



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 169–177

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 169–177

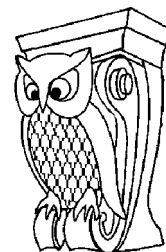
<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-169-177>, EDN: LFLOYL

Научная статья

УДК 911.37(470.44):004

Топологический подход к анализу компактности и связности систем расселения с учетом ограничений на местности (на примере Саратовской области)



В. А. Данилов, В. А. Морозова[✉], Д. В. Папилин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Данилов Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, kohavi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

Морозова Валерия Андреевна, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, riukarin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

Папилин Дмитрий Вячеславович, магистрант географического факультета, dmitrypapilinv@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2401-5392>

Аннотация. В статье рассматриваются применение топологических концепций для анализа структуры и оценка компактности региональной системы расселения. Предложена методика, адаптирующая классические топологические инварианты к оценке реальных транспортно-планировочных сетей на основе данных OpenStreetMap с учётом физико-географических и законодательных ограничений. Вместо абстрактных индексов связности узлов графа системы расселения вводится новый операционный показатель «индекс выхода» – число физических, нетупиковых дорожных выездов из населенного пункта, который применяется для выявления уязвимостей в структуре расселения при анализе «разбивающих точек» (точек сочленения).

Предложенная методика апробирована на примере Саратовской области для анализа компактности и расчета новых оптимальных связей систем расселения, которая учитывала существующие данные о рельефе, систему особо охраняемых природных территориях и зоны с особыми условиями использования территорий.

Ключевые слова: системы расселения, компактность, топологический анализ, индекс выхода, разбивающая точка, связность сети, ООПТ, зоны с особыми условиями использования, Саратовская область

Для цитирования: Данилов В. А., Морозова В. А., Папилин Д. В. Топологический подход к анализу компактности и связности систем расселения с учетом ограничений на местности (на примере Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 169–177. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-169-177>, EDN: LFLOYL

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Topological approach to analyzing compactness and connectivity of settlement systems considering terrain constraints (case study of the Saratov Region)

V. A. Danilov, V. A. Morozova[✉], D. V. Papilin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Vladimir A. Danilov, kohavi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

Valeria A. Morozova, riukarin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

Dmitrii V. Papilin, dmitrypapilinv@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2401-5392>

Abstract. The article examines the application of topological concepts for analysing the structure and assessing the compactness of a regional settlement system. A methodology is proposed that adapts classical topological invariants to evaluate real transport-planning networks using OpenStreetMap data, taking into account physical-geographical and legislative constraints. Instead of abstract node connectivity indices in the settlement system graph, a new operational indicator – the “exit index” – is introduced. This index represents the number of physical, non-dead-end road exits from a settlement and is used to identify structural vulnerabilities by analysing “articulation points” (i.e., critical nodes whose removal would disconnect the network). The proposed methodology was tested on the case of Saratov Oblast to assess settlement compactness and calculate new optimal connections within the settlement system, incorporating existing data on terrain, specially protected natural areas, and zones with special conditions for land use.

Keywords: settlement systems, compactness, topological analysis, exit index, splitting point, network connectivity, specially protected natural areas, protected area, zones with special conditions for land use, Saratov Region



For citation: Danilov V. A., Morozova V. A., Papilin D. V. Topological approach to analyzing compactness and connectivity of settlement systems considering terrain constraints (case study of the Saratov Region). *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 169–177 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-3-169-177>, EDN: LFLOYL

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Изучение систем расселения является одной из ключевых задач градостроительной науки и практики. Понимание структуры, связности и компактности таких систем необходимо для эффективного территориального планирования, развития транспортной инфраструктуры и повышения качества жизни населения. Традиционно оценка компактности градостроительных структур опиралась на геометрические показатели формы или плотностные характеристики застройки [1]. Однако системы расселения представляют собой сложные многоядерные сетевые объекты, пространственно распределенные и связанные транспортными коридорами, что требует применения иных подходов.

