

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК**Кандидат техн. наук, профессор **Вакуленко С.П.**,**Калинин К.А.**

(Российский университета транспорта. МИИТ)

**USE OF HEXAGONAL ANALYSIS TO IDENTIFY PARAMETERS  
OF PASSENGER TRAFFIC CORRESPONDENCES****S.P. Vakulenko**, Ph.D. (Tech.), Professor,**K.A. Kalinin**

(Russian University of Transport. MIIT)

**Аннотация.** Для выбора оптимальной стратегии развития транспортных коридоров, необходима комплексная оценка образуемых транспортных связей рассматриваемым видом сообщения. Для решения и формализации этой задачи был разработан метод гексагонального анализа транспортных коммуникаций, представляющий собой подход, основанный на представлении экономической географии о закономерностях расселения в пределах агломераций, подразумевающий разделение рассматриваемого полигона на шестиугольные сегменты (гексагоны) и дальнейший анализ образуемых транспортных связей между выделенными ячейками.

**Abstract.** In order to choose the optimal strategy for the development of transport corridors, a comprehensive assessment of the transport links formed by the type of communication under consideration is necessary. To solve and formalize this problem, a method of hexagonal analysis of transport communications was developed, which is an approach based on the representation of economic geography about the patterns of settlement within agglomerations, implying the division of the polygon in question into hexagonal segments (hexagons) and further analysis of the formed transport links between the selected cells.

**Ключевые слова:** транспортные системы, пассажирские перевозки, грузовые перевозки, транспортные коридоры, высокоскоростные перевозки, агломерации.

**Keywords:** transport systems, passenger transportation, freight transportation, transport planning, high-speed transportation, agglomerations.

**Введение**

При проектировании новой, высокопроизводительной транспортной магистральной инфраструктуры (например, высокоскоростных железнодорожных магистралей [1]) или при внедрении принципиально нового вида сервиса для пассажирских или грузовых перевозок на существующей инфраструктуре (например, запуск нового скоростного поезда дальнего следования или внедрение нового ускоренного контейнерного поезда с существенными отличиями потребительских свойств от аналогов [2]) возникает задача прогнозирования эффектов от появления нового вида транспортного сервиса с новыми качественными параметрами сообщения [3] и построения технологической трассировки, представленной в виде графа, соединяющего пункты внедрения рассматриваемого вида сообщения. Технологическая трассировка подразумевает определение перечня **потенциалообразующих пунктов**, формирующих спрос на внедряемый вид транспортной услуги, которые связаны между собой ребрами, отражающими наличие формируемых транспортных корреспонденций между ними. **Транспортная корреспонденция** - это устойчивая транспортная связь между двумя пунктами, для которых характерно наличие транспортных перемещений пассажиров или гру-

зов. Потенциалообразующие пункты выбираются на основе определения спроса на рассматриваемый вид сервиса, без учета топографических условий. После построения технологической трассировки проводится весь дальнейший цикл проектных и строительно-монтажных работ.

Описанные в статье подходы к анализу транспортных коридоров апробированы для пассажирского транспортного коридора Центр-Юг, связывающий Москву с крупнейшими агломерациями юга России. В данном транспортном коридоре проектируется высокоскоростная железнодорожная магистраль Москва – Адлер (ВСЖМ-3), которая из-за большой стоимости сооружения не планируется к реализации на горизонте до 2035 г. Подробнее о проблематике развития данного транспортного коридора описано в [1].

**Метод гексагонального анализа  
транспортных коридоров**

Для решения задачи прогнозирования структуры перевозок в пределах рассматриваемого транспортного коридора разработан метод гексагонального анализа транспортных коммуникаций.

В качестве критерия оценки эффективности, лежащего в основе разработанного метода, выбран экономический эффект от осуществления перевозок. Для оп-

ределения размеров денежных потоков необходим расчет общей величины потребных инвестиций в сооружение или модернизацию транспортной инфраструктуры и общих прогнозных доходов, зависящих от величины пассажиро- или грузопотоков между рассматриваемыми пунктами. В качестве исходных данных для расчета величины корреспонденций между рассматриваемыми пунктами, на примере пассажирского сообщения, должны рассматриваться:

- численность населения городов отправления и прибытия линии ВСЖМ ( $P_i$ ), чел;

- численность населения прилегающих к пунктам отправления и прибытия территорий, находящихся в 2-х часовой изохроне (поясе доступности) к месту перспективного расположения станций ВСЖМ ( $p_i$ ), чел.;

- доля экономически активного (потенциалообразующего) населения региона, определяемого на основе валового регионального продукта (ВРП) региона ( $\alpha_p, \beta_p$ );

- данные о расположении агломераций на топографической карте местности.

