

УДК: 91:656.022.836:004.9(470.345)

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-94-111

А. Н. Минеев<sup>1</sup>, И. А. Семина<sup>2</sup>, Л. Н. Фоломейкина<sup>3</sup>

## АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено анализу транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия, которая предлагается авторами в качестве одного из показателей оценки уровня развития транспортной системы. Для создания модели транспортной сети используются методы пространственного анализа и теории графов. Выборка элементов графа включает в себя населенные пункты Мордовии с численностью населения 2 000 чел. и более, а также все участки автодорог, обеспечивающие кратчайшие маршруты между ними. В качестве импеданса используется мера расстояния. В статье рассматриваются возможности применения показателей географической и потенциальной доступности, а также индекса объезда для обнаружения проблемных элементов транспортной сети, проводится сравнение показателей методами ранжирования и классификации. С использованием веб-картографических сервисов и инструментов сетевого анализа в ГИС произведены расчеты выбранных показателей. Создана серия отображающих их карт с применением классификации методом естественных границ и градуированных символов в качестве способа картографического изображения. В ходе исследования было установлено, что некоторые кратчайшие маршруты между рассматриваемыми населенными пунктами Республики Мордовия проходят через Нижегородскую область, что говорит о выходе региональной транспортной сети за границы субъекта. Выявлена проблема искусственных барьеров внутри одной страны на уровне муниципальных районов и субъектов федерации. Рассматривается возможность создания проекта улучшения транспортной доступности региона, приводятся доводы в пользу строительства отсутствующих прямых сообщений между населенными пунктами Республики Мордовия. Обозначены целевые показатели и ограничивающие факторы для улучшения транспортной доступности населенных пунктов региона. Рассматриваются возможности дальнейших исследований с применением полученных результатов для комплексного анализа региональной транспортной системы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** транспортная доступность, сетевой анализ, транспортная сеть, региональные транспортные системы, теория графов, ГИС

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,  
*e-mail: mineev.arseniy99@mail.ru*

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,  
*e-mail: isemina@mail.ru*

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, географический факультет, ул. Большевикская, д. 68, Саранск, Россия, 430005,  
*e-mail: folomejkina@mail.ru*

Arseniy N. Mineev<sup>1</sup>, Irina A. Semina<sup>2</sup>, Larisa N. Folomeikina<sup>3</sup>

## ANALYSIS OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA SETTLEMENTS TRANSPORT ACCESSIBILITY VIA GEOINFORMATION TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

The study is devoted to the analysis of transport accessibility of the settlements in the Republic of Mordovia, which is proposed by the authors as one of the indicators for assessing the level of the transport system development. Methods of spatial analysis and graph theory are used to create a transport network model. The selection of graph elements includes settlements in Mordovia with a population of 2 000 people or more, as well as all sections of highways that provide the shortest paths between them. The measure of distance is used as impedance. The article discusses the usability of geographic and potential accessibility, as well as the detour index to detect problematic elements of the transport network, and compares the indicators using the ranking and classification methods. Using web mapping services and network analysis tools in GIS, the selected indicators were calculated and a series of maps were created to display them, using natural breaks classification method and graduated symbols as a method of cartographic representation. During the study, it was found that some of the shortest paths between the considered settlements of the Republic of Mordovia pass through the Nizhny Novgorod Oblast, which indicates that the regional transport network goes beyond the borders of the federal subject. The problem of artificial barriers within one country at the level of municipal districts and federal subjects has been identified. The possibility of creating a project to improve transport accessibility of the region is being considered, and arguments in favor of the construction of missing direct connections between settlements of the Republic of Mordovia are given. The target indicators and limiting factors for improving the transport accessibility of settlements in the region are identified. The possibilities of further research using the obtained results for a comprehensive analysis of the regional transport system are considered.

**KEYWORDS:** transport accessibility, network analysis, transport network, regional transport systems, graph theory, GIS

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день развитие национальной транспортной инфраструктуры является основополагающим фактором экономического развития государства. Несмотря на это, вопросам транспорта зачастую уделяется недостаточно внимания. Темпы развития транспортной инфраструктуры в Российской Федерации отстают от развитых и некоторых развивающихся стран. Отдельные показатели, такие как среднегодовые инвестиции в транспорт, ниже даже среднемировых (по данным за 2014–2019 гг. — 2,3 % от ВВП, что в 1,4 раз меньше, чем в среднем по миру)<sup>4</sup>. В то же время транспортная инфраструктура является капиталоемкой отраслью, наиболее уязвимой к нерациональному использованию средств. Именно поэтому важны исследования в сфере развития научно и экономически

<sup>1</sup> Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: [mineev.arseniy99@mail.ru](mailto:mineev.arseniy99@mail.ru)

<sup>2</sup> Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: [isemina@mail.ru](mailto:isemina@mail.ru)

<sup>3</sup> Mordovian State University, Faculty of Geography, 68, Bolshevistskaya str., Saransk, Republic of Mordovia, 430005, Russia, *e-mail*: [folomejkina@mail.ru](mailto:folomejkina@mail.ru)

<sup>4</sup> Транспортная стратегия РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. Электронный ресурс: <https://rosavtdor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения 12.04.2024)

обоснованного транспортного планирования и моделирования на всех уровнях: муниципальном, региональном, национальном. В Стратегии научно-технологического развития страны приоритетом выступает связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем. Это ответ на вызов, заключающийся в необходимости эффективного освоения и использования пространства.

Одним из индикаторов развития транспортной инфраструктуры является транспортная доступность. *Транспортной доступностью* называют характер удаленности (близости) какого-либо экономико-географического объекта (населенного пункта, экономического центра, промышленного предприятия, места, любой точки территории) по отношению к транспортной магистрали и/или транспортному узлу. Иными словами, транспортная доступность — это потенциальная и реальная возможность достижения какой-либо точки территории с помощью транспортных средств по существующей транспортной сети<sup>1</sup>.

Доступность является одним из показателей пространственного неравенства, что, в свою очередь, положительно или отрицательно сказывается на транспортно-географическом положении территории.

Среди всех видов транспорта Российской Федерации автомобильный, пожалуй, играет самую значительную роль. По данным на 2023 г., автомобильный транспорт преобладает в структуре грузоперевозок Российской Федерации — его доля составляет 71,9 %<sup>2</sup>. Крайне важно и его значение в обеспечении транспортной доступности и связности территории, поскольку автодороги — единственный вид транспорта, представленный на территории всех субъектов федерации [Крылов, 2007, с. 176; Савруков, Савруков, 2020].

