j+1}^b - t_j^e) < T_p. \quad (8)$$

Время пересадки устанавливается исходя из необходимых в некоторых случаях затрат времени на пешеходное перемещение между остановочными пунктами и времени ожидания следующего маршрута, которое зависит от интервала движения.

В некоторых случаях критерии пересадочности (7) и (8) неприменимы [27], т.к. в последовательных поездках в пунктах пересадки пассажир за короткое время, не превышающее период пересадки, выполняет действия, являющиеся целью поездки, например расклейка объявлений. Такие поездки не могут быть отнесены к одной сетевой корреспонденции: во многих случаях пункты начала и завершения такой корреспонденции оказываются в пешеходной доступности, сетевая корреспонденция как бы исчезает. Рассматриваемые поездки будем называть корреспонденциями коммивояжера. Цепочку маршрутных поездок коммивояжера не следует считать одной корреспонденцией, т.к. в этом случае поездки выпадают из транспортного спроса.

В работе [27] предлагаются следующие критерии для выявления поездок коммивояжера:

- две последовательные корреспонденции совершаются по одному и тому же маршруту;
- длина составной поездки более чем в два раза превышает евклидово расстояние между начальным и конечным пунктом.

Проведенный анализ поездок коммивояжера показал, что данные критерии неэффективны. Во многих случаях составная корреспонденция пассажира не может быть отнесена к поездке коммивояжера, даже если ее длина существенно (более двух раз) превышает евклидово расстояние между начальным и конечным пунктом. Следует также учесть случаи последовательных поездок по разным маршрутам на одном и том же участке сети, которые формально не соответствуют приведенному выше критерию, но имеют признаки корреспонденции коммивояжера.

В настоящей работе предложены следующие критерии для выявления поездок коммивояжера. Сетевая пассажирская корреспонденция относится к поездкам коммивояжера и подлежит разделению при выполнении хотя бы одного из следующих условий:

- начальный и конечный пункты сетевой корреспонденции расположены в пределах пешеходной доступности;
- длина сетевой поездки больше, чем в 2 раза превышает кратчайшее расстояние по маршрутной сети между начальным и конечным пунктом (данное значение коэффициента установлено на основании анализа поездок с пересадками по маршрутной сети г. Красноярск);
- маршрутные корреспонденции выполнены по одному и тому же участку сети в разных направлениях.

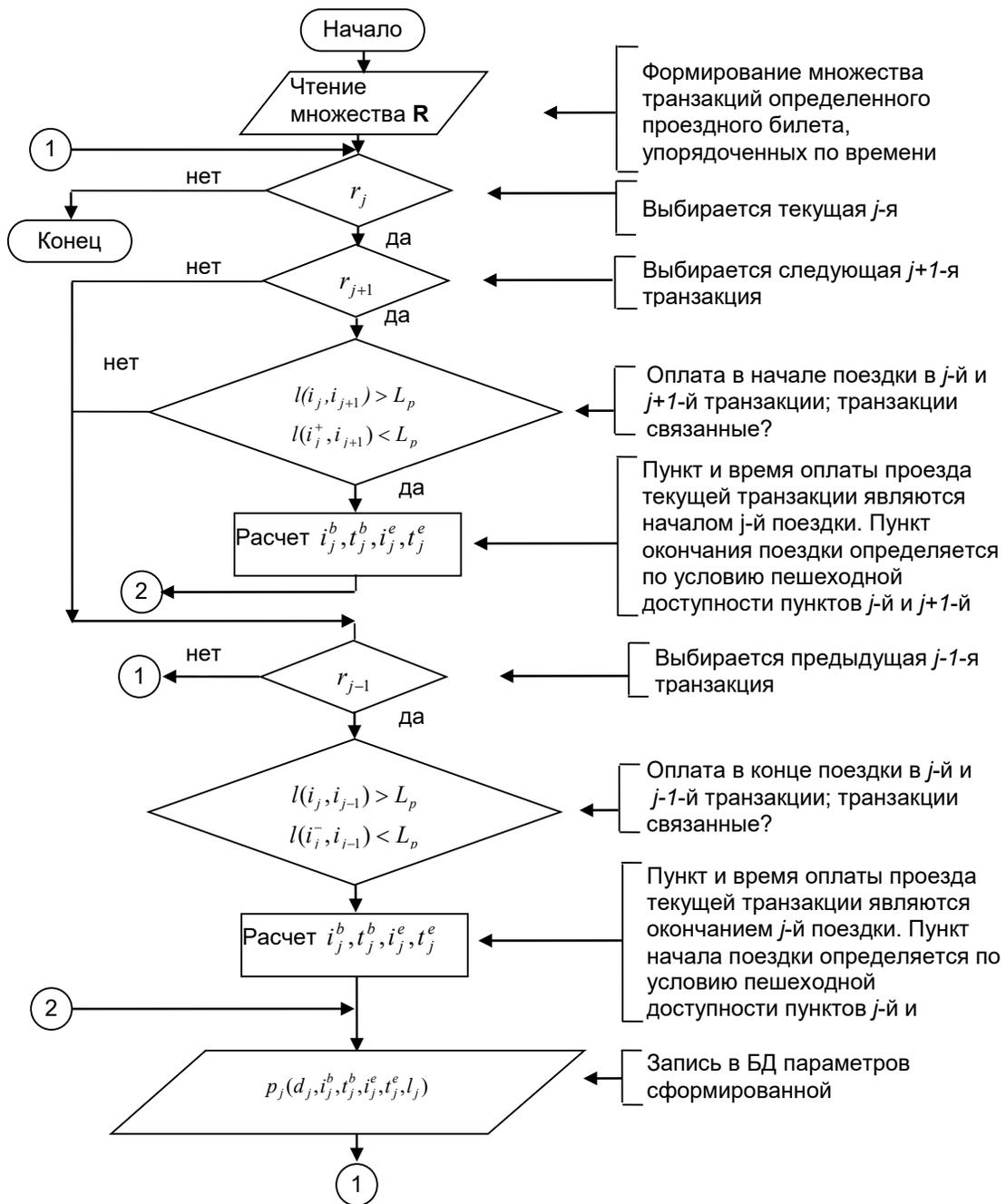


Рисунок 3 – Схема алгоритма определения маршрутных пассажирских корреспонденций

Figure 3 – Diagram of the algorithm for formatting the passenger trip-legs



Рисунок 4 – Схема формирования сетевой корреспонденции из маршрутных

Figure 4 – The scheme of forming network correspondence from routing

Транспортный спрос представляется в виде матриц межостановочных маршрутных или сетевых пассажирских корреспонденций⁴, которые формируются как некая усредненная модель потребности населения в передвижениях по транспортной сети

$$Q = \|T_{ij}\|; i, j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

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

Рассмотрим порядок определения матрицы *маршрутных корреспонденций* по результатам обработки транзакций валидации электронных билетов. Расчет количества поездок между пунктами ij осуществляется

$$T_{ij} = \sum_m (p_{mij} \varphi_{mi} + p'_{mij} \varphi_{mj}) / \alpha_m^r, \quad (10)$$