Теоретические основы для анализа таких структур заложены в работах, использующих аппарат топологии – раздела геометрии, изучающего наиболее общие свойства пространства, не изменяющиеся при непрерывных деформациях [2, 3]. В частности, Г. В. Мазаевым [4] и Дж. Данцигом, Т. Саати [5] были предложены топологические инварианты, такие как «разбивающая точка» и «индекс точки», для характеристики компактности систем расселения. Разбивающая точка (точка сочленения графа) указывает на уязвимость системы: ее удаление приводит к увеличению числа компонент связности. Индекс точки (степень вершины в графе) характеризует локальную связность узла. Эти концепции позволяют отойти от чисто геометрического понимания компактности и перейти к анализу структурной целостности и связности сети.

Однако прямое применение этих инвариантов к реальным системам расселения сопряжено с трудностями. Во-первых, необходимо определить, что является «узлом» и «связью» в реальной сети. Во-вторых, абстрактный индекс точки может не полностью отражать транспортную доступность, которая зависит от характеристик дорожной сети. В-третьих, требуется методика, позволяющая идентифицировать не только существующие уязвимости, но и предлагать конкретные, практически реализуемые пути улучшения связности с учетом территориальных ограничений.

В предложенном исследовании приводится разработка и апробация прикладной методики анализа компактности и связности региональной системы расселения (на примере системы расселения Саратовской области), основанной на топологических принципах и учитывающей

сложившиеся в настоящее время ограничения прокладки новой дорожно-транспортной сети.

Методология исследования и исходные данные

Предлагаемая методология реализуется в несколько этапов и отличается от теоретических моделей комплексным анализом актуальных пространственных данных. Моделирование и анализ проводились с использованием геоинформационных систем (QGIS) и специализированных библиотек языка Python (geopandas, networkx, osmnx) для обработки пространственных данных и анализа графов.

Исходные данные

На первом этапе выполняется сбор и подготовка исходной информации. В качестве основы для моделирования использовались данные существующей дорожной сети картографического сервиса OpenStreetMap (OSM) [6]. Ограничивающие морфометрические характеристики строительства новой дорожной сети были рассчитаны по открытой глобальной цифровой модели рельефа FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), скорректированной по данным топографических карт [7]. Данная модель позволяет получить представление о поверхности Земли и использует алгоритмы машинного обучения для удаления артефактов высот зданий и древесной растительности. Разрешение FABDEM в 30 метров является оптимальным для регионального анализа.

Территориальные и законодательные ограничения

Важнейшим элементом методики является учет реальных ограничений, препятствующих дорожному строительству. Морфометрические ограничения (крутые склоны) были дополнены двумя ключевыми группами законодательных ограничений.

1. Особо охраняемые природные территории (ООПТ) – это участки, имеющие особое природоохранное, научное, культурное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение, которые изъяты из хозяйственного использования и для которых установлен режим особой охраны [8–10]. Согласно Федеральному закону № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях», на землях заповедников, национальных и природных парков «запрещается любая деятельность, не связанная с сохранением и изучением природных комплексов» и противоречащая целям их создания. В частности, запрещается строительство магистральных дорог,



трубопроводов, линий электропередачи и других коммуникаций, не связанных с функционированием самих ООПТ (ст. 9, 15).

2. Зоны с особыми условиями использования территорий (ЗОУИТ) – это территории, в границах которых устанавливается особый правовой режим использования земельных участков, ограничивающий или запрещающий те виды деятельности, которые несовместимы с целями установления зон [9, 10]. К ним относятся, например, санитарно-защитные зоны промышленных предприятий, охранные зоны объектов электросетевого хозяйства, магистральных трубопроводов, зоны охраны объектов культурного наследия. Строительство в пределах таких зон строго регламентировано и зачастую невозможно.

Данные об ООПТ и ЗОУИТ были извлечены из открытых кадастровых данных ЕГРН (рис. 1) [8, 10]. Все тематические слои (рельеф, ООПТ, ЗОУИТ) были приведены к единой метрической системе координат (UTM Zone 38N для Саратовской области) и объединены в единый картографический слой «запретных зон», через который было запрещено моделирование новых связей.

Методология анализа

Ключевым элементом методологии является операционализация топологических понятий. Так, вместо абстрактного «индекса точки» [5] был введен показатель «индекс выхода», который отражает реальную транспортную интегрированность и рассчитывается для каждого населенного пункта как число уникальных физических дорог, пересекающих его границу и ведущих в общую нетупиковую сеть.