Целью данного исследования является анализ транспортной доступности населенных пунктов Республики Мордовия с использованием теории графов и инструментов пространственного анализа. Ожидается, что данный подход позволит выявить проблемные места транспортной сети, требующие внимания при планировании дальнейшего развития инфраструктуры, а также оценить возможности применения названных методов в дальнейшем. Основной акцент исследования направлен на анализ конфигурации и пространственного размещения автомобильных дорог Республики Мордовия. Методика данного исследования может рассматриваться как один из этапов оценки развитости и функциональности региональной транспортной системы, которая будет проводиться в дальнейшем с привлечением большего объема данных и показателей (в т. ч. интегральных).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для измерения транспортной доступности активно применяется теория графов. Транспортная сеть представляется в виде графа, где вершины — это экономико-географические объекты, а ребра — пути сообщения (автодороги, железные дороги, речные и морские пути, маршруты авиатранспорта). Ребра графа имеют импеданс (стоимость перемещения по сети), единица измерения которого зависит от целей исследования и доступности данных.

Импеданс может быть измерен как время, затраченное на перемещение, либо как преодоленное расстояние. «Время» является в этом случае интегральной характеристикой, учитывающей и протяженность дороги, и качество покрытия (влияющее на фактическую

---

<sup>1</sup> Транспортная доступность. Большая российская энциклопедия. Электронный ресурс: <https://bigenc.ru/c/transportnaia-dostupnost-3feb4f> (дата обращения 12.04.2024)

<sup>2</sup> Росстат. Транспорт. Электронный ресурс: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения 20.04.2024)

скорость перемещения), и пропускную способность в целом. Использование в данном исследовании «расстояния» позволяет оценить конфигурацию транспортной сети без учета других характеристик.

Существуют исследования, где в роли импеданса используются как время [Семина, Фоломейкина, 2009; Бугроменко, 2012], так и расстояние [Gankhuyag et al., 2021], или даже комплекс показателей, включающих в себя расстояние, время и различные экономические показатели [Савруков, Савруков, 2020]. Поскольку данное исследование рассматривается как определенный этап оценки транспортной системы Республики Мордовия, рассмотрим расстояние в качестве импеданса для оценки самых базовых характеристик транспортной системы.

Из разработанных к настоящему моменту методов измерения доступности можно вывести два простых и весьма практичных показателя — географическую и потенциальную доступность. *Географическая доступность* (geographic accessibility) предполагает, что доступность местоположения — это сумма всех расстояний между другими местоположениями, деленная на их количество. Чем ниже значение показателя, тем доступнее местоположение. Рассчитывается по формулам (1) и (2):

$$d_{ij} = L \quad (1),$$

$$A(G) = \sum_i^n \sum_j^n \frac{d_{ij}}{n} \quad (2),$$

где  $d_{ij}$  — кратчайшее расстояние между местоположениями  $i$  и  $j$ ,  
 $L$  — матрица взвешенного графа (с учетом импеданса),  
 $A(G)$  — матрица географической доступности,  
 $n$  — количество местоположений.

Географическая доступность является адаптацией индекса Шимбела и взвешенного графа, при которой самое доступное местоположение имеет наименьшую сумму расстояний.

*Потенциальная доступность* (potential accessibility) является более сложным показателем, чем географическая, поскольку она предполагает использование концепции расстояния, взвешенного атрибутами местоположения. Не все местоположения равнозначны — некоторые из них имеют большую важность. Потенциальная доступность может быть рассчитана следующим образом по формуле (3):

$$A(P) = \sum_i^n P_i + \sum_j^n \frac{P_j}{d_{ij}} \quad (3),$$

где  $A(P)$  — матрица потенциальной доступности,  
 $d_{ij}$  — импеданс между местоположениями  $i$  и  $j$  (берется из матрицы взвешенного графа),  
 $P_j$  — атрибуты местоположения  $j$ , такие как численность населения, площадь, используемая для торговли или парковочных мест и т. д.,  
 $n$  — количество местоположений.

Матрица потенциальной доступности не может быть транспонирована, поскольку местоположения обладают неодинаковыми характеристиками, что приводит к основополагающим понятиям излучательности и притягательности:

- *излучательность* (emissiveness) — это способность покинуть местоположение, равная сумме значений по строке в матрице  $A(P)$ ;
- *притягательность* (attractiveness) — это способность добраться до местоположения, равная сумме значений по столбцу в матрице  $A(P)$ .<sup>1</sup>

В матрице  $A(P)$  все ячейки рассчитываются по формуле (4):

$$A(P)_{i,j} = \frac{P_i}{A(G)_{i,j}} \quad (4),$$

где  $P_i$  — численность населения населенного пункта строки  $i$ ,  
 $A(G)_{i,j}$  — соответствующая ячейка матрицы географической доступности, рассчитанной ранее.

Исключением является главная диагональ матрицы  $A(P)$ , ячейкам которой присваиваются значения численности населения соответствующего населенного пункта. Это число обозначает потенциальную возможность перемещения внутри населенного пункта.

Еще одним показателем, используемым в исследовании, является индекс объезда. *Индексом объезда* (detour index) называется мера эффективности транспортной сети с точки зрения того, насколько хорошо она преодолевает расстояние (трение расстояния). Чем ближе индекс объезда к единице, тем больше пространственная эффективность сети. Сети с индексом объезда, равным единице, практически не встречаются — значения большинства сетей помещаются на асимптотической кривой, приближаясь к единице, но не достигая ее. Сложность рельефа часто является хорошим индикатором уровня объезда. Индекс объезда  $DI$  рассчитывается по формуле (5):

$$DI = \frac{D(S)}{D(T)} \quad (5),$$

где  $D(S)$  — расстояние по прямой между пунктом отправления и пунктом назначения,  
 $D(T)$  — транспортное расстояние по существующей дороге или маршруту [Rodrigue et al., 2013, p. 317].

Для построения графа транспортной сети использовался программный комплекс ArcGIS Desktop, в частности модуль и набор инструментов «Сетевой анализ». Он же был использован для картографирования транспортной сети и рассчитанных показателей.

На первом этапе исследования при создании модели транспортной сети (графа) в ГИС необходимо произвести выборку изучаемых населенных пунктов и путей сообщения. От выборки напрямую зависят значения рассчитанных показателей, что приводит нас к утверждению об относительной природе показателей транспортной доступности. Если существует конкретный стратегический транспортный план, нормы и цензы отбора в отношении местоположений, доступность которых необходимо улучшить, или путей сообщения, которые необходимо реконструировать или проложить «с нуля», они могут быть прописаны в нем. В случае, когда плана нет, в качестве цензов могут выступить

<sup>1</sup> The Geography of Transport Systems. A.4 — Transportation and Accessibility. Электронный ресурс: <https://transportgeography.org/contents/methods/transportation-accessibility/> (дата обращения 07.02.2024)

административный статус и/или численность населения. При этом выбранные населенные пункты должны обеспечивать достаточное покрытие исследуемой территории.