где T_{ij} – расчетное количество поездок между пунктами i, j ;

p_{mij}, p'_{mij} – количество распознанных поездок между пунктами i, j по m -му маршруту, для которых пункт валидации является началом или завершением корреспонденции соответственно;

$\varphi_{mi}, \varphi_{mj}$ – коэффициент балансировки операций валидации на i -м или j -м остановочном пункте m -го маршрута ($\varphi_{mi} \geq 1; \varphi_{mj} \geq 1$);

α_m^r – коэффициент валидации электронных билетов m -го маршрута ($\alpha_m^r \leq 1$).

$$\alpha_m^r = R_m / Q_m, \quad (11)$$

где R_m, Q_m – количество пассажиров, перевезенных по электронным билетам и общее количество пассажиров m -го маршрута соответственно.

Коэффициент балансировки рассчитывается

$$\varphi_{ms} = \frac{z_{ms}^0 + z_{ms} + z'_{ms}}{z_{ms} + z'_{ms}}, \quad (12)$$

где $z_{ms}^0, z_{ms}, z'_{ms}$ – количество нераспознанных корреспонденций с операцией валидации на s -м остановочном пункте, количество интерпретированных транзакций с s -м пунктом операции валидации в начале или конце поездки соответственно.

Посредством коэффициентов балансировки компенсируются нераспознанные валидации, которые возникают, например, если пассажир одну или несколько поездок совершает посредством транспорта, в котором не применяются электронные проездные билеты (такси, личный автомобиль и др.). В результате разрывается цепочка поездок по электронным билетам.

Использование транзакций валидации электронных билетов позволяет получить параметры пассажирских потоков за любой период времени. Можно, например, сформировать средневзвешенную матрицу корреспонденций за рабочий день месяца. Для этого из множества поездок P , полученного в результате обработки валидаций электронных билетов, формируется выборка (подмножество) корреспонденций $P^* \subset P$, осуществленных в рабочие дни рассматриваемого месяца. Средневзвешенная матрица маршрутных пассажирских корреспонденций рассчитывается

$$T_{ij} = \sum_m \frac{(\# P_{mij} \varphi_{mi} + \# P'_{mij} \varphi_{mj})}{\alpha_m^r d_m}, \quad (13)$$

где d_m – количество дней обслуживания m -го маршрута;

$\# P_{mij}$ – мощность множества пассажирских корреспонденций $P_{mij} \subset P^*$ k -го маршрута между пунктами ij , в котором i – пункт валидации проездного билета;

$\# P'_{mij}$ – мощность множества пассажирских корреспонденций $P'_{mij} \subset P^*$ m -го маршрута между пунктами ij , в котором j – пункт валидации проездного билета.

Рассмотрим порядок расчета матрицы *сетевых пассажирских корреспонденций*. Имеется множество маршрутных корреспонденций P , множество сетевых корреспонденций H . Для каждой маршрутной корреспонденции определен коэффициент корректировки, посредством которого учитывается удельный вес валидации электронных билетов и количество нераспознанных корреспонденций. Коэффициент корректировки x корреспонденции между пунктами i и j по маршруту m рассчитывается как

$$k_x = \begin{cases} \varphi_{mi} / \alpha_m^r, & \text{если } i \text{ пункт валидации;} \\ \varphi_{mj} / \alpha_m^r, & \text{если } j \text{ пункт валидации.} \end{cases} \quad (14)$$

⁴ The Online TDM Encyclopedia. <https://www.vtpi.org/tdm/index.php>

Требуется определить коэффициент корректировки сетевых корреспонденций, полученных в результате обработки операций валидации электронных проездных билетов. Данный коэффициент рассчитывается

$$k_j = (k_x + k_{x+1} + \dots) / \#\{p_x, p_{x+1} \dots\}, \quad (15)$$

где k_x – коэффициент корректировки x маршрутной корреспонденции, которая входит в j -ю сетевую пассажирскую корреспонденцию;

$\#\{p_x, p_{x+1} \dots\}$ – количество маршрутных корреспонденций, из которых состоит сетевая пассажирская корреспонденция (мощность множества $\{p_x, p_{x+1} \dots\}$).

Таким образом, матрица сетевых корреспонденций определяется

$$T'_{zs} = \sum_{j \in Q} k_j, \quad (16)$$

если zs – пункты начала и завершения j -й сетевой корреспонденции;

Q – множество интерпретированных сетевых корреспонденций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм расчета пассажирских корреспонденций реализован в компьютерной программе. Формирование пассажирских корреспонденций из транзакций валидации электронных билетов предполагает обработку существенного объема данных: десятков миллионов

строк таблицы операций валидаций и сотни миллионов строк таблицы навигационных данных. Для такого массива информации целесообразно использовать инструмент реляционной алгебры посредством современных СУБД, например MS SQL Server, применение которого обеспечивает эффективную реализацию предложенного алгоритма.

Апробация эффективности разработанной методики осуществлена по данным за октябрь 2016 г. и апрель 2019 г., предоставленным Муниципальным казенным учреждением (МКУ) «Красноярскгортранс», осуществляющим диспетчерское управление пассажирским транспортом г. Красноярска. Для обработки МКУ «Красноярскгортранс» предоставлены в СУБД MS SQL Server следующие реляционные отношения (таблицы базы данных):

- операций валидации электронных проездных билетов;
- навигационных данных позиционирования транспортных средств;
- модель маршрутной сети.

