

Труды МАИ. 2024. № 134
Trudy MAI, 2024, no. 134

Научная статья

УДК 519.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178479>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СВЯЗНОСТИ АВИАЦИОННОЙ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Илья Вадимович Урюпин

Федеральный Исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
(ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия

uryupin93@yandex.ru

Аннотация. Важной составляющей социально-экономического развития страны является наличие развитой мультимодальной транспортной системы. Одной из основных задач эффективного функционирования такой системы представляется в согласованности друг с другом отдельно взятых видов транспорта, что позволяет повысить транспортную доступность для потенциальных пассажиров в системе.

В работе исследуется проблема связности железнодорожной и авиационной систем на территории Российской Федерации (РФ). Разработана модель, позволяющая определить для каждого пункта полета доступность железнодорожного сообщения. В качестве метрики выступает время движения по дорогам. На основе разработанной модели сформированы группы пунктов полета по доступности альтернативного вида транспорта. Определены пункты, из которых

теоретически могут осуществляться вылеты для подвоза потенциальных пассажиров к железнодорожным станциям, тем самым улучшая связность всей транспортной системы РФ.

Ключевые слова: авиатранспортная система, железнодорожная система, математическое моделирование, программирование, транспортная связность

Для цитирования: Урюпин И.В. Моделирование и оценка связности авиационной и железнодорожной транспортных систем пассажирских перевозок Российской Федерации // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178479>

Original article

MODELING AND ASSESSMENT OF CONNECTIVITY AVIATION AND RAILWAY PASSENGER TRANSPORTATION SYSTEMS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Июа V. Uryupin

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, (FRC CSC RAS),

Moscow, Russia

uryupin93@yandex.ru

Abstract. An important component of the country's socio-economic development is the presence of a developed multimodal transport system. One of the main tasks of the effective functioning of such a system is consistency with each other individual modes of

transport. It makes possible to increase transport accessibility for potential passengers in the system.

The purpose of the study is to assess connectivity of the aviation and rail transport systems of passenger transportation in the Russian Federation. In Russia, it is not possible to talk about a unified transport system, due to the geographical features of the country. But it is also impossible to consider these systems completely unrelated, because in large metropolitan areas of the country, these types of transport closely interact with each other. Therefore, for the effective development of the multimodal transport system of the Russian Federation, it is necessary to take into account for which flight points there is an alternative mode of transport (railway), and for which flight points aviation is the only transport for transportation or it can serve as a feeder transport to railway stations. To solve this problem, a model has been developed that allows us to determine the availability of railway communication for each flight point.

The first section provides a description of the initial data for modeling, and the software implementation of their automatic collection.

In the second section, based on the collected data, a methodology has been developed according to which flight points are divided into 5 structural groups according to the presence and accessibility alternative mode of transport - railway. A “special” group of flight points has been identified, for whose lives air transport is important.

The third section provides an analysis of the results obtained. Populated areas have been identified (including the number of potential passengers in them) from which

departures could theoretically be to the transport passengers to railway stations, thereby increasing the connectivity of transport systems.

Keywords: air transport system, railway system, mathematical modeling, programming, transport connectivity

For citation: Uryupin I.V. Modeling and assessment of connectivity aviation and railway passenger transportation systems of the Russian Federation. *Trudy MAI*, 2024, no. 134.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178479>

Введение

В настоящее время, одним из индикаторов высокого уровня социально-экономического развития страны является наличие современных и эффективных взаимосвязанных транспортных систем, в частности авиационных [1-5]. Такие системы обладают высоким уровнем обслуживания, которые определяются такими характеристиками как: физическая и экономическая доступность [6-9], скорость (время) и безопасность [10]. Высокие параметры уровня обслуживания приводят к увеличению подвижности населения, позволяя получить значимый экономический и социальный эффект [11].

В практике анализа [12, 13], для оценки эффективности как отдельно взятой транспортной системы, так и мультимодальной системы применяется математическое моделирование [14, 15], в основе которого лежат ретроспективные статистические данные маршрутов и перевозок пассажиров [16] или данные потоков, полученные в реальном времени [17]. Такая информация позволяет получить наиболее полную модель транспортной системы и рассчитать ее

характеристики, например такие как доступность и связность [18-22]. На основе полученных данных, в результате моделирования, можно выявить проблемные зоны сформированной транспортной системы для дальнейшего ее улучшения и оптимизации.