В данном исследовании учитывались населенные пункты Республики Мордовия с численностью населения 2 000 чел. и более (37 объектов), суммарная численность населения которых составляет 74 % населения Мордовии (по данным на 2023 г.<sup>1</sup>). Исходя из сущности рассчитываемых показателей географической и потенциальной доступности необходимо включить в графе лишь те участки автодорог, которые задействованы в кратчайших маршрутах между всеми рассматриваемыми населенными пунктами. Кратчайшие маршруты рассчитывались с помощью онлайн-сервиса Яндекс.Карты. Примечательно, что сервис не учитывает в маршрутах автодороги без покрытия, поскольку движение по ним на автомобилях затруднено, а в отдельные сезоны и вовсе невозможно.

В определенных случаях расстояние из пункта *A* в пункт *B* не равно расстоянию из пункта *B* в пункт *A*, что может быть обусловлено односторонним движением по некоторым дорогам. Этот фактор важно учитывать при анализе внутригородской транспортной сети, но на уровне региона им можно пренебречь.

Расстояния по прямой (евклидовы расстояния) между населенными пунктами можно рассчитать уже в ArcGIS, с помощью инструмента «Расстояние между точками». Исходя из допущения о том, что расстояние *AB* идентично расстоянию *BA*, число уникальных расстояний будет равно  $\frac{37 \cdot 36}{2} = 666$ .

Полученные значения представим в виде матрицы с использованием программы MS Excel, где и произведем дальнейшие расчеты.

В отличие от исследования, выполненного для дорожной сети Монголии [Gankhuyag et al., 2021], авторами рассчитан индекс объезда не для отдельных ребер графа, а непосредственно для маршрутов между населенными пунктами. Это очень важное изменение, поскольку сами по себе дорожные участки могут иметь достаточно высокий индекс объезда, а их последовательность от пункта отправления до пункта назначения — плохо справляться с преодолением расстояния, образуя дуги с большими значениями кривизны (рис. 1).

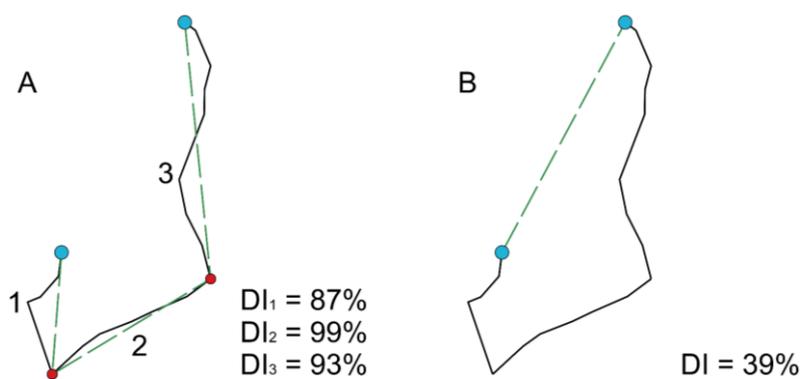


Рис. 1. Разница в методах вычисления индекса объезда  
Fig. 1. Difference between methods of detour index calculation

Другим важным дополнением, связанным с предыдущим, становится суммирование и усреднение по строке или столбцу (что равнозначно) индексов объезда для каждого

<sup>1</sup> Росстат. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям. Электронный ресурс: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата обращения 21.03.2024)

населенного пункта. Таким образом, средний индекс объезда, рассчитываемый для населенных пунктов, показывает пространственную эффективность маршрутов от данного населенного пункта до всех других в преодолении расстояния.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При построении графа транспортной системы Республики Мордовия было установлено, что некоторые кратчайшие маршруты между населенными пунктами проходят через Нижегородскую область (рис. 2). Полученный граф выходит за пределы административных границ Республики Мордовия; это говорит о том, что самоорганизация сети происходит независимо от границ региона, формируется функциональная дорожная сеть по кратчайшим маршрутам [Крылов, 2007, с. 51; Тархов, 2018]. И хотя экономический фактор взаимодействия не доказан данным исследованием в полной мере, с пространственной точки зрения можно говорить, что такие населенные пункты Нижегородской области, как Вознесенское, Дивеево, Первомайск, Лукоянов, Починки и Большое Болдино (а также и другие населенные пункты вдоль дорог, не указанные на карте), могут быть отнесены к расширенной региональной транспортной сети (РТС) Мордовии.



Рис. 2. Граф расширенной региональной транспортной сети Республики Мордовии  
Fig. 2. Graph of the Republic of Mordovia expanded regional transport network

Примечательно, что находящийся внутри расширенной РТС крупный населенный пункт Саров и проходящие через него автодороги не используются в кратчайших маршрутах между рассматриваемыми населенными пунктами Мордовии. Это же справедливо и для участка трассы Р-158 от Лямбиров до Починков. Такие «островки» незадействованных дорог говорят об их не востребуемости исключительно для рассматриваемой выборки и региональной системы Мордовии. В связи с этим может быть выдвинута следующая гипотеза: если автодороги не задействованы при анализе региональных систем двух субъектов в отдельности, но задействованы при совместном анализе регионов, это

говорит о связующем, межрегиональном характере рассматриваемых автодорог. Если же ни на каких других уровнях дороги не используются в кратчайших маршрутах, имеет место факт их невостребованности.

Дорога через Лукоянов используется в маршрутах «Ельники–Кемля», «Ельники–Ичалки», «Ельники–Большое Игнатово», «Темников–Большое Игнатово», «Теньгушево–Ардатов», «Теньгушево–Тургенево», «Теньгушево–Большое Игнатово», «Теньгушево–Кемля», «Теньгушево–Ичалки».

В ходе рассмотрения рисунков транспортных сетей районов Мордовии и граничащих с ними районов Нижегородской области было замечено, что административные границы как субъектов федерации, так и муниципальных районов могут выступать в роли барьера при развитии транспортной сети. Безусловно, если речь идет о государственной границе между двумя странами, такой барьер будет более чем обусловлен. Обычно его прерывают лишь отдельные магистрали, проходящие через макрорегион или континент. Барьер менее заметен, если речь идет о странах, которые ранее были частью одного государства; он также может сглаживаться со временем, если между странами развиваются добрососедские отношения, чему способствует нахождение в политическом или экономическом союзе (Европейский Союз).