Информация о количестве валидаций электронных проездных билетов, использованных в исследованиях, дана в таблице 1. На пассажирском транспорте г. Красноярска по электронным проездным билетам производится порядка 6 млн поездок в месяц, что составляет от 30% до 40% пассажиров. Основной объем перевозок (93–94%) осуществляется автобусом, удельный вес электрического транспорта (трамвай, троллейбус) составляет порядка 7%.

Таблица 1
Распределение валидаций электронных проездных билетов по дням недели

Table 1
Distribution of e-ticket validations by week days

| День недели | Октябрь 2016 г. | | | | Апрель 2019 г. | | | |
|-------------|-----------------|------|---------|------------|----------------|------|---------|------------|
| | Кол-во | Дней | За день | Уд. вес, % | Кол-во | Дней | За день | Уд. вес, % |
| 1 | 1131597 | 5 | 226319 | 15,8 | 1172388 | 5 | 234478 | 15,7 |
| 2 | 935860 | 4 | 233965 | 16,4 | 1247521 | 5 | 249504 | 16,7 |
| 3 | 939653 | 4 | 234913 | 16,4 | 991477 | 4 | 247869 | 16,6 |
| 4 | 932214 | 4 | 233054 | 16,3 | 983885 | 4 | 245971 | 16,4 |
| 5 | 933877 | 4 | 233469 | 16,3 | 963565 | 4 | 240891 | 16,1 |
| 6 | 759452 | 5 | 151890 | 10,6 | 619856 | 4 | 154964 | 10,4 |
| 7 | 574414 | 5 | 114883 | 8,0 | 486788 | 4 | 121697 | 8,1 |
| ИТОГО | | | 1428494 | 100,0 | | | 1495375 | 100,0 |

На рисунке 5 дано распределение количества перевезенных пассажиров по часам буднего дня, определенное из валидаций электронных билетов (2016, 2019 гг.) и обследований пассажирских потоков (2006, 2011 гг.) общественного транспорта г. Красноярск. Из рисунка видно, что поездки пассажиров по электронным билетам повторяют динамику пассажирских потоков по часам суток, полученную из сплошных обследований 2006, 2012 гг. Некоторые имеющиеся расхождения объясняются изменениями в структуре транспортного спроса, произошедшие с 2006 г. и 2012 г. Динамика количества валидаций электронных билетов по данным мая 2019 г. аналогична апрелю 2016 г.

Как упоминалось выше, расчет пассажирских корреспонденций состоит из следующих этапов:

- определение фактической траектории движения транспортных средств по маршрутной сети;
- расчет маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций.

Обработка данных за месяц на персональном компьютере составляет порядка 250 ч процесса определения фактической траектории и 200 ч – формирования маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций. Фрагмент списка упорядоченных по времени маршрутных корреспонденций электронного билета приведен на рисунке 6.

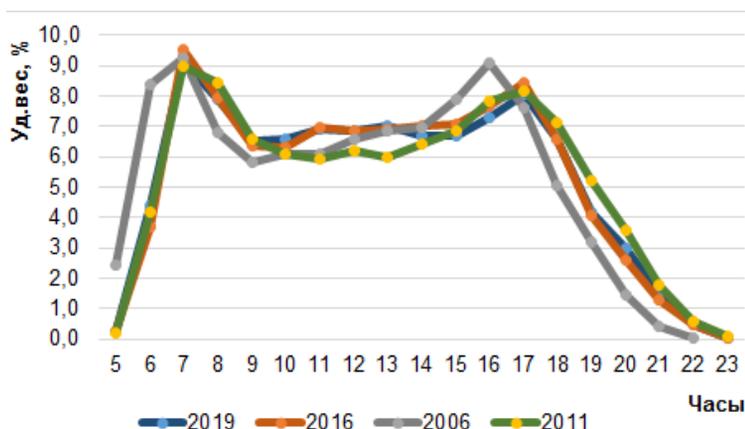


Рисунок 5 – Распределение количества перевезенных пассажиров в будний день: валидации электронных билетов 2016, 2019 гг.; обследований пассажирских потоков 2006, 2011 гг. (г. Красноярск)

Figure 5 – Ridership distribution on a weekday: by validation of electronic tickets in 2016, 2019; by surveys of passenger flows in 2006, 2011 (Krasnoyarsk city)

| Корреспонденции | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|-----|-------------|-----------------|----------------|-----------|--------------|----------------------|----------------|-----------|-----------|----|
| Id | NbRt | Dir | Id нач. ост | Наименование | Время | Id транз. | Id кон. ост. | Наименование | Время | Id транз. | Длина, км | Lp |
| 13119561 | 26 | В | 604 | БСМП | 08:03 31.03.19 | 13119561 | 985 | Железнодорожная бол | 08:32 31.03.19 | 13119612 | 8,708601 | |
| 13119612 | 26 | В | 985 | Железнодорожная | 14:26 31.03.19 | 13119612 | | | | | | |
| 13119613 | 26 | В | 602 | ул. Крупской | 07:37 01.04.19 | 13119613 | 980 | ул. Ломоносова | 08:05 01.04.19 | 13119569 | 6,711759 | |
| 13119569 | 14 | А | 979 | ул. Ломоносова | 16:21 01.04.19 | 13119569 | 1001 | ул. Корнеева | 16:31 01.04.19 | 13119609 | 3,670141 | |
| 13119609 | 49 | А | 1001 | ул. Корнеева | 17:05 01.04.19 | 13119609 | 637 | БСМП (ул. Курчатова) | 17:13 01.04.19 | 13119570 | 2,787544 | |
| 13119570 | 26 | В | 604 | БСМП | 07:22 02.04.19 | 13119570 | 985 | Железнодорожная бол | 07:50 02.04.19 | 13119610 | 8,708601 | |
| 13119610 | 26 | А | 985 | Железнодорожная | 12:57 02.04.19 | 13119610 | 603 | БСМП | 13:30 02.04.19 | 13119583 | 9,074359 | |
| 13119583 | 26 | В | 604 | БСМП | 07:57 03.04.19 | 13119583 | 985 | Железнодорожная бол | 08:29 03.04.19 | 13119560 | 8,708601 | |
| 13119560 | 26 | А | 985 | Железнодорожная | 12:53 03.04.19 | 13119560 | 603 | БСМП | 13:22 03.04.19 | 13119571 | 9,074359 | |
| 13119571 | 26 | В | 604 | БСМП | 15:28 03.04.19 | 13119571 | 980 | ул. Ломоносова | 15:56 03.04.19 | 13119608 | 7,332676 | |
| 13119608 | 26 | А | 979 | ул. Ломоносова | 17:18 03.04.19 | 13119608 | 603 | БСМП | 17:51 03.04.19 | 13119559 | 7,812416 | |
| 13119559 | 26 | В | 604 | БСМП | 07:39 04.04.19 | 13119559 | 985 | Железнодорожная бол | 08:10 04.04.19 | 13119584 | 8,708601 | |