В рамках данной статьи исследуется проблема связности железнодорожной и авиационной транспортных систем на территории Российской Федерации. Часто обе транспортные системы тесно связаны друг с другом. Каждый из этих видов транспорта осуществляет междугородние перевозки пассажиров. Зачастую железная дорога и авиация являются конкурирующими/взаимозаменяемыми видами транспорта, то есть выбор того или иного транспорта зависит непосредственно от предпочтения и возможностей потенциального пассажира, а также расписания выполнения рейсов. Кроме конкуренции, железнодорожные и авиационные перевозки могут быть выстроены в единую, так называемую мультимодальную транспортную систему [4], где каждый из видов техники служит подвозящим транспортом для выполнения основной перевозки на поезде или самолете. В качестве единой транспортной системы можно привести примеры таких стран Европейского союза (ЕС), как Германия и Франция. В этих странах пассажир, совершающий поездку между любыми городами внутри страны, может приобрести единый билет, включающий участки маршрута, совершаемые как на поезде, так и на самолете¹.

¹ В Германии такую услугу предоставляет авиаперевозчик Lufthansa, во Франции – Air France.

В Российской Федерации говорить о единой транспортной системе в целом не представляется возможным, ввиду географических особенностей страны, но и считать эти системы абсолютно не связанными тоже нельзя, так как в крупных мегаполисах страны, таких как: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Самара, Сочи, Владивосток, и Волгоград, для подвоза пассажиров до аэропортов существует аэроэкспресс, позволяющий хоть как-то обеспечить связь. При этом, говорить о единой билетной системе, аналогичной европейской, даже для крупных городов, не приходится вовсе, что подтверждает независимость систем для большей части страны. Поэтому для эффективного развития мультимодальной транспортной системы РФ необходимо учитывать для каких пунктов полета есть альтернатива в виде железнодорожного транспорта, а для каких авиация является единственным способом трансфера (перемещения), или может служить подвозящим транспортом к железнодорожным станциям. Для выявления таких мест в транспортной системе РФ разработана модель, позволяющая определить для каждого пункта полета доступность железнодорожного сообщения.

Исходные данные моделирования

Для построения модели, позволяющей оценить связность и доступность авиационной и железнодорожной транспортных систем, реализован сбор и агрегация следующих данных:

1. Распределение численности населения муниципальных образований РФ ²;
2. Координаты населенных пунктов;

² <https://rosstat.gov.ru/munstat>

3. Координаты действующих аэродромов, посадочных площадок и их характеристики³, расписание полетов⁴;
4. Расположение объектов наземной транспортной инфраструктуры для междугородних перевозок и частота движения через них (для железнодорожного транспорта):
5. Протяженность и время в пути по дорогам (с учетом ограничения скорости движения) от населенных пунктов до объектов транспортной инфраструктуры.

Необходимые данные для пунктов 2, 4, 5 получены с помощью проекта OpenStreetMap – некоммерческого веб-картографического проекта по созданию свободной и бесплатной географической карты мира⁵. Для автоматизации сбора данных из OpenStreetMap, на языке программирования R⁶ [23], реализованы программные модули, позволяющие с помощью запросов сохранить в табличном формате необходимые данные.

Для получения координат населенных пунктов в программе использовалась функции геокодирования – получения географических координат по названию объекта, geocode пакета «ggmap».

Координаты для железнодорожных линий получены путем извлечения массива точек изгибов железных дорог⁷ и использовались для проверки

³ <https://maps.aopa.ru>

⁴ <https://www.tch.ru/ru-ru/Stc-and-statistics/Schedule-and-tariffs/Pages/Schedules-and-Rates.aspx>

⁵ <https://www.openstreetmap.org>

⁶ Язык программирования для статистической обработки данных и работы с графикой, а также свободная программная среда вычислений с открытым исходным кодом в рамках проекта GNU.

⁷ Информация об объектах карты в OpenStreetMap представлена в виде массива точек с заданными координатами и различными атрибутами, объединенных в списки трех видов: точка, линия

корректности определения координат железнодорожных станций. Дополнительно реализован сбор информации о частоте движения железнодорожного транспорта через железнодорожные станции, то есть для каждой станции и каждого проходящего через нее номера поезда было оценено суммарное количество рейсов в год. Такой формат представления расписания позволил оценить годовое количество рейсов поездов и/или электричек, соединяющих любые интересующие пары станций.

Для получения данных о протяженности и времени пути между точками по дорогам рассматривалось несколько подходов. Один из них заключался в использовании открытой библиотеки PyRouteLib2, реализованной на языке Python, которая позволяет на основе файла данных OpenStreetMap (*.osm) для пары точек с заданными координатами получить протяженность пути и время движения на выбранном виде транспорта. Однако анализ показал, что время обработки каждого запроса составляло от 30 до 70 секунд, что существенно, особенно при необходимости нахождения значений показателей для сотен тысяч пар точек. В результате в качестве основного был принят подход с использованием API маршрутизатора OpenStreetMap⁸.