Наличие же искусственных барьеров между транспортными системами на уровне муниципалитетов и регионов говорит о малом их взаимодействии в рамках единой страны. Среди возможных причин этого явления можно выявить как экономическую несамостоятельность рассматриваемых субъектов и зависимость от федеральных средств, так и отсутствие необходимой правовой и юридической базы, регламентирующей совместные транспортные проекты. Поднятие и решение данной проблемы может стать ключевым фактором в дальнейшем развитии транспортной системы Российской Федерации.

Авторами рассчитано пять матриц размерности  $37 \times 37$ :

- $L$  — кратчайшие расстояния между населенными пунктами по дорогам, км;
- $D$  — расстояния по прямой, км;
- $A(G)$  — географическая доступность;
- $A(P)$  — потенциальная доступность;
- $DI$  — индекс объезда.

Из матрицы  $A(G)$  путем суммирования по строке или столбцу (что равнозначно) были получены показатели географической доступности, из матрицы  $A(P)$  — излучательности ( $Emiss$ ) путем суммирования по строке и притягательности ( $Attract$ ) путем суммирования по столбцу, а из матрицы  $DI$  — средний индекс объезда  $\overline{DI}$  путем суммирования и усреднения по строке или столбцу (что равнозначно). Показатели приведены в табл. 1; для наглядности использована цветовая шкала от зеленого (наилучшие значения) до красного (наихудшие).

Табл. 1. Показатели транспортной доступности для населенных пунктов Республики Мордовии

Table 1. Indicators of transport accessibility for settlements of Republic of Mordovia

Нас. пункт	Население (чел.)	A(G)	Emiss	Attract	$\overline{DI}$
Саранск	314 871	82	658317	322374	0,83
Рузаевка	42 989	90	82676	59972	0,79
Ковылкино	19 793	116	26883	25477	0,79
Комсомольский	11 255	111	18608	21642	0,79

Нас. пункт	Население (чел.)	A(G)	Emiss	Attract	DI
Зубова Поляна	10 996	173	15759	15029	0,77
Чамзинка	9 464	109	15706	20570	0,78
Ромоданово	9 139	96	14781	23418	0,75
Торбеево	8 970	146	11985	13417	0,78
Краснослободск	8 910	118	12183	14440	0,78
Ардатов	8 857	159	12471	13964	0,77
Луховка	8 812	85	16903	49416	0,81
Лямбирь	8 346	89	14437	33884	0,74
Инсар	7 920	110	11122	15270	0,81
Темников	6 451	157	8311	10316	0,75
Ялга	6 204	85	12757	45056	0,81
Большие Березники	6 077	118	8662	14594	0,80
Атяшево	6 046	130	8642	12874	0,80
Явас	5 849	175	7512	9395	0,73
Ельники	5 247	143	6773	9609	0,67
Старое Шайгово	4 818	97	6856	13249	0,76
Тургенево	4 453	165	6196	9873	0,76
Кемля	4 358	120	7424	12788	0,72
Атемар	4 245	91	7182	26412	0,77
Большая Елховка	4 009	90	6887	26266	0,75
Кадошкино	3 960	111	5581	11534	0,72
Атюрьево	3 920	136	5266	8725	0,77
Теньгушево	3 731	192	4573	6811	0,76
Николаевка	3 725	84	7943	56501	0,81
Потьма	3 681	178	5150	8258	0,72
Татарская Пишля	3 326	92	6273	31995	0,77
Дубёнки	3 307	133	4589	9810	0,83
Белозерье	3 078	95	5078	18819	0,73
Кочкурово	3 004	103	4634	18507	0,76
Большое Игнатово	2 842	150	3701	7857	0,76
Ичалки	2 665	118	4567	11891	0,73
Берсеневка	2 553	84	4828	47793	0,78
Умёт	2 461	183	3326	6733	0,75

Полученные данные были отображены на картах (рис. 3–5) способом градуированных символов (классификация выполнена методом естественных границ).

Поскольку географическая доступность учитывает исключительно пространственные характеристики, она будет выше в местах большой концентрации населенных пунктов, что обычно соответствует расположению крупного города (рис. 3). В Мордовии выделяется городской округ Саранск — он и становится единственным центром притяжения, по аналогии с гравитационными моделями. Географическая доступность ухудшается по мере отдаления от Саранска; пропорционально с этим увеличиваются и расстояния между населенными пунктами. Поверхность, отображающую изменение географической доступности, можно интерполировать полиномом второй или третьей степени.