В экономической географии разработано множество подходов к применению математических методов для исследования картографических особенностей рассматриваемой территории и определения целочисленных параметров различных участков местности, установление зависимости и предпосылок к образованию транспортных связей между рассматриваемыми агломерациями [4]. Основоположником одного из таких методов является Вальтер Кристаллер, который сформировал **теорию центральных мест**, предполагающую, что элементарные ячейки расселения агломераций образуют треугольную, а не квадратную сеть [5], доказывая, что совокупность таких треугольников образует структуру из правильных шестиугольников, которые в большей степени характеризуют закономерности расселения и перемещения индивидов в пределах городской агломерации или между различными агломерациями. Труды Кристаллера находят свое отражение в работах современных авторов, а теория центральных мест со временем дорабатывалась с целью лучшего отражения закономерностей экономической активности населения регионов [6].

Представление о гексагональном характере экономической активности населения в рамках рассматриваемого региона, использовано при формировании метода исследования транспортных коридоров.

Прогнозирование структуры перевозок для проектируемого транспортного сервиса (на примере организации высокоскоростного железнодорожного пассажирского сообщения) в рамках рассматриваемого коридора предлагается проводить по следующему алгоритму:

1) Топографическая карта местности разбивается на элементарные ячейки – **гексагоны**, каждая из которых характеризуется величинами, необходимыми для построения и анализа транспортных связей – общей величиной проживающего населения,  $a$ , количество потенциалообразующего населения  $\sum P_i$ , и экономическими параметрами развития региона для определения доли экономически активного населения  $\alpha_p; P_i; \beta_p; p_i$  образующего транспортный потенциал коммуникации, общий вид которой приведен на рис. 1.

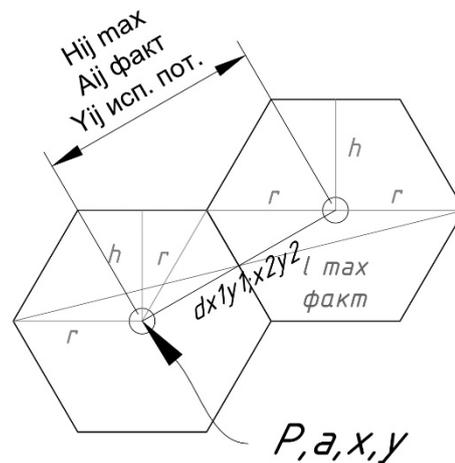


Рис. 1. Параметры элементарной гексагональной ячейки

Размер элементарной ячейки устанавливается параметрами  $r$  или  $h$ , которые должны удовлетворять условиям формулы 1:

$$\begin{cases} l_{max}^{\phi} \leq \Delta l_{пред} \\ \frac{r}{V_m^{zop}} \leq T_{пред} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta l_{пред}$  – максимальное расстояние между отдельными пунктами на ВСЖМ (в случае прохождения линии ВСЖМ через рассматриваемую элементарную ячейку в ней будет располагаться минимум 1 отдельный пункт: пассажирская или техническая станция);  $l_{max}^{\phi}$  – максимальное геометрическое расстояние между вершинами двух соседних гексагонов;  $V_m^{zop}$  – средняя скорость подвозящего транспорта в рассматриваемом регионе, км/ч;  $T_{пред}$  – допустимое время (изохрона) подвоза пассажиров к элементу формируемой пассажирской инфраструктуры, мин.,  $r$  – радиус описанной окружности вокруг рассматриваемых гексагонов, км.

Величина параметра  $r$  принимается исходя из общей величины рассматриваемого полигона и вида формируемого сообщения. Так, при анализе перспектив организации высокоскоростного железнодорожного сообщения на основе анализа мирового опыта расположения отдельных пунктов [7] и в соответствии с отечественными разработками перспективных схем путевого развития на линиях ВСЖМ [8,9,10] целесообразно принять  $r = 10$  км.