Протяженности и продолжительности пути до объектов транспортной инфраструктуры были найдены для всех 19,9 тыс. муниципальных образований. Поскольку доступ к магистральной транспортной инфраструктуре помимо воздушного транспорта осуществляется также железнодорожным и автомобильным видами транспорта, дополнительно была решена задача определения доступности

(кусочно-линейные отрезки) и полигон. Информация о различных видах дорог хранится в списках типа линия.

⁸ <http://router.project-osrm.org/route/v1/car/>

объектов данных видов транспорта. При этом для каждого муниципального образования искались пути до аэропортов и посадочных площадок в радиусе 500 км, железнодорожных станций в радиусе 25 км.

Количество записей в таблице расстояний между населенными пунктами и объектами наземной инфраструктуры воздушного транспорта составило более 339,7 тыс., железнодорожного – более 85,9 тыс. (см. таблица 1).

Таблица 1 – Количество найденных протяженностей пути (записей) между населенными пунктами и объектами транспортной инфраструктуры по федеральным округам.

Федеральный округ	Воздушный транспорт	Железнодорожный транспорт
Центральный	86136	32770
Северо-Западный	22629	5626
Южный	27674	7502
Северо-Кавказский	16863	3616
Приволжский	102326	20389
Уральский	26305	4252
Сибирский	40003	9125
Дальневосточный	17828	2681
Всего	339764	85961

На рисунках 1-2 представлена визуализация данных, полученных в результате автоматизированного сбора.



Рисунок 1 – Карта железнодорожных станций, пунктов полета, основных автодорог.

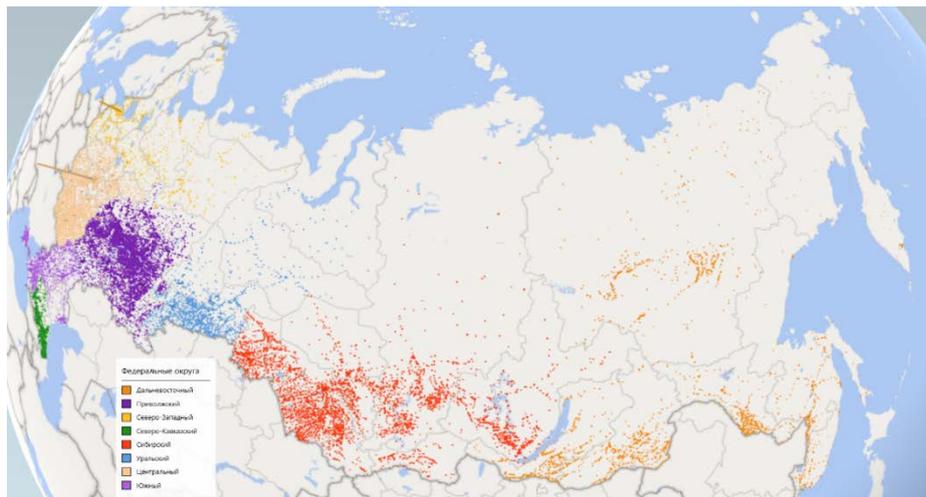


Рисунок 2 – Карта муниципальных образований.

На рисунках видно, что в отличие от пунктов полета, расположенных на всей территории РФ, железнодорожные станции располагаются преимущественно в западной части и по южной границе страны. На этих территориях проживает большая часть населения РФ. Таким образом, можно сказать, что развитие наземной транспортной инфраструктуры того или иного региона напрямую зависит от проживающего числа и плотности населения в нем.

Подход оценки наличия альтернативных видов транспорта

Для анализа пунктов полета на наличие альтернативного вида транспорта предлагается подход позволяющая определить для каждого аэродрома (аэропорта) наличие/доступность железнодорожного сообщения. В предлагаемой модели в качестве основной метрики преодоления пространства взято время [16, 21]. В качестве ограничений выступает расстояние.