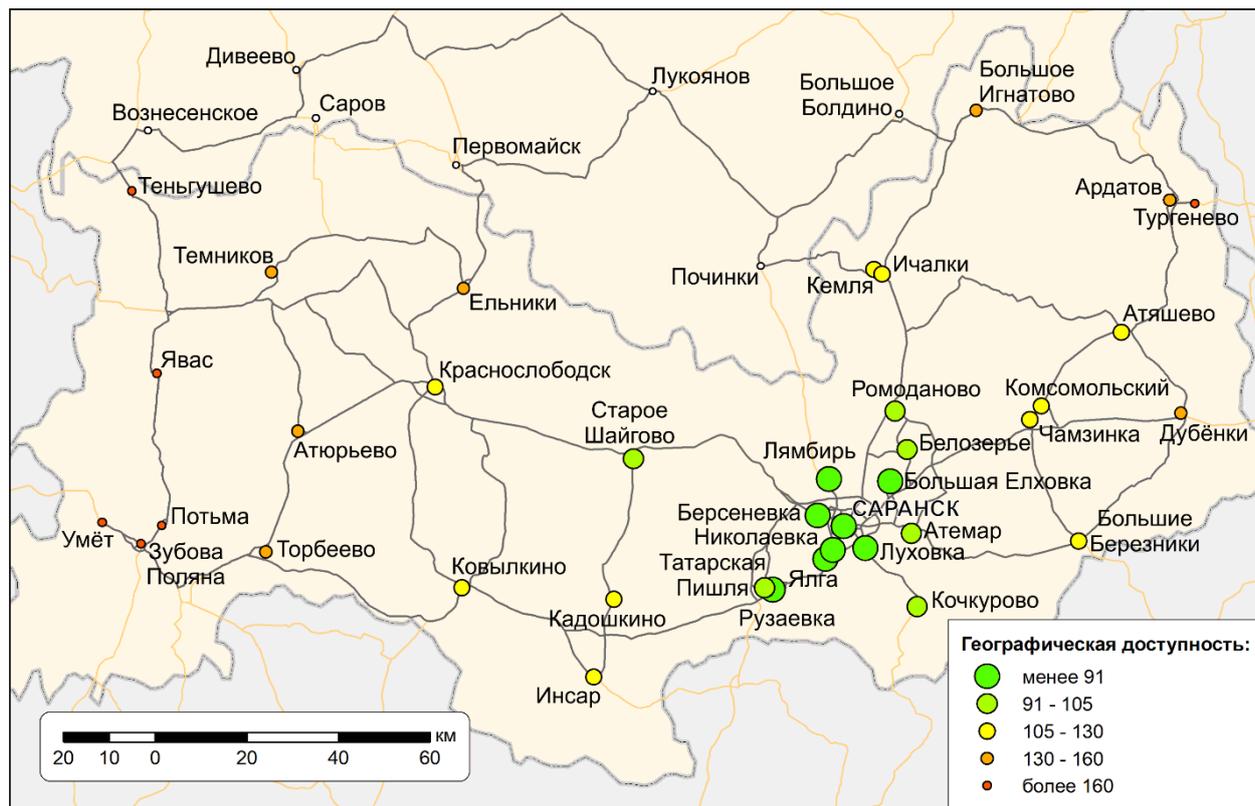


Рис. 3. Географическая доступность населенных пунктов Республики Мордовия  
 Fig. 3. Geographic accessibility of settlements of Republic of Mordovia

Потенциальную доступность характеризуют два показателя — излучательность и притягательность (рис. 4). Здесь закономерности с пространственным положением уже не столь очевидны. Излучательность в большей степени, чем притягательность, зависит от численности населения, однако не идентична ей. Населенные пункты, такие как Кемля или Николаевка, имеющие меньшее население в сравнении со Старым Шайговым или Ельниками, будут иметь лучшие показатели излучательности из-за близости к другим населенным пунктам, независимо от размера последних. Притягательность же в большей степени зависит от близости к другим населенным пунктам. Не считая Саранска, самые высокие показатели притягательности демонстрируют сплошь пригородные населенные пункты и спутники — Рузаевка (имеющая свой пригород — Татарскую Пишлю), Николаевка, Луховка, Берсенежка, Ялга, Лямбиров, Атемар, Большая Елховка.

При расчете матрицы  $A(P)$  существует возможность не учитывать потенциалы перемещения внутри населенных пунктов. Для этого элементам матрицы по главной диагонали нужно присвоить значение 0. Особый интерес при таком расчете представляют значения внешней притягательности ( $Attract_2$ , см. табл. 2): самые высокие значения будут соответствовать спутникам или населенным пунктам, имеющим потенциал спутника (Николаевка, Берсенежка, Луховка), в середине списка расположатся потенциальные (Кадошкино, Атяшево) и реальные (Саранск) центры притяжения, а самые низкие значения будут у отдаленных населенных пунктов, не имеющих ни потенциала центра притяжения, ни потенциала спутника (Теньгушево, Явас, Темников).



Рис. 4. Потенциальная доступность населенных пунктов Республики Мордовия  
Fig. 4. Potential accessibility of settlements of Republic of Mordovia

Табл. 2. Значения внешней притягательности населенных пунктов  
Table 2. Values of external attractiveness of settlements

Нас. пункт	Attract <sub>2</sub>	Нас. пункт	Attract <sub>2</sub>	Нас. пункт	Attract <sub>2</sub>
Николаевка	52776	Комсомольский	10387	Ардатов	5107
Берсеневка	45240	Ичалки	9226	Большое Игнатово	5015
Луховка	40604	Большие Березники	8517	Атюрьево	4805
Ялга	38852	Старое Шайгово	8431	Потья	4577
Татарская Пишля	28669	Кемля	8430	Торбеево	4447
Лямбирь	25538	Кадошкино	7574	Ельники	4362
Большая Елховка	22257	Саранск	7503	Умёт	4272
Атемар	22167	Инсар	7350	Зубова Поляна	4033
Рузаевка	16983	Атяшево	6828	Темников	3865
Белозерье	15741	Дубёнки	6503	Явас	3546
Кочкурово	15503	Ковылкино	5684	Теньгушево	3080
Ромоданово	14279	Краснослободск	5530		
Чамзинка	11106	Тургенево	5420		

В табл. 3 показан фрагмент матрицы  $DI$  (индекс объезда). В зависимости от кривизны маршрута он варьируется от наилучшего значения 95 % (Атяшево–Комсомольский) до наихудшего 39,4 % (Белозерье–Большая Елховка). 6 маршрутов из 666 имеют индекс объезда менее 50 %, 27 маршрутов — менее 60 %, 142 маршрута — менее 70 %.

Индекс объезда практически не зависит от местоположения, поскольку он учитывает степень отклонения маршрута от прямой линии. С географической точки зрения о неэффективности дорог говорит относительно ровный рельеф республики, отсутствие препятствий в виде гор и крупных внутренних водоемов, при которых типичны низкие значения индекса объезда. К значительным препятствиям на территории Мордовии можно отнести лишь массивы леса, способные в перспективе увеличить расходы на строительство новых дорог.

Табл. 3. Фрагмент матрицы DI (индекс объезда)<sup>1</sup>  
Table 3. Part of DI (Detour Index) matrix

	SAR	RUZ	KOV	KOM		BIG	ICH	BER	UME	$\bar{DI}$
SAR		83,5 %	84,4 %	90,3 %		92,0 %	91,6 %	76,5 %	80,9 %	83,2 %
RUZ	83,5 %		90,4 %	87,9 %		85,2 %	82,3 %	65,5 %	84,1 %	79,3 %
KOV	84,4 %	90,4 %		85,0 %		74,5 %	70,3 %	78,4 %	78,3 %	78,8 %
KOM	90,3 %	87,9 %	85,0 %			55,8 %	55,2 %	86,4 %	78,9 %	79,0 %
BIG	92,0 %	85,2 %	74,5 %	55,8 %			94,2 %	86,8 %	69,2 %	76,4 %
ICH	91,6 %	82,3 %	70,3 %	55,2 %		94,2 %		81,8 %	67,7 %	72,8 %
BER	76,5 %	65,5 %	78,4 %	86,4 %		86,8 %	81,8 %		77,3 %	78,4 %
UME	80,9 %	84,1 %	78,3 %	78,9 %		69,2 %	67,7 %	77,3 %		75,5 %
$\bar{DI}$	83,2 %	79,3 %	78,8 %	79,0 %		76,4 %	72,8 %	78,4 %	75,5 %	76,8 %



Рис. 5. Средний индекс объезда населенных пунктов Республики Мордовии  
Fig. 5. Mean detour index of settlements of Republic of Mordovia

<sup>1</sup> Расшифровка индексов: SAR — г. Саранск, RUZ — г. Рузаевка, KOV — г. Ковылкино, KOM — пгт Комсомольский, BIG — с. Большое Игнатово, ICH — с. Ичалки, BER — с. Берсеневка, UME — пгт Умёт

Для более точных выводов и сравнительного анализа необходимы данные, полученные по такой же методике для транспортных систем со схожими и отличными от Мордовии условиями и конфигурациями. Рассчитанные показатели позволяют выявить населенные пункты с наименьшей транспортной доступностью. В целях ее повышения могут быть разработаны проекты новых автодорог.