Между ячейками попарно возникают транспортные связи  $d_{x_1y_1; x_2y_2}$ , где  $x; y$  – координата положения ячейки на плане транспортного коридора. Для каждой выделенной транспортной связи можно определить величины  $H_{max}^{ij}$  – потенциал корреспонденции, определяемый как условно постоянная часть гравитационной формулы при прогнозировании пассажиропотоков [11,12,13];  $\gamma_{исп. ном., ч}^{ij}$  – коэффициент использования потенциала корреспонденцией пассажиропотоков (переменная величина), применяемый при использовании эмпирических (гравитационного или энтропийного) методов прогнозирования величины транспортной корреспонденции [14,15];  $A_{факт}^{ij}$  – фактическая величина пассажиропотока между рассматриваемыми гексаго-

нальными ячейками;  $L_{min}^{ij}$  – кратчайшее расстояние между центрами элементарных ячеек или формируемых агломерационных ячеек.

**II)** Составляется гексагональная схема транспортно-коридора с выделением основных агломераций.

Границы крупных городских агломераций не всегда могут располагаться в пределах одной рассматриваемой элементарной ячейки, поэтому для корректного анализа таких населенных пунктов целесообразно объединение нескольких элементарных ячеек в агломерационную ячейку. На рис. 2 приведен пример составле-

ния гексагональной схемы транспортно-коридора при взаимном расположении двух городских агломераций (косая штриховка) и фактической трассировки линии ВСЖМ между ними (толстая изогнутая линия). Внутри каждой ячейки указаны её координаты в принятой системе отсчета.

Расстояние между рассматриваемыми агломерационными ячейками определяется по формуле:

$$L_{min}^{ij} = \sqrt{r^2 * ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)} \quad (2)$$

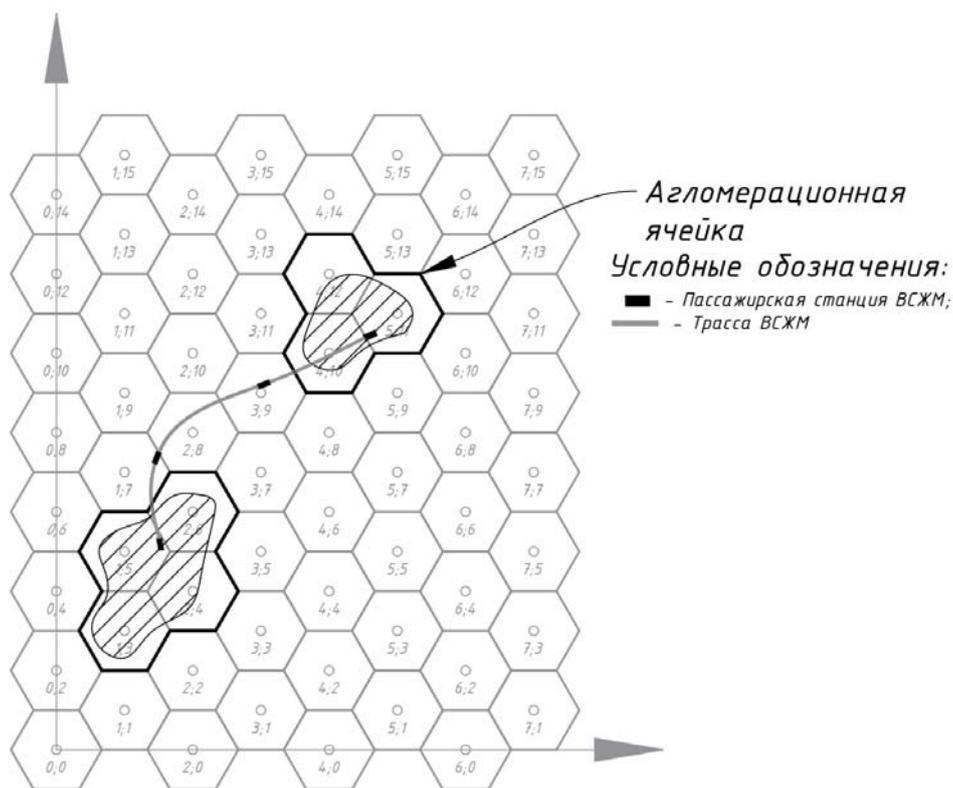


Рис. 2. Схема взаимного расположения агломерационных ячеек

Итоговый потенциал агломерационной ячейки определяется как сумма потенциально экономически активного населения пунктов, между которыми осуществляется сообщение, а также прилегающих к ним территорий. Необходимо учитывать долю экономически активного, потенциалообразующего населения непосредственно в пункте отправления и прибытия, а также в прилегающих к местам погашения потенциала административных районах и крупных городах.

$$\sum P_{i(j)} = \alpha_{i(j)} * P_{i(j)} + \beta_{i(j)} * p_{i(j)}, \quad (3)$$

где  $P_{i(j)}$  – население основной агломерации (населенного пункта), млн.чел.;  $\alpha_{i(j)}$  – доля экономически активного, потенциалообразующего населения в пункте;  $p_{i(j)}$  – население прилегающих экономически задействованных территорий, млн.чел.;  $\beta_{i(j)}$  – доля экономически активного, потенциалообразующего населения в прилегающих территориях.