Завершающий этап анализа заключался в выявлении структурных слабостей сети расселения, который производился на основе расчета индекса выхода и последующего анализа существующих маршрутов. Для соседних населенных пунктов с низкой связностью или с неоптимальными путями сообщения на основе алгоритма генерировались потенциальные новые дорожные связи, каждая из которых проверялась на пересечение с «запретными зонами» с помощью оверлейного анализа в ГИС. Таким образом, в итоге были определены только те новые дорожные связи, которые оптимизируют структуру и не несут территориальных и законодательных ограничений.

Результаты и их обсуждение

Апробация предложенной методики на примере 1706 населенных пунктов Саратовской области позволила выявить многогранную картину состояния региональной транспортной сети связности и выработать обоснованные предложения по ее улучшению. Прежде всего, анализ территориальных ограничений выявил ряд

фундаментальных лимитирующих факторов региональной структуры расселения. Сложившиеся физико-географические (морфометрические) условия холмистого Правобережья (Приволжская возвышенность) сформировали существующую транспортную сеть, а законодательные ограничения зон ООПТ и ЗОУИТ, сконцентрированные преимущественно вдоль долины р. Волги и вокруг Саратовской агломерации. Все это сформировало дополнительные элементы «каркаса запретов» в дорожном проектировании наиболее освоенной части Саратовской области. Необходимо учесть, что склоны с уклоном более 5° (рис. 2) превышают значения максимально допустимых продольных уклонов для местных дорог, а также повышают риск аварий, износ дорожного покрытия и сложности обслуживания [11].

На фоне этих ограничений был проведен расчёт «индекса выхода» для каждого населенного пункта (рис. 3), и анализ связности выявил резкую пространственную гетерогенность транспортной доступности. Наблюдается сформированность ярко выраженной структуры «центр-периферия». Хорошо связанные кластеры с высоким индексом выхода (4 и более) образуют ядро вокруг Саратовской агломерации (Саратов, Энгельс) и вытягиваются вдоль основных транспортных осей – федеральных трасс Р-228 (на Волгоград и Сызрань), Р-158 (на Пензу) и А-298 (на восток).

В то же время обширные территории Заволжья, запад и север области характеризуются преобладанием населенных пунктов с низким индексом выхода (0, 1 или 2), что указывает на их изолированное «тупиковое» положение или роль транзитного пункта на линейном сегменте транспортной сети. Наиболее уязвимыми в этом отношении являются западные и северо-западные районы Правобережья (например, Аркадакский, Турковский, Ртищевский) и обширные юго-восточные районы Заволжья (Александрово-Гайский, Новоузенский), которые по сути являются транспортными тупиками. Это подтверждается и результатами моделирования: из 250 предложенных новых дорожных сегментов 148 (59.2%) общей протяженностью 1478.2 км приходятся именно на Заволжье, в то время как для более освоенного Правобережья предложено 52 сегмента (437.7 км). Все это ведет к ограничению социально-экономического потенциала таких территорий и повышает их общую уязвимость.

Итогом комплексного анализа на основе предложенной методологии стала разработка 250 конкретных предложений по строительству новых дорожных участков общей протяженностью 2317 км, направленных на оптимизацию связности системы расселения (рис. 4).

Предлагаемые новые связи (отражены красным цветом) решают одновременно две основные задачи: во-первых, это повышение связности периферии путём соединения изолированных