На рис. 6 показано одно из возможных решений для повышения эффективности РТС Мордовии, задачей которого является достижение минимального значения индекса объезда — 60 % и более для каждого маршрута. Все проектируемые дороги позволят увеличить транспортную доступность между населенными пунктами Республики Мордовии. Кроме того, прямые сообщения «Ельники–Починки» и «Теньгушево–Темников» будут способствовать тому, что ряд автодорог Нижегородской области будет «выключен» из расширенной транспортной системы Республики Мордовии, сдвинув ее ближе к административным границам и улучшив сообщение между северо-западными и северо-восточными районами республики. При предлагаемой конфигурации сети в кратчайшие маршруты также включится участок «Лямбировь–Починки».

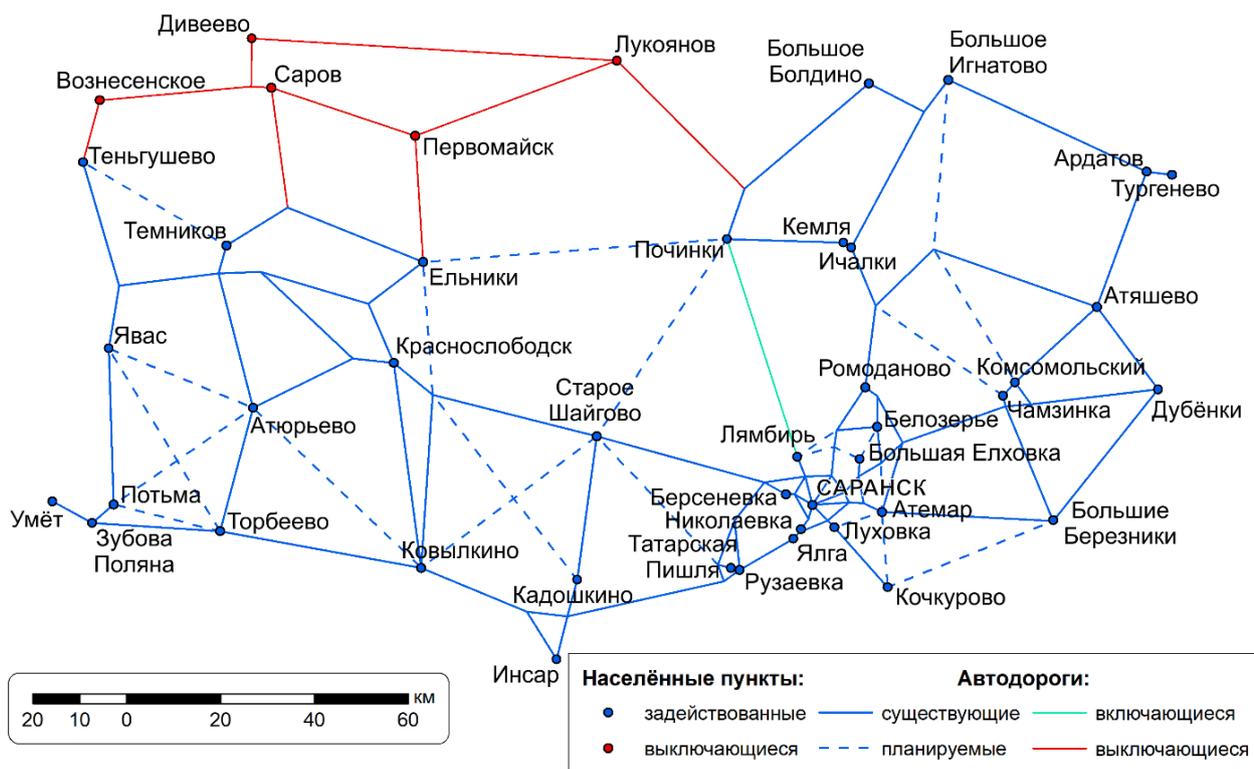


Рис. 6. Проект предлагаемых дорог для повышения эффективности региональной транспортной системы Республики Мордовии  
Fig. 6. Project of proposed roads for regional transport system of the Republic of Mordovia efficiency improvement

По расчетам авторов, при условии, что длина прямого сообщения «Ельники–Починки» будет равна 78 км, а «Теньгушево–Темников» — 50 км, показатели некоторых других маршрутов улучшатся, как показано в табл. 4. Косвенным положительным эффектом от строительства станет также улучшение показателей для маршрутов, имеющих

индекс объезда более 60 % и не рассматриваемых как проблемные в рамках предлагаемого плана.

Табл. 4. Изменение протяженности и индекса объезда некоторых маршрутов  
Table 4. Changes in length and detour indexes of some routes

Маршрут	Новая длина, км	Старая длина, км	Новый DI	Старый DI
«Ельники–Кемля (Ичалки)»	109	173	0,82	0,52
«Ельники–Большое Игнатово»	150	188	0,78	0,63
«Теньгушево–Темников»	50	61	0,70	0,57
«Теньгушево–Кемля (Ичалки)»	218	250	0,74	0,65
«Теньгушево–Большое Игнатово»	260	267	0,72	0,69
«Теньгушево–Тургенево»	322	330	0,72	0,70
«Темников–Большое Игнатово»	213	261	0,74	0,60

Подобные косвенные эффекты в очередной раз подтверждают, что любое изменение конфигурации транспортной сети, такое как добавление или исключение сегмента дороги затронет всю систему, поскольку один сегмент может использоваться более чем в одном маршруте. Благодаря этому свойству транспортных сетей, а также близости нахождения некоторых населенных пунктов (либо расположению на одной линии) возможны комплексные решения, когда для улучшения  $n$  проблемных маршрутов необходимо  $m$  дорог, причем  $m \leq n$ . В предлагаемом плане (рис. 6) для улучшения 27 проблемных маршрутов со значением индекса объезда менее 60 % было предложено всего 20 новых дорог.