Рисунок 6 – Список сформированных маршрутных корреспонденций (фрагмент)

Figure 6 – List of generated routing correspondence (fragment)

Из рисунка видно, что некоторые транзакции остаются неопределенными: для них не указывается пункт назначения пассажира.

Разработанный алгоритм позволяет интерпретировать порядка 65% операций. К концу расчетного периода имеется тенденция снижения удельного веса распознанных валидаций, что объясняется отсутствием в базе данных операций последующих поездок, которые были осуществлены в следующий период. Снижение удельного веса интерпретированных поездок проявляется за пять дней до конца периода: некоторые пассажиры выполняют поездки с перерывом в несколько дней.

Для получения корректных пассажирских корреспонденций следует использовать результаты, находящиеся в периоде один-два дня после начальной даты и не менее пяти дней до конечной даты обрабатываемых исходных данных. В настоящей статье при анализе пассажирских потоков используется период со 2 по 25 число месяца (МКУ «Красноярскгортранс» предоставлены данные за календарный месяц).

Репрезентативность результатов. Из валидаций электронных проездных билетов получаем множество маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций, которые являются выборкой из генеральной совокупности поездок пассажиров. Необходимо определить соответствие выборочной совокупности поездок, полученных по данным системы учета операций валидации электронных билетов, генеральному множеству пассажирских корреспонденций. Необходимо доказать, что основные параметры выборочной совокупности (из валидаций электронных билетов) соответствуют генеральной совокупности с достаточной точностью.

Подвижность населения обуславливается социальным составом населения и целевым характером передвижений. Существует вероятность того, что структура пассажиров, оплачивающих поездки электронными билетами, отличается от пассажиров генеральной совокупности. Например, можно ожидать, что электронными билетами в меньшей степени пользуется приезжее население.

Оценка репрезентативности выборки поездок по электронным билетам осуществляется путем сравнения ее с результатами выборочного автоматизированного учета пассажиров, произведенного в периоды, за которые осуществлена обработка валидаций проездных билетов. Данные автоматизированного учета получены от МКУ «Красноярскгортранс». Вы-

борочное обследование пассажиропотоков осуществлено с использованием специального оборудования, смонтированного в транспортных средствах.

Объем выборочного автоматизированного учета составил более 281 тыс. пассажиров за апрель 2019 г. и 336 тыс. пассажиров за октябрь 2016 г. Было обследовано 6938 рейсов в апреле 2019 г. и 6094 рейса в октябре 2016 г. Всего обследовано 11 маршрутов из 68 постоянных маршрутов общественного транспорта г. Красноярска, т.е. 16% постоянных маршрутов.

Таким образом, имеется две выборки маршрутных пассажирских корреспонденций: из валидаций электронных билетов (выборка 1) и полученная путем обследования (выборка 2). Сравним распределение по длине маршрута количество входящих и выходящих пассажиров данных выборок.

Маршрут разделен на k непересекающихся интервалов. Для каждого интервала рассчитывается количество вошедших и вышедших пассажиров выборки 1 и 2. Таким образом формируются две независимые несвязанные выборки. Для их сравнения воспользуемся критерием Стьюдента (t -критерием), который позволяет найти вероятность того, что оба средних значения в выборках относятся к одной и той же совокупности.

На рисунке 7 в качестве примера даны гистограммы распределения числа вошедших пассажиров одного из маршрутов. Гистограмма позволяет выдвинуть гипотезу о том, что две рассматриваемые выборки относятся к одной и той же совокупности.

Статистика критерия для случая несвязанных, независимых выборок равна

$$t_e = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sigma_{x-y}}, \quad (17)$$

где \bar{x} , \bar{y} – средние арифметические в экспериментальной и контрольной группах;

σ_{x-y} – стандартная ошибка разности средних арифметических, которая рассчитывается по формуле [25]:

$$\sigma_{x-y} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 + \sum (y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 1} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}. \quad (18)$$

Далее необходимо сравнить t_e с теоретическим значением t -распределения Стьюдента t_k при числе степеней свободы $n_1 + n_2 - 2$. Гипотеза о равенстве выборок принимается, если $t_e < t_k$.

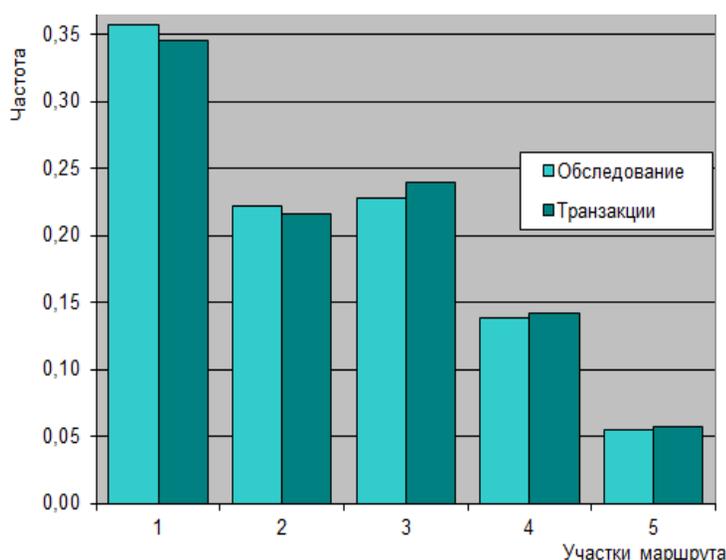


Рисунок 7 – Гистограмма распределения числа вошедших пассажиров по длине маршрута №61 (обратное направление)
Figure 7 – Distribution of passengers alighting along the length of route No. 61 (reverse direction)

Результаты расчета t -критерия сравниваемых выборок приведены в таблице 2. При степени свободы, равной 8, теоретические значения критерия Стьюдента составляют 1,860 ($P \leq 0,05$); 2,896 ($P \leq 0,01$); 4,501 ($P \leq 0,001$). Наибольшее значение статистики (см. табли-

цу 2) составляет 2,923 для прямого направления 49-го маршрута по вышедшим пассажирам (октябрь 2016 г.) и 2,038 для обратного направления 31-го маршрута по вышедшим пассажирам. Большинство результатов расчета не превышает критическое значение 1,860.