Для уменьшения размерности решаемой задачи, на основе мирового опыта были выработаны требования к суммарному населению элементарных агломерационных ячеек. Так для рассмотрения целесообразности развития высокоскоростного железнодорожного сообщения с агломерацией, общее население агломерации должно составлять более 100 тыс. человек. В соответствии с указанными принципами для пассажирского транспортно-коридора Центр-Юг были выбраны потенциалообразующие пункты, обозначенные на рис. 3, куда вошли крупнейшие города Центрального, Приволжского и Северо-Кавказского федеральных округов. На основе этой выборки составлена гексагональная схема данного транспортно-коридора Центр - Юг с директивной корреспонденцией Москва-Сочи, приведенная на рис. 4. На схеме обозначены все агломерационные ячейки, удовлетворяющие установленным условиям и все образуемые между ними транспортные связи.

Условные обозначения:



- Агломерационная ячейка с населением более 500 000 чел.



- Агломерационная ячейка с населением 250 000 - 500 000 чел.



- Агломерационная ячейка с населением 100 000 - 250 000 чел.



Рис. 3. Схема потенциалообразующих пунктов транспортного коридора Центр-Юг

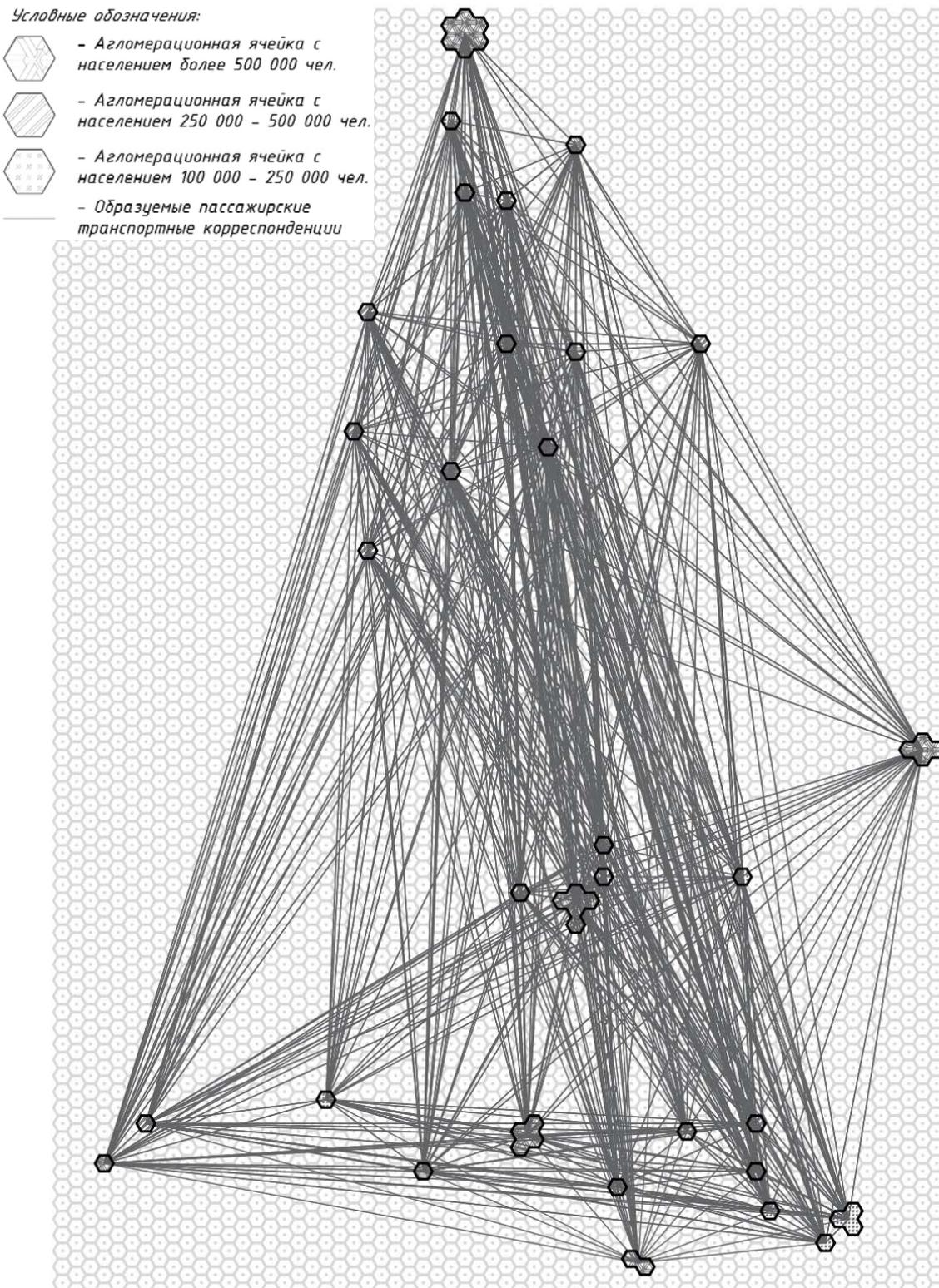


Рис. 4. Гексагональная схема транспортного коридора Центр-Юг

На основании полученной схемы расположения агломерационных ячеек и характеристик образуемых транспортных связей решается задача о выделении наиболее эффективного маршрута прохождения линии ВСЖМ в рассматриваемом коридоре.

Из выделенных на гексагональной схеме транспортных связей между пунктами необходимо осуществить выбор наиболее рациональных схем прохождения железнодорожной линии. Выделенные варианты прохождения участка линии будут отличаться общей протяженностью, что непосредственно влияет на время в

пути по директивной корреспонденции  $d_{i,k}$  так как при увеличении общего времени в пути за счет прохождения 1 дополнительного населенного пункта  $j1$  уменьшается потенциальное число пассажиров на корреспонденции  $d_{i,k}$  но возникают новые связи  $d_{i,j1}$  и  $d_{j1,k}$ . Схема образования транспортных связей при различных вариантах трассировки на примере линии ВСЖМ приведена на рис. 5.