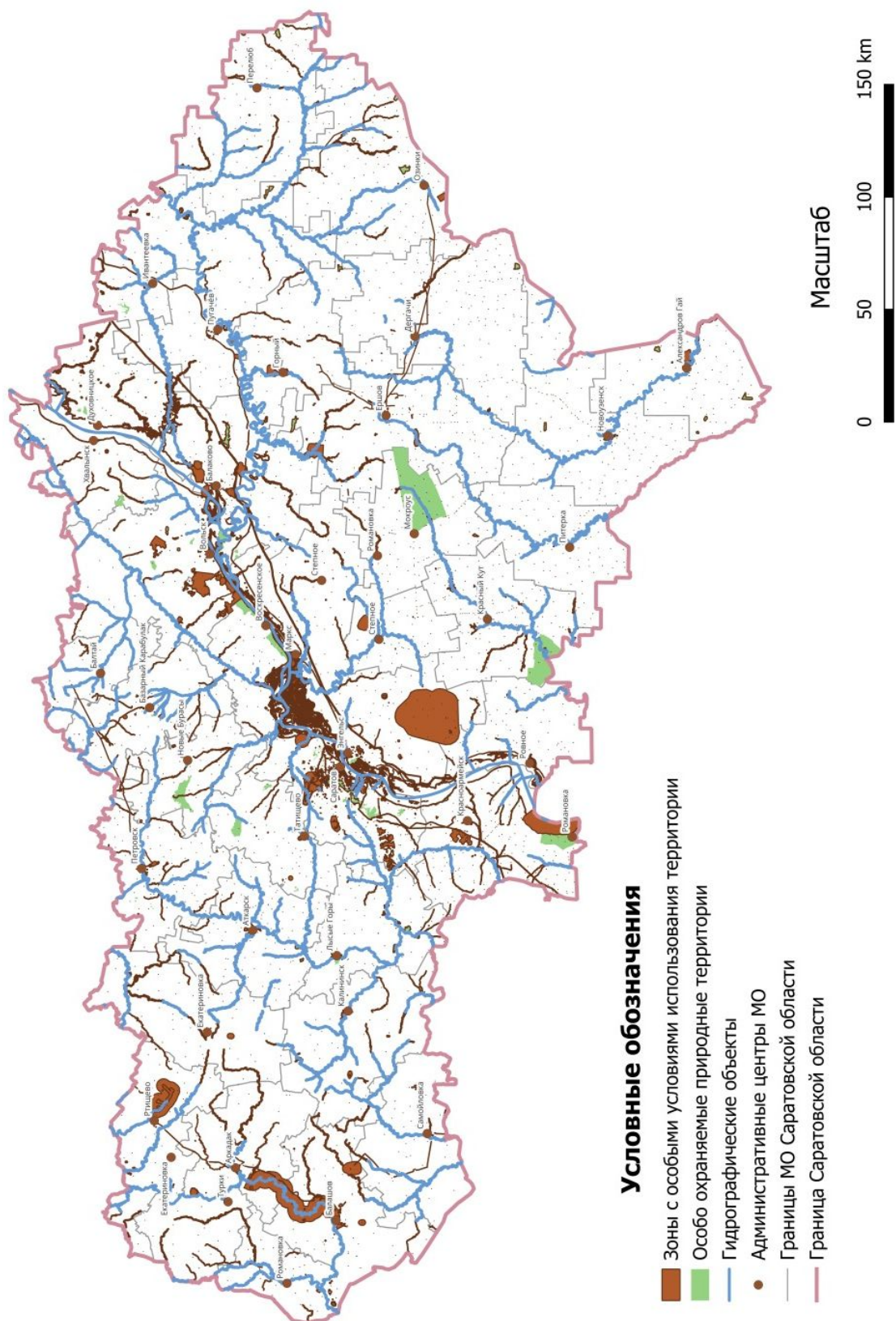


Рис. 1. «Запретные зоны» для моделирования дорожных связей Саратовской области с указанием границ муниципальных округов (МО) (цвет онлайн)