Таблица 2
Результаты расчета статистики критерия Стьюдента сравниваемых выборок

Table 2
Results of calculating the values of Student's test for the compared samples

| Маршрут | Направление* | Вошло пассажиров | Вышло пассажиров | Маршрут | Направление* | Вошло пассажиров | Вышло пассажиров |
|-----------------|--------------|------------------|------------------|----------------|--------------|------------------|------------------|
| Октябрь 2016 г. | | | | Апрель 2019 г. | | | |
| Автобус | | | | Автобус | | | |
| 49 | A | 1,661 | 2,923 | 26 | A | 0,264 | 1,755 |
| 49 | B | 1,566 | 0,375 | 26 | B | 0,495 | 0,881 |
| 52 | A | 1,822 | 1,637 | 31 | A | 1,62 | 1,169 |
| 52 | B | 1,693 | 1,637 | 31 | B | 0,987 | 2,038 |
| 55 | A | 0,618 | 0,326 | 37 | A | 0,314 | 1,384 |
| 55 | B | 0,469 | 0,672 | 37 | B | 0,426 | 0,736 |
| 61 | A | 0,188 | 0,164 | 52 | A | 0,85 | 0,533 |
| 61 | B | 0,188 | 0,217 | 52 | B | 1,307 | 0,355 |
| Троллейбус | | | | Троллейбус | | | |
| 5т | A | 1,249 | 0,817 | 7т | A | 0,63 | 0,186 |
| 5т | B | 0,698 | 1,248 | 7т | B | 0,684 | 0,173 |
| 15т | A | 2,320 | 0,597 | | | | |
| 15т | B | 1,936 | 1,184 | | | | |

Примечание. * A – прямое направление; B – обратное направление

Таблица 3
Технико-эксплуатационные показатели маршрутов пассажирского транспорта г. Красноярска в среднем за будний день апреля 2019 г. (фрагмент)

Table 3
Technical and operational indicators of transit routes in Krasnoyarsk in average for a weekday in April 2019 (fragment)

| Маршрут | Q_k | P_k | l_q | Z_m | Q_p | q_n | l_m | γ_d | K_{sm} |
|---------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|----------|
| 10 | 5918 | 35252 | 6,0 | 121 | 49,1 | 90 | 22,8 | 0,14 | 3,8 |
| 11 | 5451 | 22602 | 4,1 | 177 | 30,8 | 90 | 10,3 | 0,14 | 2,5 |
| 12 | 8425 | 65963 | 7,8 | 140 | 60,4 | 90 | 28,9 | 0,18 | 3,7 |
| 13т | 5084 | 15084 | 3,0 | 113 | 45,1 | 90 | 8,5 | 0,18 | 2,9 |
| 14 | 1511 | 8100 | 5,4 | 32 | 47,7 | 45 | 16,3 | 0,35 | 3,0 |
| *** | | | | | | | | | |
| ИТОГО | 710049 | 4342741 | 6,1 | | | | | 0,27 | |

На основании изложенного можно сделать вывод, что выборки, полученные из операций валидации электронных билетов и по результатам натурного обследования пассажирских потоков, одинаковые в статистическом смысле. Транзакции операций валидаций репрезентативны генеральной совокупности пассажирских корреспонденций, т.е. они могут применяться для оценки характеристик генеральной совокупности в пределах допустимых погрешностей.

Расчет технико-эксплуатационных показателей транспортной системы. Рассмотрим полученные результаты обработки транзакций валидации электронных билетов в сравнении с ранее проведенными обследованиями пассажирских потоков.

Из операций с электронными билетами средняя дальность поездок пассажиров составляет 6,1 км и 6,7 км по результатам натурного обследования пассажирских потоков. Разница в 10% между средней дальностью поездки пассажира в 2006 и 2019 гг. объясняется изменением системы маршрутов и спроса общественного транспорта. Динамика дальности поездок пассажиров (рисунок 8), полученная при обработке операций валидации электронных билетов за апрель 2019 г., соответствует обследованию пассажирских потоков 2006 г., что свидетельствует о стабильном характере пассажирских потоков и близости результатов обработки валидаций электронных билетов

фактическим параметрам транспортного спроса.

В таблице 3 даны результаты расчета технико-эксплуатационных показателей маршрутов в среднем за будний день месяца (выборка за период с 02.04.2019 по 24.04.2019). Определены следующие показатели:

- объем перевозок по k -му маршруту

$$Q_k = \sum_i \sum_j (p_{kij} \varphi_{ki} + p'_{kij} \varphi_{kj}) / \alpha_k^r; \quad (19)$$

пассажирооборот k -го маршрута

$$P_k = \sum_i \sum_j (p_{kij} \varphi_{ki} + p'_{kij} \varphi_{kj}) l_{ij} / \alpha_k^r, \quad (20)$$

где l_{ij} – длина ij -й корреспонденции;
 $l_q = P/Q$ – средняя дальность поездки пассажира⁵;

Z_m – количество рейсов по маршруту (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

$Q_p = Q/Z_m$ – количество пассажиров за рейс;

q_n – вместимость подвижного состава, обслуживающего маршрут (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

l_m – средняя длина маршрута (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

$\gamma_d = P/(Z_m l_m q_n)$ – коэффициент динамического использования вместимости¹;

$K_{sm} = l_m / l_q [16]$ – коэффициент сменности пассажиров¹.