Оценка времени по дороге от пункта полета до ближайшей железнодорожной станции, проводились при ограничении 500 км по ортодромии. Выбор такой границы обусловлен возможностью долететь до станции на самолете малой авиации или вертолете, при больших временных затратах на дорогу (более 5 часов) или полном ее отсутствии. Параметр максимально допустимого времени по дороге в 5 часов не противоречит здравому смыслу и обусловлен большой протяженностью РФ, а также сильно неравномерным распределением населения и качеством объектов наземной инфраструктуры. В случае, если расположение железнодорожной станции попадает в радиус не более 10 км по ортодромии от пункта полета, время по дороге не определяется, а два объекта транспортных систем принимаются как достаточно близкие друг к другу. Для такого случая проверка на наличие автомобильной дороги не обязательна, так как такое расстояние, в крайнем случае, возможно преодолеть пешком. Описанный подход был применен к пунктам полета, вошедшим в статистику полетов в 2022 году. В результате применения вышеописанного подхода, сформированы пять структурных групп пунктов полета (см. рисунок 3):

- к первой группе отнесены пункты полета, рядом с которыми (в радиусе не более 10 км) есть железнодорожная станция;
- ко второй группе относятся пункты полета, которые имеют железнодорожную станцию на расстоянии менее 500 км и не более 5 часов езды по дороге;
- третью группу пунктов полета составляют те, в радиусе до 500 км которых есть станция, однако дорога до нее занимает более 5 часов;

- в четвертую группу входят пункты полета, у которых в радиусе до 500 км есть железнодорожная станция, однако добраться до нее по автомобильной дороге не предоставляется возможным;
- в пятую группу отнесены те пункты полетов в радиусе до 500 км нет железнодорожных станций.



Рисунок 3. – Группы пунктов полета, вошедших в статистику полетов.

Анализ и интерпретация результатов

Анализ сформированных групп пунктов полета показал, что пункты полета, относящиеся к первой и второй группам, имеют альтернативу в виде железнодорожного транспорта в пешей или автомобильной доступности. Третья группа является «пограничной» так как с одной стороны, потенциальный пассажир физически может воспользоваться железной дорогой, не прибегая к авиаперевозке. При этом время, затраченное на дорогу до станции, является чрезмерно большим и

может быть оправданно только в случае, когда ожидание необходимого авиарейса превышает временные затраты на дорогу до поезда. С другой стороны, при высокой частоте совершаемых полетов пассажиру выгодней воспользоваться авиатранспортом и не связываться с железной дорогой вовсе. Таким образом, для третьей группы критическими факторами являются частота выполнения авиарейсов и расписание движения поездов.

Четвертую и пятую группы можно выделить в группу пунктов полёта, из которых нельзя добраться до железнодорожной сети. Часто дорожная сеть из/до таких пунктов ограничена и обеспечивает только связь с соседними населенными пунктами. Для таких пунктов авиационный транспорт приобретает жизненно важное значение, обеспечивая любые связи людей, проживающих в пунктах полета с остальным миром. По результатам анализа данная группа является «особой», а связи из таких пунктов названы «витальными».

Для пунктов полета «особой» группы определена численность населения с учетом относящихся к ним населенных пунктов (зон подбора) [16]. В качестве критерия отношения между пунктом полета и соответствующим населенным пунктом взято минимальное время по дороге, которое может затратить потенциальный пассажир (см. рисунок 4). Таким образом, общая зона подбора «особой группы» составляет порядка 1,06 млн. человек (0,7% от общей численности населения РФ⁹).