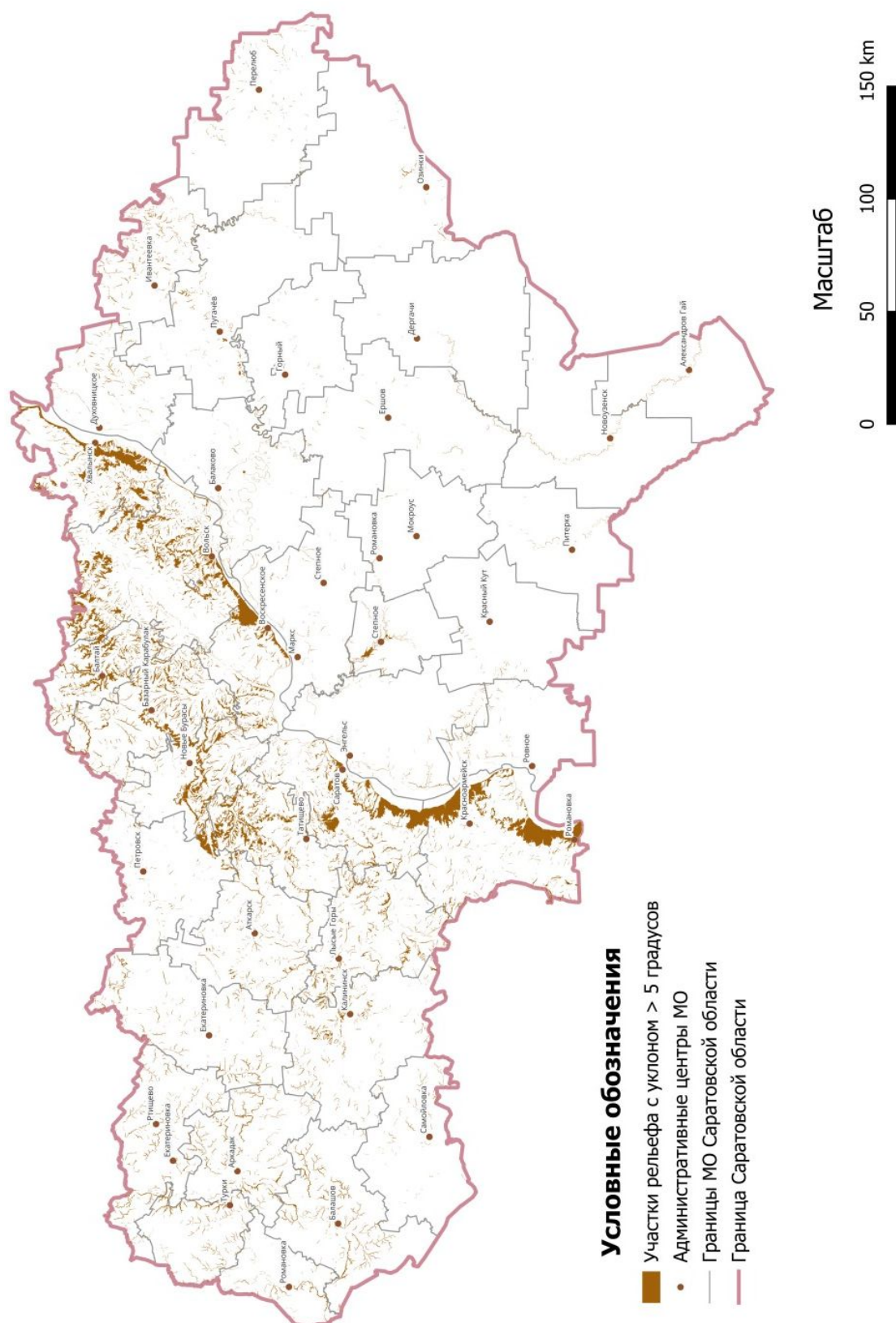


Рис. 2. Участки рельефа с уклоном более 5 градусов на территории Саратовской области с указанием границ МО (цвет онлайн)