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

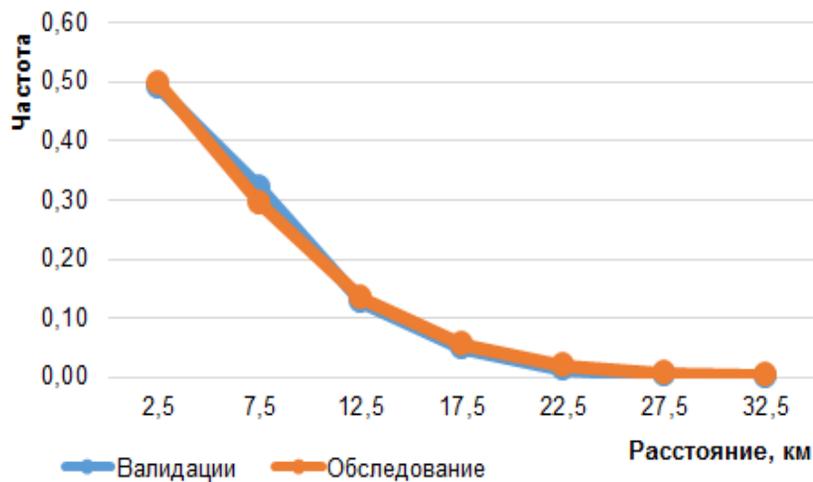


Рисунок 8 – Динамика среднего расстояния поездки пассажира

Figure 8 – Dynamics of the average distance traveled by a passenger

Коэффициент динамического использования вместимости за будний день составил 0,27. Полученные результаты соответствуют отчетным данным перевозчиков и ранее проведенным обследованиям пассажирских потоков.

Для целей планирования важным параметром является динамика пассажиропотока по участкам маршрутов. Рассчитаем мощность пассажирских потоков для каждого перегона. Количество пассажиров, перевезенных через перегон ρ маршрута k , определяется следующим образом:

$$Q_{k\rho} = \sum_{\rho_i < \rho} \sum_{\rho_j > \rho} (P_{kij} \varphi_{ki} + P'_{kij} \varphi_{kj}), \quad (21)$$

где ρ – номер остановочного пункта по порядку в k -м маршруте в прямом или обратном направлении;

ρ_i, ρ_j – номер начального, конечного остановочного пункта по порядку маршрутной пассажирской корреспонденции kij .

На рисунке 9 в качестве примера приведена эпюра пассажирских потоков по маршруту №10 за рабочий день.

Как упоминалось выше, при определении сетевых пассажирских корреспонденций требуется выделить поездки коммивояжера. Пример корреспонденции коммивояжера дан на рисунке 10. При значительной длине корреспонденции, состоящей из девяти поездок с пересадками, начальный и конечный пункты расположены в пределах пешеходной доступности. Таким образом, несмотря на удовлетворение фактических критериев пересадоч-

ности, рассматриваемую суммарную поездку пассажира нельзя считать сетевой корреспонденцией. Ее следует разделить на звенья и каждое звено рассматривать как отдельную корреспонденцию.

В таблице 4 приведена структура пассажирских корреспонденций общественного транспорта г. Красноярск за апрель 2019 г. В таблице показано распределение поездок коммивояжера, определенных в соответствии с предложенными критериями. По маршрутной сети г. Красноярск 91,5% поездок выполняется без пересадок (состоят из одного звена), 8% поездок выполнены с одной пересадкой, а остальные 0,5% поездок с двумя и более пересадками. При обработке валидаций проездных билетов наибольшее число звеньев в поездках пассажира равно 8 (7 пересадок), в апреле 2019 г. выявлено 2 таких корреспонденции.

По критерию пешеходной доступности выявлено около 14% корреспонденций с пересадками (состоящих из двух и более звеньев), которые относятся к поездкам коммивояжера. У данных корреспонденций начальный и конечный пункты расположены в пределах пешеходной доступности, в то время как общая длина корреспонденции составляет несколько километров (или десятков километров).

К корреспонденциям коммивояжера из общего числа поездок с пересадками отнесено более 40% по критерию перемещения по одному и тому же участку сети и более 30% по соотношению фактической длины корреспонденции и возможной по маршрутной сети.