⁹ На 2023 год численность населения РФ составляет 146,4 млн. человек

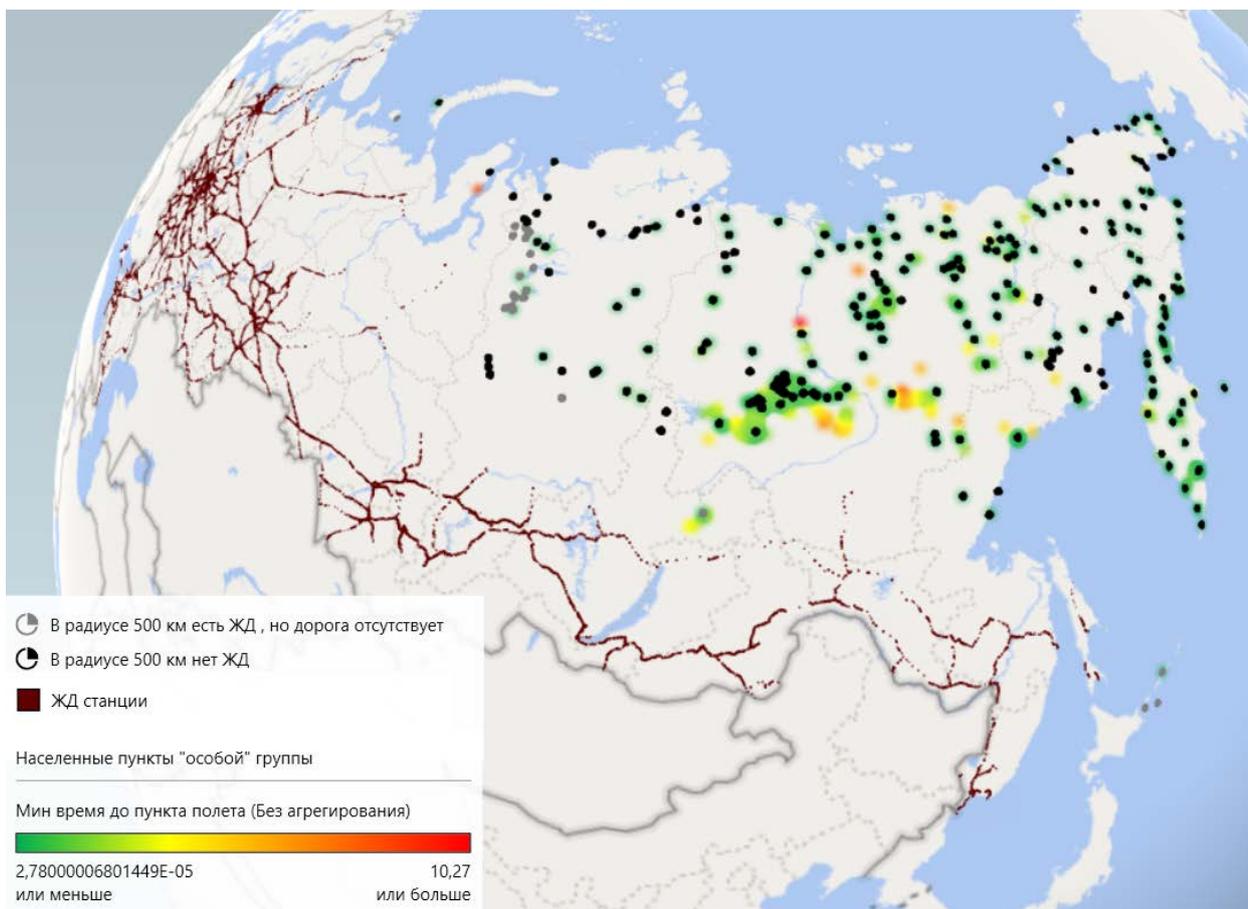


Рисунок 4. – Населенные пункты, относящиеся к «особой» группе.

В «особой» группе, отдельно следует выделить 23 пункта полета с железнодорожным транспортом в радиусе 500 км, но отсутствующей дорогой для подъезда к нему (четвертая структурная группа). Для этих пунктов полета может быть рассмотрена модель, в которой авиация осуществляет не только витальные перевозки в авиатранспортной сети, но и будет служить подвозящим транспортом до железнодорожной станции, тем самым обеспечивая связь транспортных систем. Среди таких пунктов 17 располагаются в Красноярском крае, 4 – в Сахалинской области, по 1 – в Иркутской области и Ненецком автономном округе. При этом многие пункты находятся в непосредственной близости друг от друга и связаны с одной и той же железнодорожной станцией см. таблицу 2. Отметим, что пункты

полета, относящиеся к Сахалинской области, располагаются на Курильских островах, а ближайшая железнодорожная станция для них находится на острове Сахалин (ст. Корсаков) и в настоящее время не связана со станциями материка. Поэтому рассматривать эти связи возможно только в случае реализации проекта по построению железнодорожной инфраструктуры между островом и сушей¹⁰. Остальные связывающие железнодорожные станции такого ограничения не имеют, однако, как отмечено выше, необходимо учитывать частоту рейсов поездов. Анализ расписаний показал, что частота отправления железнодорожного транспорта из таких станций составляет около одного раза в сутки, что является достаточным для продолжения поездки после полета.

Таблица 2 – пункты полета четвертой группы.

Пункт полета	Регион	Связующая станция	Частота поездов
Бугрино	Ненецкий автономный округ	Усинск	~один раз в сутки
Горошиха	Красноярский край	Коротчаево	
Игарка	Красноярский край	Коротчаево	
Крабозаводское	Сахалинская область	Корсаков	
Курейка	Красноярский край	Коротчаево	
Курильск	Сахалинская область	Корсаков	
Мама	Иркутская область	Кюхельбекерская	
Мессояха (Центральная)	Красноярский край	Коротчаево	
Мундуйское	Красноярский край	Коротчаево	
Пелятка	Красноярский край	Коротчаево	
Посино	Красноярский край	Коротчаево	
Потапово	Красноярский край	Коротчаево	
Светлогорск	Красноярский край	Коротчаево	

¹⁰ Одним из таких проектов являлся «Сахалинский тоннель» - незавершённый проект тоннельного перехода через пролив Невельского от мыса Лазарева на материке к мысу Погиби на Сахалине.