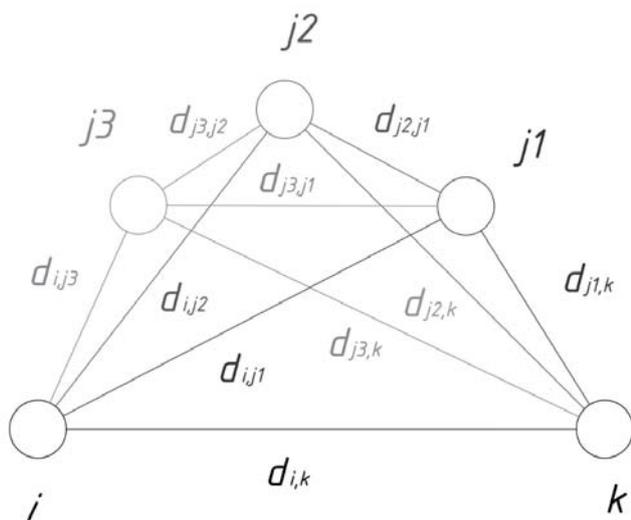


Рис. 5. Образующие связи при трассировке линии ВСЖМ

На этапе разработки технологической трассировки возникает задача по оптимизации прохождения линии при условии максимизации эффектов от внедрения нового вида транспортной услуги, выраженных в общей рентабельности железнодорожного сообщения. Полученная задача является комбинаторной задачей оптимизации, так как поиск оптимального решения производится на дискретном множестве различных сетей – связанных подграфов полного графа, содержащих первую и последнюю вершины (Москва – Сочи). Для решения задачи и определения величин пассажиропотоков на различных корреспонденциях применимы гравитационный и энтропийный методы исследования, находящиеся между собой во взаимной зависимости [16], расчет производится итерационным методом с применением элементов линейного программирования. При анализе различных конфигураций сети для поиска кратчайших расстояний применим метод Флойда-Уоршелла [17,18].

#### Сфера применения разработанного метода

Описанный алгоритм исследования транспортных коммуникаций может применяться при различной размерности решаемых задач. Мировой и отечественный опыт транспортного планирования показывает необходимость в составлении графов транспортных сетей **на макроуровне** [19,20], **мезоуровне** [21,22] и **микроуровне**:

- **на макроуровне** – метод гексагонального анализа применим для исследования транспортных корреспонденций на сетевом уровне, перспективы сооружения или модернизации инфраструктуры, географии внедрения новых видов сервиса перевозок в пассажирском и грузовом сообщениях, затрагивающих несколько регионов и множество населенных пунктов;

- **на мезоуровне** – подразумевает детальный анализ транспортных коммуникаций отдельно взятой агломерации (метод применим при изменении и развитии городских и пригородно-городских видов общественного транспорта);

- **на микроуровне** – метод применим при исследовании отдельно взятых элементов транспортной инфраструктуры [23,24], транспортно-пересадочных узлов, вокзальных комплексов, станций метрополитена, транспортно-логистических комплексов и т.д.