Если на плане две и более планируемые дороги пересекаются (например, «Явас–Торбеево» и «Потьма–Атюрьево», рис. 6), пересечение можно запланировать в конкретном населенном пункте, что однозначно улучшит его доступность и потенциально даст толчок к экономическому развитию. То же самое касается и населенных пунктов, находящихся в зоне планируемой дороги.

Поскольку любое изменение в конфигурации сети влияет на показатели географической и потенциальной доступности, а также индекса объезда, на этапе поиска оптимального решения важно производить пересчет этих показателей после каждого добавления нового ребра в граф. Число вычислений при добавлении нового элемента графа растет в геометрической прогрессии, но эта проблема решается благодаря использованию ГИС и возможности написания алгоритмов автоматизации расчетов и вывода данных в табличной форме.

Постановка итоговой цели проекта может осуществляться несколькими способами, в зависимости от целевого либо ограничивающего фактора. Такими факторами могут быть:

- 1) средний индекс объезда для всех населенных пунктов (ребра добавляются до тех пор, пока не будет достигнуто целевое значение);
- 2) минимальное значение индекса объезда для каждого маршрута (ребра добавляются до тех пор, пока все маршруты не будут иметь целевое значение или выше);
- 3) предельная протяженность новых дорог, в соответствии с выделенным бюджетом (необходимо учитывать запас, с поправкой на кривизну дороги).

Первые два показателя являются целевыми для улучшения транспортной доступности, а предельная протяженность — ограничивающим фактором. Алгоритм для целевых показателей выглядит следующим образом:

- 1) поиск маршрута с наихудшим значением индекса объезда;
  - 2) добавление нового ребра в граф, улучшающего индекс объезда для рассматриваемых пунктов (в приоритете — примыкающего к существующей дорожной сети или проходящей через населенный пункт);
  - 3) пересчет индексов объезда;
  - 4) проверка выполнения условия;
    - 4.1) если условие не выполнено — возврат к шагу 1;
    - 4.2) если выполнено — конец алгоритма.
- Для ограничивающего фактора в алгоритме изменяются шаги, начиная с 4:
- 4) проверка превышения лимита протяженности нового дорожного полотна;
    - 4.1) если лимит превышен — удаление последнего добавленного ребра, пересчет индексов, возврат к шагу 1, с переходом на последующее наихудшее значение;
    - 4.2) если лимит не превышен — возврат к шагу 1;
    - 4.3) если невозможно добавить ни одно новое ребро, не превысив лимит (проверены все маршруты) — конец алгоритма.

Одним из возможных решений может стать реализация не полностью автоматического, а автоматизированного алгоритма, выполняемого с активным участием оператора, чья задача заключается в добавлении (оцифровке) новых дорог. Может быть реализован и вариант, когда оператор оцифровывает сразу несколько дорог, а алгоритм выбирает ту из них, которая окажет наибольшее положительное влияние на транспортную сеть. Степень такого влияния может быть рассчитана как сумма изменений по модулю показателей в матрице географической или потенциальной доступности, либо в матрице индекса объезда.

## **ВЫВОДЫ**

По результатам исследования можно констатировать, что показатели географической доступности, потенциальной доступности (излучательности и притягательности) и индекса объезда могут быть использованы для оценки конфигурации транспортной сети, ее способности преодолевать расстояния и эффективно связывать населенные пункты исследуемой территории. В то время как географическая доступность зависит лишь от концентрации населенных пунктов (с учетом реальных расстояний по дорожной сети), потенциальная доступность является более комплексным показателем, учитывающим значимость населенных пунктов, которая может выражаться не только в численности населения, но и в других показателях.

Преимущество предлагаемого авторами метода расчета транспортной доступности населенных пунктов в сравнении с классическими методами заключается в учете конфигурации транспортной сети и обнаружении ее проблемных элементов для совокупности всех маршрутов между населенными пунктами. Принципы построения графа (главным образом, выбор вершин) можно модифицировать в зависимости от решаемой задачи и масштаба, на котором планируется поиск проблем транспортной сети, что говорит об универсальности метода.

Граф транспортной системы, построенный в ГИС, можно расширять как интенсивно (добавлением новых населенных пунктов и связывающих их путей сообщения на имеющуюся территорию), так и экстенсивно (продолжая граф на территории соседних субъектов). Информационную систему, включающую в себя элементы графа, можно насыщать новыми показателями и весами, дающими все более полное и комплексное представление о транспортной системе. В частности, могут быть учтены классы дорог и их

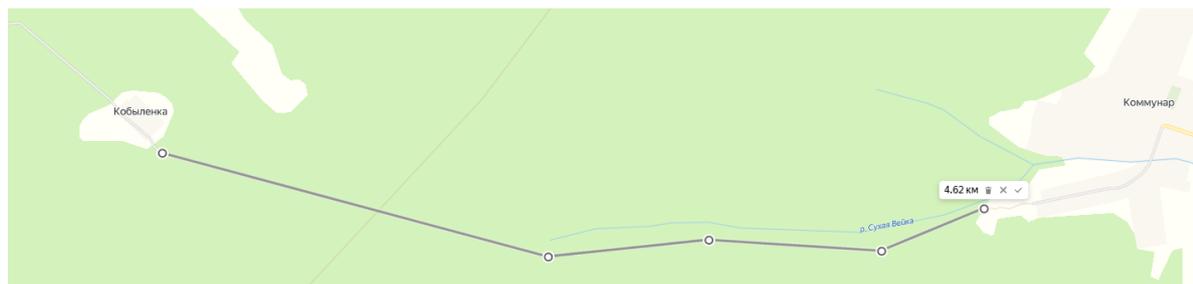
текущий износ, выраженные понижающимся коэффициентом, представляющим собой градиент от 1 (для дорог самого высокого качества, не требующих ремонта) до 0 (для дорог, непригодных в эксплуатации). При использовании такого коэффициента отдельные маршруты могут только ухудшить свои показатели, но не наоборот.

Если рассчитывать участки дорог с минимальной протяженностью между многими пунктами, становится возможным ликвидировать т. н. коммуникационную периферию посредством добавления новых ребер в сеть. Пути повышения доступности, в зависимости от преобладающего фактора, также будут различаться: если низкий индекс объезда обусловлен качеством дороги — необходимо усовершенствовать покрытие, если же он обусловлен самой конфигурацией сети — необходимо построить новый сегмент, сокращающий расстояние между населенными пунктами.

На основании выявленных проблем в транспортной системе Мордовии возможна разработка конкретных планов по повышению транспортной доступности и эффективности РТС, основанных на проектировании новых дорог.