Пункт полета	Регион	Связующая станция	Частота поездов
Снежногорск	Красноярский край	Коротчаево	~один раз в сутки
Старотуруханск	Красноярский край	Коротчаево	
Суринда	Красноярский край	Карабула	
Туруханск	Красноярский край	Коротчаево	
Тухард	Красноярский край	Коротчаево	
Усть-Порт	Красноярский край	Коротчаево	
Фарково	Красноярский край	Коротчаево	
Южно-Курильск	Сахалинская область	Корсаков	
Буревестник	Сахалинская область	Корсаков	
Ванкор	Красноярский край	Коротчаево	

Четвертую структурную группу можно дополнить третьей – «пограничной» (см. рисунок 5). Объединяет эти две группы наличие железнодорожной станции в радиусе 500 км. С другой стороны, добраться до этих станций или невозможно, или требует больших временных затрат. Для третьей группы потребность в использовании авиации как подвозящего транспорта ниже за счет существования автомобильных дорог. Кроме самих пунктов полета, необходимо также учитывать и населенные пункты, расположенные рядом, так как в некоторых случаях человеку быстрее доехать до железной дороги, чем добираться до пункта полета, с последующей возможностью долететь до железнодорожной станции. На рисунке 6 представлено распределение населенных пунктов РФ относительно транспортной инфраструктуры.

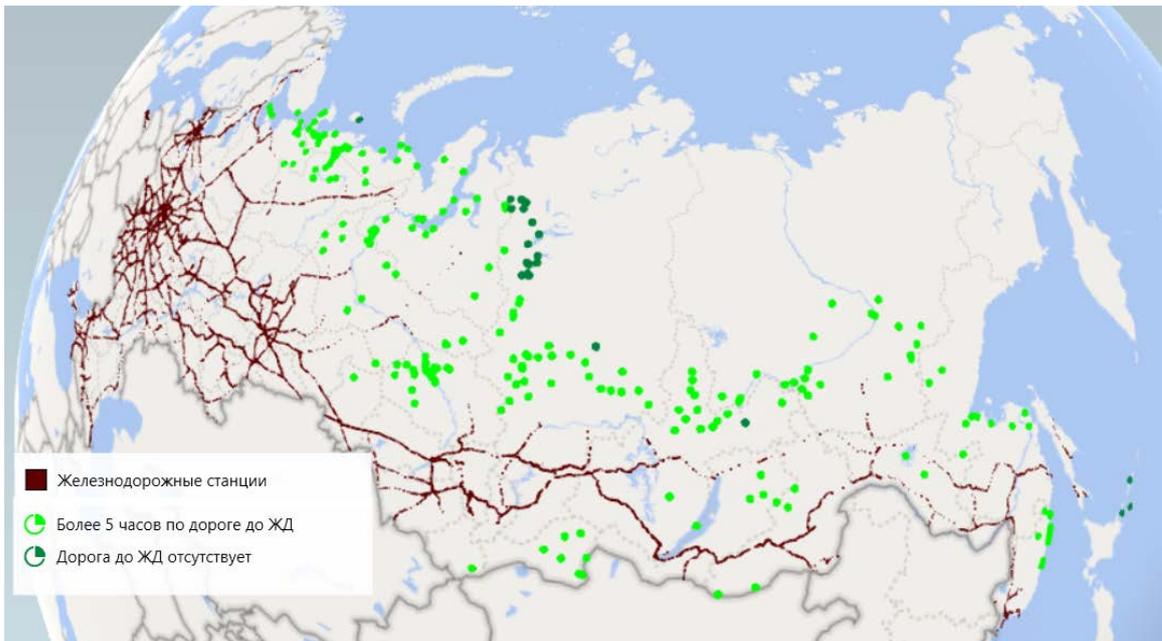


Рисунок 5. – Пункты полета третей и четвертой структурной группы.



Рисунок 6. – Распределение населенных пунктов РФ относительно транспортной инфраструктуры.