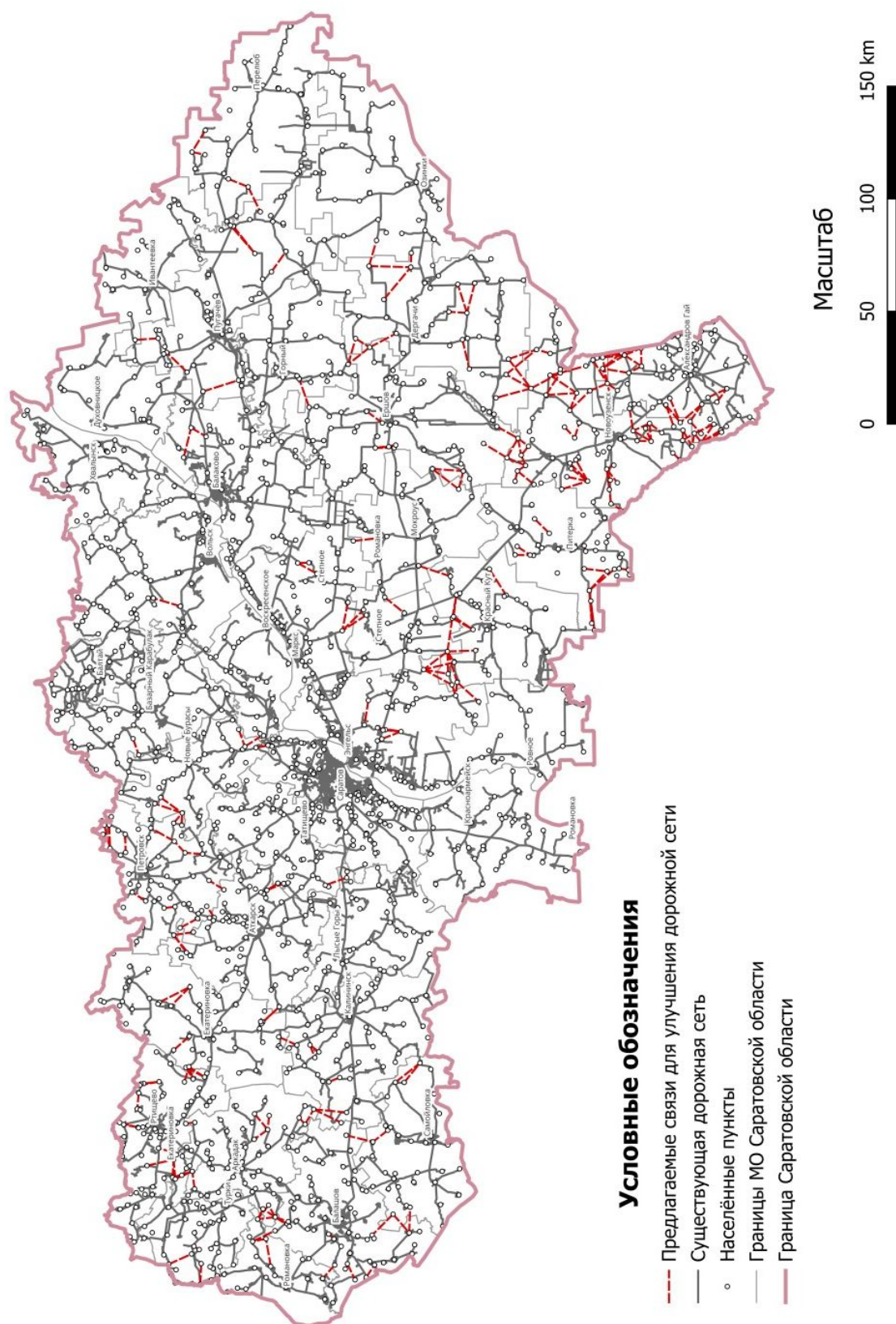


Рис. 4. Модель связи для улучшения дорожной сети на территории Саратовской области с указанием границ МО (цвет онлайн)



и тупиковых населённых пунктов с опорной дорожной сетью, что особенно актуально для юго-восточных и западных районов; во-вторых, это оптимизация существующей сети через создание спрямляющих участков и «хорд» между населёнными пунктами, сокращающих существующие длинные маршруты и повышающие общую эффективность транспортной системы в целом. Расчеты на базе алгоритма Дейкстры [12] показывают, что реализация этих предложений позволит сократить средний кратчайший путь между населёнными пунктами в регионе с 277.0 до 257.6 км, уменьшить число компонент связности дорожной сети с трех до двух и полностью устранить изолированные от сети населенные пункты. Важно подчеркнуть, что все предложенные участки были смоделированы с учётом комплекса территориальных и законодательных ограничений, что делает их практически применимыми для технико-экономического рассмотрения на различных стадиях территориального планирования.

Заключение

Предложенная методика позволяет провести комплексный и, что важно, практически ориентированный анализ структуры региональной системы расселения. Переход от абстрактных топологических понятий к операциональным показателям, таким как «индекс выхода» и учёт реальных физико-географических и юридических ограничений, даёт возможность не только диагностировать проблемы связности, но и формировать обоснованные предложения по их решению.

Апробация на примере 1706 населённых пунктов Саратовской области показала выраженную неоднородность транспортной доступности. Рассчитанный средний индекс выхода, равный 2.74, свидетельствует о структурных диспропорциях между хорошо связанным «ядром» и изолированной «периферией». Практическая значимость методики подтверждается детальным анализом «разбивающих точек» (точек сочленения). Исследование выявило 674 населенных пункта, являющихся такими точками, что указывает на значительную уязвимость региональной транспортной сети. Для оценки критичности каждой точки был введен показатель, отражающий количество новых изолированных сегментов сети, которые образуются при удалении данного узла. Анализ показал, что 10 населенных пунктов имеют максимальный показатель, равный 3. К этим наиболее уязвимым узлам относятся Покурлей, Барановка, Ивановка, Сапожок, Малая Тополевка, Чадаевка, Упоровка, Оркино, Кочетовка и Малые Озёрки. Нарушение транспортного сообщения через любой из этих пунктов приведет к распаду сети на три и более изолированные части, отрезая от основной сети целые группы поселений. Эти населенные пункты, функционирующие как единственные «мосты»