Предложенный проект транспортной сети, направленный на повышение эффективности функционирования транспортной системы Республики Мордовия, не является итоговым решением и требует оптимизации с привлечением дополнительных данных. В дальнейшем исследовании необходимо учесть следующее:

- 1) Окупаемость проекта — исчисляется с помощью оценки возможной прибыли при перевозке пассажиров и грузов с учетом конфигурации сети, а также уменьшения издержек.
- 2) Уровень спроса — насколько часто будет использоваться дорога по сравнению с уже существующими маршрутами.
- 3) Возможность покрытия планируемого маршрута другими видами транспорта, их эффективность и доступность для населения (стоимость поездки).
- 4) Затраты на новое дорожное полотно — для обеспечения одних дорожных соединений достаточно проложить 4,6 км новой дороги (как в случае с сообщением «Ельники–Починки», рис. 7), для других — улучшить существующее покрытие (на участке «Теньгушево–Темников»), для третьих — необходимо строительство дороги с нуля.
- 5) «Трение расстояния» — включает в себя все препятствия, увеличивающие затраты на строительство и обслуживание дороги: перепады высот, наличие крупных внутренних водоемов и т. п. С использованием цифровой модели рельефа в ГИС и специализированного алгоритма может быть рассмотрен целый спектр возможных проектов строительства, расположенный между двумя радикально различающимися решениями: минимизацией затрат и максимизацией эффективности. Под эффективностью может пониматься как минимизация индекса объезда, так и охват наибольшего числа промежуточных населенных пунктов. В зависимости от доступных ресурсов, поверхности и приоритетных целей проекта в итоге будет выбран наиболее оптимальный вариант.
- 6) Степень влияния строительства новой дороги на функциональность транспортной сети. Учитывается как положительное влияние (повышение транспортной доступности населенных пунктов вдоль маршрута, создание новых рабочих мест для обслуживания дорожного полотна, постройка автозаправочных станций, гостиниц и кафе для удовлетворения нужд проезжающих пассажиров), так и отрицательное (шумовое загрязнение, автомобильные выхлопы и даже нарушение эстетического образа местности [Семина, Фоломейкина, 2003]).



*Рис. 7. Предполагаемый участок дорожной сети (с. Кобыленка–с. Коммунар Починковского района), способный обеспечить прямое сообщение «Ельники–Починки»*  
*Fig. 7. Proposed road segment (between villages Kobylenka and Kommunar in the Pochinkovsky district), which could provide a direct connection “Elniki–Pochinki”*

Для полного учета в модели всех необходимых факторов необходимы данные, получение которых может быть затруднительно. Идеальным вариантом стало бы наличие данных об уровне трафика, содержащих информацию о пункте направления, пункте назначения и количестве поездок за период времени (г.). Возможным решением может стать проведение опроса населения с целью выявления наиболее востребованных маршрутов.

Интерпретация полученных результатов в категориальной шкале осложнена отсутствием сопоставимых расчетов показателей для других субъектов Российской Федерации. Тем не менее, классификация полученных значений методом естественных границ однозначно позволяет выделить лидеров и аутсайдеров по каждому показателю, выявить слабые места региональной транспортной системы, которые необходимо учитывать при последующих инвестициях в инфраструктуру и территориальном планировании. Полученные показатели транспортной доступности могут быть использованы при расчете рентабельности транспортных проектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бугроменко В. Н. Транспортная доступность, ТПП и нерешенные проблемы транспортной географии. Географическое положение и территориальные структуры. Сборник научных трудов: Памяти И. М. Маергойза. М.: Новый хронограф, 2012. С. 403–420.
- Крылов П. М. Типологии региональных транспортных систем России. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. М., 2007. 199 с.
- Савруков А. Н., Савруков Н. Т. Методика расчета индекса и оценка транспортной доступности субъектов РФ. Финансы и кредит, 2020. Т. 26. № 11. DOI: 10.24891/fo.26.11.2410. Электронный ресурс: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44264207> (дата обращения 05.03.2024)
- Семина И. А., Фоломейкина Л. Н. Воздействие автомобильного транспорта на окружающую среду (на примере Республики Мордовия). Экологические системы и приборы, 2003. № 7. С. 25–28.
- Семина И. А., Фоломейкина Л. Н. Пространственный анализ в региональном исследовании транспорта с использованием ГИС-технологий. Географический вестник, 2009. № 2. С. 58–67.
- Тархов С. А. Транспортная освоенность территории. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2018. № 2. С. 3–9.

*Gankhuyag U., Myagmarsuren A., Altankhuyag B.* Spatial Analysis of Road Network in Mongolia. *Advances in Engineering Research*, 2021. V. 206. P. 146–151. DOI: 10.2991/aer.k.211029.026

*Rodrigue J. P., Comtois C., Slack B.* The geography of transport systems. 3rd edition. Routledge, 2013. 413 p.

#### REFERENCES

*Bugromenko V. N.* Transport accessibility, TGL and unsolved problems of transport geography. Geographical location and territorial structures. Collection of scientific papers: In memory of I. M. Maergoyz. Moscow: New Chronograph, 2012. P. 403–420 (in Russian).

*Gankhuyag U., Myagmarsuren A., Altankhuyag B.* Spatial Analysis of Road Network in Mongolia. *Advances in Engineering Research*, 2021. V. 206. P. 146–151. DOI: 10.2991/aer.k.211029.026

*Krylov P. M.* Typologies of regional transport systems in Russia. Dissertation for the scientific degree of PhD in Geography. Moscow, 2007. 199 p. (in Russian).

*Rodrigue J. P., Comtois C., Slack B.* The geography of transport systems. 3rd edition. Routledge, 2013. 413 p.

*Savrukov A. N., Savrukov N. T.* A methodology for computing and assessing the transport accessibility index: the Russian Federation subjects case study. *Finance & Credit*, 2020. V. 26. No. 11. DOI: 10.24891/fc.26.11.2410. Web resource: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44264207> (accessed 05.03.2024) (in Russian).

*Semina I. A., Folomeikina L. N.* Impact of automobile transportation on the environment (by the example of the Republic of Mordovia). *Ecological Systems and Devices*, 2003. No. 7. P. 25–28 (in Russian).

*Semina I. A., Folomeikina L. N.* Spatial analysis in regional exploration of transport by using GIS-technologies. *Geographical Bulletin*, 2009. No. 2. P. 58–67 (in Russian).

*Tarkhov S. A.* Transportation development of territories. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geografiya (Lomonosov Geography Journal. Series 5. Geography)*, 2018. No. 2. P. 3–9 (in Russian).