Красным цветом выделены населенные пункты, рядом с которыми в радиусе 10 км располагаются железнодорожные станции. Фиолетовым цветом обозначены населенные пункты, из которых можно добраться до пунктов полета по дороге менее чем за 3 часа. Желтым цветом выделены населенные пункты, относящиеся к пунктам полета структурных групп 3 – 4, где временные затраты на дорогу до пункта полета составляют менее 3 часов, а на дорогу до станции более 5 часов. Оранжевым цветом выделены населенные пункты, относящиеся к пунктам полета структурных групп 3 – 4, где временные затраты на дорогу до пункта полета составляют менее 3 часов, при этом дорога до станции займет менее 5 часов. То есть пассажир из «оранжевого» населенного пункта скорее предпочтет дорогу сразу до железнодорожной станции более быстрой дороге до пункта полета, но дополнительно потраченным временем на ожидание рейса и дальнейший перелет. Таким образом, выделенный 231 пункт полета 3 – 4 групп и относящиеся к ним найденные «желтые» 376 населенных пункта определяют зону подбора в ~1,25 млн. человек, которую можно рассматривать как потенциал для рынка подвозящих авиаперевозок.

Заключение

Существование связи между авиационной и железнодорожной системами в РФ в настоящее время в большей степени присуще только крупным городам, таким как: Москва, Санкт-Петербург, Казань, Самара, Сочи, Владивосток, и Волгоград; где поезда служат подвозящим транспортом для авиационных рейсов. Для всех

остальных регионов говорить о целостности и связности транспортных систем пассажирских перевозок не приходится.

Реализованы программные модули, позволяющие в автоматическом режиме собрать данные, необходимые при моделирования авиатранспортной и железнодорожной транспортных систем для оценки связности. На основе собранных данных, разработана методика, с помощью которой пункты полета распределены на 5 структурных групп по наличию и доступности альтернативного вида транспорта – железной дороги. Определена «особая» группа пунктов полета (и относящиеся к ней населенные пункты), для которой авиационный транспорт несет жизненно важное значение. Зона подбора группы составляет порядка 1 млн. человек (0,7% от общей численности населения РФ).

Определен 231 пункт, с общей зоной подбора ~1,25 млн. человек, из которых теоретически могут осуществляться вылеты для подвоза пассажиров к железнодорожным станциям, тем самым повышая связность транспортных систем.

Список источников

1. Бардаль А.Б. Оценка качества транспортных услуг для населения // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные социально-экономические процессы: проблемы, тенденции, перспективы» (Хабаровск, 24 апреля 2020). – Хабаровск: Дальневосточный институт управления, 2020. – С. 12-17.
2. Baron A. Air transport efficiency and its measures // Prace Instytutu Lotnictwa, 2010, no. 3 (205), pp. 119-132.

3. Горшкова И.В. Экономический анализ перспектив развития воздушного транспорта в малонаселенных регионах России // Проблемы прогнозирования. 2011. № 6 (129). С. 36-52.
4. Van Nes R. Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach, 2002, 304 p.
5. Немудрый К.В. Аэродромы и аэропорты как один из элементов системы региональной авиации России // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49715>
6. Горбунов В.П. Эволюция представлений о транспортной доступности // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 8. С. 10-14.
7. Ковалева Е.Н. Интегральная транспортная доступность как показатель качества транспортного обслуживания // Журнал университета водных коммуникаций. 2011. № 3. С. 171-175.
8. Неретин А.С. Транспортное положение и доступность территорий Европейской России: дисс... кандидата географических наук. Москва, 2018. – 193 с.
9. Тархов С.А. Изменение связности пространства России (на примере авиапассажирского сообщения). - М.-Смоленск: Институт Географии РАН, 2015. 154 с.
10. Макаров В.П. Разработка в авиакомпании системы менеджмента рисков в отношении безопасности полетов // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=42014>

11. Немудрый К.В. Региональная авиация как одно из условий эффективного социально-экономического развития приарктических районов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30712>
12. Washington S. et al. Statistical and econometric methods for transportation data analysis, Chapman and Hall/CRC, 2020, 496 p.
13. Richmond S.B. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis // Journal of Air Law and Commerce, 1955, vol. 22. URL: <https://scholar.smu.edu/jalc/vol22/iss4/4>
14. Janic M. Air transport system analysis and modelling, CRC Press, 2000, 318 p.
15. Чистяков П.А., Фадеев М.С., Дмитриев М.Э. и др. Интегрированная транспортная система. – М.: Центр стратегических разработок, 2018. – 278 с.
16. Сухарев А.А., Власенко А.О., Урюпин И.В. Моделирование и оценка доступности местных и региональных авиаперевозок для населения РФ в интересах формирования требований к перспективным образцам авиатехники // Труды V научно-практической конференции «Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей» (Москва, 04 декабря 2019). – М.: Изд-во «Перо», 2019. С. 188-196.
17. Кулыгин С.В., Казачков В.О., Кочкаров А.А. Мониторинг потоков транспортных средств на платных участках автомобильных дорог на основе применения ГНСС // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=122250>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-06)