#### Выводы:

Для принятия эффективных управленческих решений о развитии магистральных видов транспорта необходимо провести комплексный анализ закономерностей формирования пассажиропотоков или грузопотоков в пределах рассматриваемого транспортного коридора. Для решения этой задачи в статье разработан метод гексагонального анализа транспортных коммуникаций, позволяющий формализовать задачу об определении наиболее эффективных направлений развития инфраструктуры, получить целочисленные характеристики агломераций и транспортных связей в рамках рассматриваемого коридора, получить исходные данные для дальнейшего моделирования транспортных процессов. Разработанный метод применим при различных размерностях задачи и в зависимости от объекта исследования может применяться на макроуровне, мезоуровне и микроуровне проектирования.

#### Литература

- 1) О развитии пассажирского транспортного коридора Север - Юг / С.П. Вакуленко, А.В. Колин, Д.Ю. Роменский, К.А. Калинин // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 4. – С. 24-29.
- 2) Вакуленко С.П. Ускоренные грузовые перевозки железнодорожным транспортом / С.П. Вакуленко, М.Н. Прокофьев, Н.Ю. Евреенова. – Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2021. – 234 с. – ISBN 9785787603941.
- 3) Вакуленко С.П. О разработке качественных параметров формируемого высокоскоростного железнодорожного сообщения / С.П. Вакуленко, К.А. Калинин, М.В. Роменская // Вопросы устойчивого развития общества. – 2021. – № 8. – С. 265-276.
- 4) Бунге В. Теоретическая география / В. Бунге. – Москва : Издательская группа "Прогресс", 1967. – 280 с.
- 5) Christaller W. Die zentralen Orte in Süddeutschland. – Jena: Gustav Fischer, 1933.
- 6) Дмитриев Р.В. Метрика пространства в теории центральных мест: старые проблемы, новые решения / Р.В. Дмитриев // Географический вестник. – 2019. – № 2(49). – С. 24-34. – DOI 10.17072/2079-7877-2019-24-34.
- 7) Калинин К.А. О комплексном подходе к анализу линий ВСЖМ / К.А. Калинин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 137-147. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_2\_137.
- 8) Пазойский Ю.О. Пассажирский комплекс высокоскоростных магистралей : по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта» в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе образовательных организаций и учреждений, реализующих образовательные программы по специальности 23.05.04 «Эксплуатация железных дорог» / Ю.О. Пазойский, А.А. Сидраков ; ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 139 с. – ISBN 9785907055582.