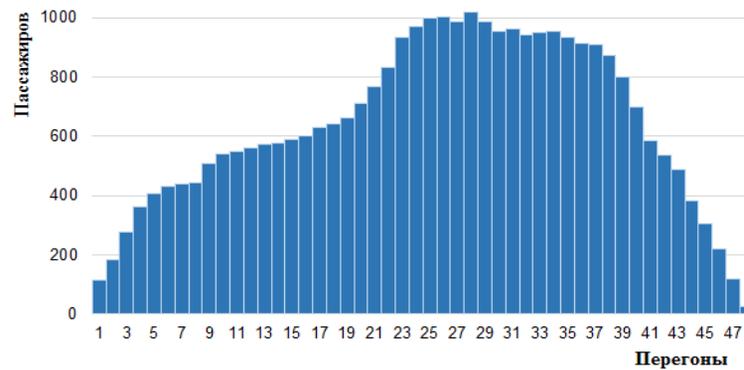


Рисунок 9 – Эпюра пассажирских потоков по маршруту №10 в среднем за рабочий день

Figure 9 – Diagram of passenger flows on route No. 10 on average per working day

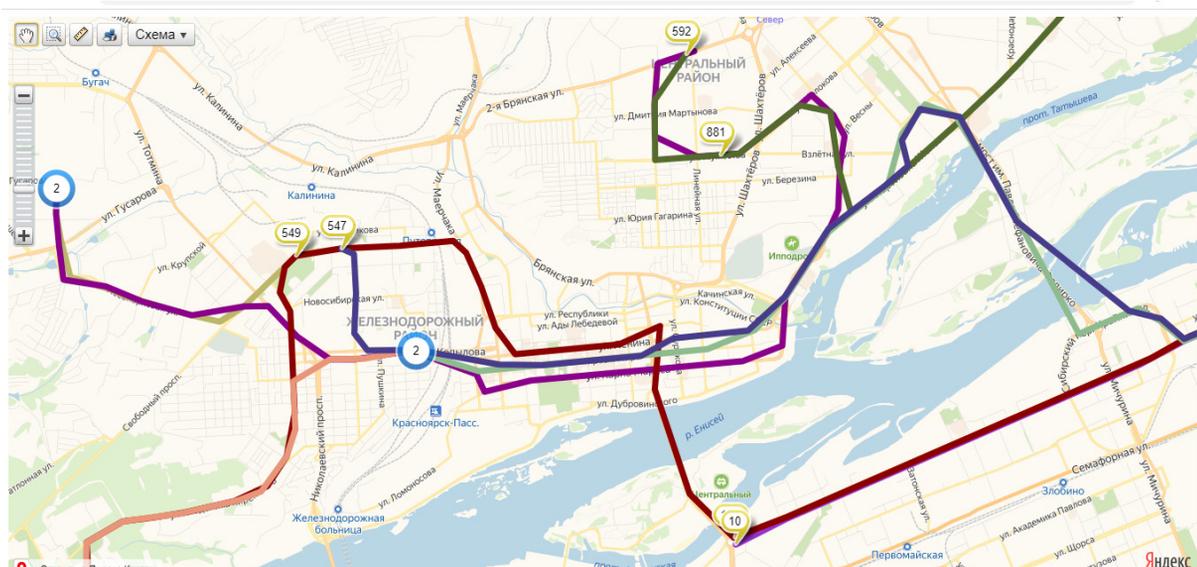


Рисунок 10 – Схема пассажирской корреспонденции коммивояжера: начальный пункт 549 и конечный – 547 находятся на расстоянии пешеходной доступности⁶

Figure 10 – Scheme of short activities trip: start at point 549 and end 547, which are within walk access link

В соответствии с таблицей 4 на маршрутной сети г. Красноярск в настоящее время к поездкам с пересадками относится 8,5% пассажирских корреспонденций. Из них около половины (44,8) – это корреспонденции коммивояжера, т.е. поездки, выполняемые с определенными целями в пунктах пересадок. Таким образом, удельный вес поездок с пересадками за вычетом поездок коммивояжера составляет 4,7%, причем в сетевых корреспонденциях наблюдается не более одной пересадки. Все по-

ездки с большим числом пересадок в результате анализа отнесены к корреспонденциям коммивояжера.

Из таблицы 4 видно, что суммарный удельный вес по критериям корреспонденций коммивояжера превышает удельный вес таких поездок. Это объясняется тем, что некоторые поездки коммивояжера удовлетворяют более чем одному показателю, например, критерию пешеходной доступности и совпадению участков сети разных звеньев корреспонденции.

⁶ Получено с использованием API Яндекс.Карт

Таблица 4
Структура корреспонденций коммивояжера, определенных по предложенным критериям

Table 4
Short activities trips structure identified by proposed criteria

| Поездки | | | Критерии поездок коммивояжера | | | | | | | |
|---------|------------|------------|-------------------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|
| Звеньев | ВСЕГО | | Пешеходная доступность | | Совпадения участка сети | | Фактическая и сетевая длина | | ИТОГО | |
| | Количество | Уд. вес, % | Количество | Уд. вес, % | Количество | Уд. вес, % | Количество | Уд. вес, % | Количество | Уд. вес, % |
| 1 | 2154165 | 91,5 | | | | | | | | |
| 2 | 189363 | 8,0 | 25557 | 13,5 | 71897 | 38,0 | 54487 | 28,8 | 79716 | 42,1 |
| 3 | 10226 | 0,4 | 1669 | 16,3 | 8203 | 80,2 | 5715 | 55,9 | 8577 | 83,9 |
| 4 | 1689 | 0,1 | 615 | 36,4 | 1642 | 97,2 | 1446 | 85,6 | 1689 | 100,0 |
| 5 | 146 | 0,0 | 54 | 37,0 | 146 | 100,0 | 135 | 92,5 | 146 | 100,0 |
| 6 | 27 | 0,0 | 4 | 14,8 | 27 | 100,0 | 26 | 96,3 | 27 | 100,0 |
| 7 | 5 | 0,0 | 1 | 20,0 | 5 | 100,0 | 5 | 100,0 | 5 | 100,0 |
| 8 | 2 | 0,0 | | | 2 | 100,0 | 2 | 100,0 | 2 | 100,0 |
| * | 201458 | 8,5 | 27900 | 13,8 | 81922 | 40,7 | 61816 | 30,7 | 90162 | 44,8 |
| ** | 2355623 | 100 | | | | | | | | |

Примечание. * поездок с пересадками; ** поездок всего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перспективным источником данных о спросе на общественный транспорт является массив операций валидации **электронных проездных билетов, посредством которого** обеспечивается определение пассажирских корреспонденций без применения дорогостоящих процедур анкетирования пассажиров и натурного обследования пассажирских потоков.

В настоящей статье представлен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (electronic travel tickets): **смарт-карты (smart card)**, транспортной **карты**, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (electronic gadget), реквизиты которых при выполнении валидации фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

2. Проведенная апробация разработанной методики подтверждает эффективность данного подхода для определения спроса на городской общественный транспорт и объективной оценки технико-эксплуатационных по-

казателей функционирования транспортной системы.

Полученные технико-эксплуатационные показатели функционирования транспортной системы подтверждаются отчетными данными перевозчиков и ранее проведенными обследованиями пассажирских потоков.

3. Оценка репрезентативности поездок по электронным билетам, выполненная по разработанной методике с использованием выборочного автоматизированного учета пассажиров, подтверждает статистическое соответствие выборочной совокупности маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций, полученных по данным валидаций электронных проездных билетов, генеральному множеству поездок общественным транспортом в пределах допустимых погрешностей.

Параметры транспортного спроса, полученные из операций валидации электронных проездных билетов, могут применяться для оценки характеристик генеральной совокупности пассажирских корреспонденций в пределах допустимых погрешностей.