18. Дутов А.В., Клочков В.В., Рождественская С.М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и ее регионов // Россия: тенденции и перспективы развития. 2019. № 14-2. С. 43-48.
19. Дубовик В.О. Методы оценки транспортной доступности территории // Региональные исследования. 2013. № 4. С. 11-18.
20. Урюпин И.В., Сухарев А.А., Власенко А.О. Методика оценки качества пассажирской авиатранспортной системы Российской Федерации // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. № 3. С. 79-92. DOI: [10.14357/20718632230309](https://doi.org/10.14357/20718632230309)
21. Урюпин И.В. Определение стандарта транспортной доступности для внутренних пассажирских авиаперевозок // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 66–73.
22. Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 3. С. 78-90.
23. Зададаев С. Математика на языке R. – М.: Litres, 2022. - 324 с.

References

1. Bardal' A.B. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye sotsial'no-ekonomicheskie protsessy: problemy, tendentsii, perspektivy»*, Khabarovsk, Dal'nevostochnyi institut upravleniya, 2020, pp. 12-17.

2. Baron A. Air transport efficiency and its measures, *Prace Instytutu Lotnictwa*, 2010, no. 3 (205), pp. 119-132.
3. Gorshkova I.V. Ekonomicheskii analiz perspektiv razvitiya vozdušnogo transporta v malonaselennykh regionakh Rossii, *Problemy prognozirovaniya*, 2011, no. 6 (129), pp. 36-52.
4. Van Nes R. *Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach*, 2002, 304 p.
5. Nemudryi K.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 75. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49715>
6. Gorbunov V.P. *Byulleten' transportnoi informatsii*, 2019, no. 8, pp. 10-14.
7. Kovaleva E.N. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii*, 2011, no. 3, pp. 171-175.
8. Neretin A.S. *Transportnoe polozhenie i dostupnost' territorii Evropeiskoi Rossii* (Transport situation and accessibility territories of European Russia), dissertation of PhD, Moscow, 2018, 193 p.
9. Tarkhov S.A. *Izmenenie svyaznosti prostranstva Rossii. Na primere aviapassazhirskogo soobshcheniya* (Changing the connectivity of Russian territories. Based on the principle of air passenger traffic), Moscow-Smolensk, Institut Geografii RAN, 2015, 154 p.
10. Makarov V.P. *Trudy MAI*, 2013, no. 68. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=42014>
11. Nemudryi K.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30712>

12. Washington S. et al. *Statistical and econometric methods for transportation data analysis*, Chapman and Hall/CRC, 2020, 496 p.
13. Richmond S.B. Forecasting air passenger traffic by multiple regression analysis, *Journal of Air Law and Commerce*, 1955, vol. 22. URL: <https://scholar.smu.edu/jalc/vol22/iss4/4>
14. Janic M. *Air transport system analysis and modelling*, CRC Press, 2000, 318 p.
15. Chistyakov P.A., Fadeev M.S., Dmitriev M.E. et al. *Integrirovannaya transportnaya sistema* (Integrated Transport System), Moscow, Tsentr strategicheskikh razrabotok, 2018, 278 p.
16. Sukharev A.A., Vlasenko A.O., Uryupin I.V. *Trudy V nauchno-prakticheskoi konferentsii «Upravlenie nauchnymi issledovaniyami i razrabotkami: rol' nauki v dostizhenii natsional'nykh tselei»*, Moscow, Izd-vo «Pero», 2019, pp. 188-196.
17. Kulygin S.V., Kazachkov V.O., Kochkarov A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=122250>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-06)
18. Dutov A.V., Klochkov V.V., Rozhdestvenskaya S.M. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya*, 2019, no. 14-2, pp. 43-48.
19. Dubovik V.O. *Regional'nye issledovaniya*, 2013, no. 4, pp. 11-18.
20. Uryupin I.V., Sukharev A.A., Vlasenko A.O. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2023, no. 3, pp. 79-92. DOI: [10.14357/20718632230309](https://doi.org/10.14357/20718632230309)
21. Uryupin I.V. *Mir transporta*, 2023, vol. 21, no. 3 (106), pp. 66–73.
22. Egoshin S.F., Smirnov A.V. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 78-90.

23. Zadadaev S. *Matematika na yazyke R* (Mathematics in the R language), Moscow, Litres, 2022, 324 p.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Одобрена после рецензирования 15.01.2024

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 10.01.2024; approved after reviewing on 15.01.2024; accepted for publication on 27.02.2024