- 9) Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс : учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2-х томах / И.П. Киселев, Л.С. Блажко, Ю.П. Бороненко [и др.]. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2020. – 397 с. – ISBN 9785907206410.
- 10) Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс : Учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2-х томах / И.П. Киселев, Л.С. Блажко, М.Я. Брынь [и др.]; под редакцией И.П. Киселева; Допущено Федеральным агентством железнодорожного транспорта. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2020. – 428 с. – ISBN 9785907206403.
- 11) Правдин Н.В. Прогнозирование пассажирских потоков (методика, расчеты, примеры) / Н.В. Правдин, В.Я. Негрей. – Москва: Центр "Транспорт", 1980. – 222 с.
- 12) Вакуленко С.П. Метод прогнозирования пассажиропотоков при организации высокоскоростных перевозок / С.П. Вакуленко, Д.Ю. Роменский, К.А. Калинин // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 1-2(92-93). – С. 34-39.
- 13) Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы): учебник / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головин [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 1086 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 9785890356192.
- 14) Бутыркин А.Я. Модели прогнозирования пассажирских перевозок на железнодорожном и авиационном транспорте / А.Я. Бутыркин, Е.Б. Куликова, О.Н. Мадяр // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 1. – С. 19-27.
- 15) Вакуленко С.П., Куликова Е.Б., Мадяр О.Н. Прогнозирование пассажиропотоков - важнейший инструмент эффективной организации пассажирских перевозок в пригородно-городской зоне крупного транспортного узла // Наука и техника транспорта. - 2019. - №1. - С. 8-15.
- 16) Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский [и др.]. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Московский центр непрерывного математического образования, 2013. – 428 с. – ISBN 9785443900407.
- 17) Бойченко П.В. Анализ существующих алгоритмов решения задачи нахождения кратчайшего пути / П.В. Бойченко, Е.А. Деменкова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы III Международной научно-практической конференции: Электронный ресурс, Тамбов, 15–17 ноября 2016 года / Общая редакция: В.А. Немтинов. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2016. – С. 147-151.
- 18) Веретехина С.В. Модели, методы, алгоритмы и программные решения вычислительных машин, комплексов и систем / С.В. Веретехина, В.Л. Симонов, О.Л. Мнацаканян. – Москва: «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. – 268 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 9785160166568.
- 19) Hu B., Ma Y., Pei Y., Gao W. Statistical analysis and predictability of inter-urban highway traffic flows: a case study in Heilongjiang Province, China // *Transportmetrica A: Transport Science*. 2020. Volume 16, Issue 3. С. 1062-1078.
- 20) Fischer S.M., Beck M., Herborg L.-M., Lewis M.A. A hybrid gravity and route choice model to assess vector traffic in large-scale road networks // *Royal Society Open Science*. 2020. Volume 7, Issue 5.
- 21) Liu Y., Fang F., Jing Y. How urban land use influences commuting flows in Wuhan, Central China: A mobile phone signaling data perspective // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Volume 53.
- 22) Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М.Р. Якимов. – Москва: ООО "Издательская группа "Логос", 2013. – 188 с. – ISBN 9785987047293.
- 23) Евреенова Н. Ю. Управление пассажиропотоком крупнейших ТПУ / Н.Ю. Евреенова, К.А. Калинин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 105-113. – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_105.
- 24) Копылова Е.В. Методические подходы к оценке влияния требований пассажиров к качеству транспортного обслуживания на технологию работы железнодорожного транспорта / Е.В. Копылова, М.А. Туманов // Транспортное дело России. – 2018. – № 4. – С. 178-181. – ISSN 2072-8689.

#### Bibliography

- 1) On the development of the North-South passenger transport corridor / S.P. Vakulenko, A.V. Kolin, D.Y. Romensky, K. A. Kalinin // *Rail Transport*. - 2021. - No. 4. - pp. 24-29.
- 2) Vakulenko S.P. Accelerated freight transportation by rail / S.P. Vakulenko, M.N. Prokofiev, N.Yu. Evreenova. - Moscow : Russian University of Transport (МИТ), 2021. - 234 p– - ISBN 9785787603941.
- 3) Vakulenko S.P. On the development of qualitative parameters of the formed high-speed railway communication / S.P. Vakulenko, K.A. Kalinin, M.V. Romenskaya // *Issues of sustainable development of society*. - 2021. - No. 8. - pp. 265-276.
- 4) Bunge V. Theoretical geography / V. Bunge. - Moscow : Progress Publishing Group, 1967. - 280 p.
- 5) Christaller W. Die zentralen Orte in Süddeutschland. – Jena: Gustav Fischer, 1933.
- 6) Dmitriev R.V. The metric of space in the theory of central places: old problems, new solutions / R.V. Dmitriev // *Geographical Bulletin*. – 2019. – № 2(49). – Pp. 24-34– – DOI 10.17072/2079-7877-2019-2-24-34.
- 7) Kalinin K.A. On an integrated approach to the analysis of HSR lines / K.A. Kalinin // *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. – 2021. – № 2(82). – Pp. 137-147– – DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_2\_137.
- 8) Pazoysky Yu.O. Passenger complex of high-speed highways: according to enlarged groups of specialties and areas of training 23.00.00 "Equipment and technologies of land transport" as a textbook for use in the educational process of educational organizations and institutions implementing educational programs in the specialty 23.05.04 "Operation of railways" / Yu. O. Pazoysky, A. A. Sidrakov; FSBI DPO "Educational and Methodological Center for education in railway transport". - Moscow : FSBI DPO "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2019. - 139 p– - ISBN 9785907055582.