4. Направлением дальнейших исследований является интеграция имеющегося программного обеспечения в систему учета

оплаты проезда и диспетчерского управления движением транспорта для обеспечения промышленной технологии непрерывного мониторинга пассажирских потоков общественного городского транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штоцкая А.А. Оценка транспортной подвижности населения на основе дезагрегированных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. 21 (5). С. 199–207.
2. Семёнов В.В., Ермаков А.В. Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 3. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. John Willey & Sons, 2011. 30 p.
4. Lee D. Requiem for large-scale models. Journal of the American Institute of Planners, Vol 39, No 3, May, 1973. p. 63-78
5. Atkins S. Transportation planning models: What the papers say. Traffic Engineering and Control, Vol 27, No 9, September, 1986.
6. Fadeev A.I. Alhousseini S, Belova E.N. Monitoring Public Transport Demand Using Data from Automated Fare Collection System. Advances in Engineering Research, volume 158: Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport". 2018. p. 5-12
7. Fadeev A, Alhousseini S. Using Automated Fare Collection System Data To Determine Transport Demand. Advances in Engineering Research, volume 188. International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). Pp. 1-9
8. Fadeev A, Alhousseini S. Determining The Public Transport Demand by Validation Data Of the Electronic Tickets. MIST: Aerospace 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) 012148 IOP Publishing.
9. Fadeev A.I, Alhousseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering".
10. 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.
11. Chen M. Shiwen Mao, Yin Zhang, Victor C.M. Leung. Big Data. Related Technologies. Challenges, and Future Prospects, Springer, 2014. 100 p.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Devillaine F., Munizaga M.A., M. Trépanier, Detection activities of public transport users by analyzing smart card data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2276, 2012. pp.48-55.
16. 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.
17. Bagchi M., White P. What role for smart-card data from bus systems?. Munic. Eng., vol. 157, 2004. pp.39-46.
18. 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, vol. 2263, 2011. pp.140-150.
19. Cui A. Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
20. 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, Vol. 14, No.4, 2011.
21. 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, vol. 2535, 2015. pp.88-96.
22. 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, vol. 2112, 2009. pp.53-61.
23. Mahrsi K.E. Côme E., Oukhellou L., Verleysen M. Clustering smart card data for urban mobility analysis. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, vol. 18, NO. 3, March 2017.
24. Jinhua Zhao J, Rahbee A. Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 22 (2007). pp 376-387.
25. 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.
26. Joana Horaa. Teresa Galvão Diasa , Ana Camanhóa , Thiago Sobral. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system. Transportation Research Procedia 27 (2017). pp. 664-671.
27. Munizaga M. Devillaine F., Navarrete C., Silva D. Validating travel behavior estimated from smartcard data. Transportation Research Part C Emerging Technologies. July 2014. pp. 1-18.

REFERENCES

1. Shtockaja A.A. Mihajlov A.Ju. Ocenka transportnoj podvizhnosti naselenija na osnove dezagregirovannyh mo-delej [Assessment of transport mobility of the population based on disaggregated models] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2017; 2.(5): 199-207. (In Russian)
2. Semjonov V.V., Ermakov A.V. Istoricheskij analiz modelirovanija transportnyh processov i transportnoj infrastruktury [Historical analysis of modeling transport processes and transport infrastructure] *Preprinty IPM im. M.V.Keldysha*. 2015; 3(36). URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>. (In Russian)
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. *John Willey & Sons*, 2011.
4. Lee D. Requiem for large-scale models. *Journal of the American Institute of Planners*, Vol 39, No 3, May, 1973.
5. Atkins S. Transportation planning models: What the papers say. *Traffic Engineering and Control*, Vol 27, No 9, September, 1986.
6. Fadeev A.I. Alhousseini S, Belova E.N. Monitoring Public Transport Demand Using Data from Automated Fare Collection System. *Advances in Engineering Research*, volume 158: Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport". 2018; 5: 12.
7. Fadeev A, Alhousseini S. Using Automated Fare Collection System Data To Determine Transport Demand. *Advances in Engineering Research*, volume 188. International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019): 1-9.
8. Fadeev A, Alhousseini S. Determining The Public Transport Demand by Validation Data Of the Electronic Tickets. *MIST: Aerospace 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) 012148* IOP Publishing.
9. Fadeev A.I, Alhousseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering".
10. Zheng Y, Capra L, Wolfson O, and Yang H, Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 2014; 3(5): 1-55.
11. Chen M. Shiwen Mao, Yin Zhang, Victor C.M. Leung. *Big Data. Related Technologies. Challenges, and Future Prospects*, Springer, 2014: 100.
12. 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, 2002:183-187.
13. 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: 376-387.
14. 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; 7: 1-14.
15. Devillaine F., Munizaga M.A., M. Trépanier, Detection activities of public transport users by analyzing smart card data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012; 2276: 48-55.
16. 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; 24: 9-18.
17. Bagchi M., White P. What role for smart-card data from bus systems?. *Munic. Eng.* 2004; 157: 39-46.
18. 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.
19. Cui A. Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. *Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
20. 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).
21. 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.
22. 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.
23. Mahrsi K.E. Côme E., Oukhellou L., Verleysen M. Clustering smart card data for urban mobility analysis. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. March 2017; 3(18).
24. Jinhua Zhao J, Rahbee A. Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22 (2007): 376-387
25. 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: 133-142. DOI:10.1109/TITS.2015.2464335.
26. Joana Horaa, Teresa Galvão Diasa, Ana Camanho, Thiago Sobral. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system. *Transportation Research Procedia*. 2017; (27): 664-671.
27. Munizaga M. Devillaine F., Navarrete C., Silva D. Validating travel behavior estimated from smartcard data. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. July 2014: 1-18.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

ному множеству пассажирских корреспонденций, анализ полученных данных.

Алхуссейни С. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников. Участие в подготовке исходных данных и расчетов.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeev, the development of a methodology for calculating the throughput capacity of stop points in urban passenger transport, the development of an algorithm for simulating a stop point as QS, the analysis of the obtained calculations.

Sami Alhusseini, an analyzed status of the problem, literary sources review, participation in preparation and analysis input data for calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57208356151, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26, e-mail: fai@ak1967.ru).

Алхуссейни Сами – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета «СФУ», ORCID: orcid.org/0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26, e-mail: eng.sami20143@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Transport department at Siberian Federal University, Scopus ID: 57208356151, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogost., 26. E-mail: fai@ak1967.ru).

Sami Alhusseini – Postgraduate student of the Transport department at Siberian Federal University, ORCID: 0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogost., 26. E-mail: eng.sami20143@gmail.com).