- 9) High-speed rail transport. General course : textbook for students of railway transport universities in 2 volumes / I.P. Kiselev, L.S. Blazhko, Yu.P. Boronenko [et al.]. - 2nd edition, revised and supplemented. - Moscow : Federal State Budgetary Institution of Additional Professional Education "Training and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2020. - 397 p. - ISBN 9785907206410.
- 10) High-speed rail transport. General course : Textbook for students of railway transport universities in 2 volumes / I.P. Kiselev, L.S. Blazhko, M.Ya. Bryn [et al.] ; edited by I.P. Kiselev; Approved by the Federal Agency for Railway Transport. - 2nd edition, revised and expanded. - Moscow : Federal State Budgetary Institution of Additional Professional Education "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2020 – 428 p. - ISBN 9785907206403.
- 11) Pravdin N.V. Forecasting passenger flows (methodology, calculations, examples) / N.V. Pravdin, V.Ya. Negrey. - Moscow: Limited Liability Company Center "Transport", 1980– - 222 p.
- 12) Vakulenko S.P. Method of forecasting passenger flows in the organization of high-speed transportation / S.P. Vakulenko, D.Yu. Romensky, K.A. Kalinin // Transport of the Russian Federation. – 2021. – № 1-2(92-93). – Pp. 34-39.
- 13) Designing the infrastructure of railway transport (stations, railway and transport hubs) : textbook / N.V. Pravdin, S.P. Vakulenko, A.K. Golovnich [et al.]. - Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2012 - 1086 p. - (Higher professional education). – ISBN 9785890356192.
- 14) Butyrkin A.Ya. Models of passenger transportation forecasting on railway and aviation transport / A.Ya. Butyrkin, E.B. Kulikova, O.N. Madyar // Science and Technology of Transport. - 2021. - No. 1. - pp. 19-27.
- 15) Vakulenko S.P., Kulikova E.B., Malyar O.N. Passenger traffic forecasting is the most important tool for the effective organization of passenger transportation in the suburban-urban zone of a major transport hub // Science and Technology of Transport. - 2019. - No. 1. - pp. 8-15.
- 16) Introduction to mathematical modeling of transport flows / A.V. Gasnikov, S. L. Klenov, E. A. Nurminsky [et al.]. - 2nd edition, revised and supplemented. - Moscow: Moscow Center for Continuing Mathematical Education, 2013. - 428 p - ISBN 9785443900407.
- 17) Boychenko P.V. Analysis of existing algorithms for solving the problem of finding the shortest path / P.V. Boychenko, E.A. Demenkova // Virtual modeling, prototyping and industrial design: Materials of the III International Scientific and Practical Conference: Electronic resource, Tambov, November 15-17, 2016 / General edition: V.A. Nemtinov. - Tambov: Tambov State Technical University, 2016. - pp. 147-151.
- 18) Veretekhina S.V. Models, methods, algorithms and software solutions of computing machines, complexes and systems / S.V. Veretekhina, V.L. Simonov, O.L. Mnatsakanyan. - Moscow: Limited Liability Company "Scientific and Publishing Center INFRA-M", 2020. - 268 p. - (Higher education: Bachelor's degree). – ISBN 9785160166568.
- 19) Hu B., Ma Y., Pei Y., Gao W. Statistical analysis and predictability of inter-urban highway traffic flows: a case study in Heilongjiang Province, China // *Transportmetrica A: Transport Science*. 2020. Volume 16, Issue 3. C. 1062-1078.
- 20) Fischer S.M., Beck M., Herborg L.-M., Lewis M.A. A hybrid gravity and route choice model to assess vector traffic in large-scale road networks // *Royal Society Open Science*. 2020. Volume 7, Issue 5.
- 21) Liu Y., Fang F., Jing Y. How urban land use influences commuting flows in Wuhan, Central China: A mobile phone signaling data perspective // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Volume 53.
- 22) Yakimov M.R. Transport planning: creation of transport models of cities / M.R. Yakimov. - Moscow : LLC "Logos Publishing Group", 2013. - 188 p– - ISBN 9785987047293.
- 23) Evreenova N.Yu. Passenger traffic management of the largest TPU / N.Yu. Evreenova, K.A. Kalinin // *Bulletin of the Rostov State University of Railways*. – 2021. – № 3(83). – Pp. 105-113– - DOI 10.46973/0201-727X\_2021\_3\_105.
- 24) Kopylova E.V. Methodological approaches to assessing the impact of passenger requirements for the quality of transport services on the technology of railway transport / E.V. Kopylova, M.A. Tumanov // *Transport business of Russia*. - 2018. - No. 4. - PP. 178-181. - ISSN 2072-8689

#### Сведения об авторах:

**Вакуленко Сергей Петрович**, директор Института Управления и Цифровых технологий Российского университета транспорта (МИИТ).

Адрес: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,  
тел. +7 4999723419,  
e-mail: post-iuit@bk.ru.

**Калинин Кирилл Антонович**, ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Российского университета транспорта (МИИТ).

Адрес: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,  
тел. +7 9266609029,  
e-mail: kalinin.k.a@mail.ru.