между крупными сегментами дорожной сети, представляют собой первоочередные объекты для мероприятий по повышению устойчивости инфраструктуры, например путем строительства дублирующих связей. Данные результаты могут служить объективной основой для дальнейших градостроительных проработок, направленных на повышение устойчивости и сбалансированности региональной системы расселения. Основной группой факторов, влияющих на распределение текущей дорожной сети, являются геоморфологические – в Заволжье преобладают эрозионно-расчлененные ландшафты, которые разрывают дорожную сеть. Для восстановления связности требуется больше коротких мостовых и путепроводных сооружений; историческое развитие транспортной сети имеет высокое значение, например, Правобережье исторически развивалось как промышленный и транспортный центр (Саратов, Энгельс), где дорожная сеть более развита. Заволжье же оставалось сельскохозяйственным регионом с менее плотной сетью дорог. Наконец, социально-экономические различия, которые выражаются в том, что население Заволжья испытывает большую потребность в социальной инфраструктуре, доступ к которой ограничен из-за плохой транспортной связи.

В итоге можно сделать вывод, что Правобережье ограничено законодательными запретами и исторически развитой сетью, поэтому новых узлов предложено не так много. Заволжье, в свою очередь, требует больше дорог из-за географических барьеров (овраги, долины), высокой доли изолированных поселков и относительно низких ограничений для строительства.

К ограничениям методики можно отнести ее зависимость от полноты и достоверности исходных картографических данных и необходимость верификации результатов экспертными оценками.

Дальнейшее развитие методики может включать интеграцию социально-экономических данных (например, численность населения, маятниковая миграция) для определения приоритета реализации предлагаемых дорожных связей, учет класса и пропускной способности дорог для оценки развития междугороднего сообщения, делимитации метрополитенских ареалов, оптимизации размещения площадок ТКО и т. п. [13–16].

Библиографический список

- Орлова Н. А., Орлов Д. Н., Маслова Е. А. Проблема компактного города провинциальной России XXI века // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9, № 1. С. 101–108. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2019.01.16>, EDN: XSLDRO
- Болтянский В. Г., Ефремович В. А. Очерк основных идей топологии // Математическое просвещение / под ред. Я. С. Дубнова, А. А. Ляпунова, А. И. Маркушевича. М. : ГИТТЛ, 1957. Вып. 2. С. 3–34.



3. Понтрягин Л. С. Непрерывные группы. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1973. 519 с.
4. Мазаев Г. В. Топологический подход к понятию компактности градостроительных структур // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов РААСН : в 2 т. М. : Изд-во АСВ, 2022. Т. 1. С. 249–257. EDN: GARVRZ
5. Данциг Дж., Саати Т. Компактный город: проект организации городской среды / пер. с англ. М. : Стройиздат, 1977. 199 с.
6. OpenStreetMap contributors. Planet maps. URL: <https://planet.osm.org> (дата обращения: 21.04.2025).
7. Hawker L., Uhe P., Luntadila P., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17, № 2. Р. 1–11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>, EDN: AUPPCP
8. Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН) // Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр). URL: <https://rosreestr.gov.ru/> (дата обращения: 25.04.2025).
9. Об особо охраняемых природных территориях: федеральный закон от 14.03.1995 № 33-ФЗ (в ред. от 08.08.2024, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025) // Собрание законодательства РФ. 1995. № 12, ст. 1024.
10. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 31.07.2025, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2025) // Собрание законодательства РФ. 2001. № 44, ст. 4147.
11. СП 34.13330.2021. Свод правил. Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02-85* (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 09.02.2021 № 53/пр). М. : Минстрой России, 2021. 93 с.
12. Кувайскова Ю. Е. Алгоритмы дискретной математики : учебное пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2017. 99 с.
13. Крылов П. М. Изменения использования транспорта в городских и сельских населённых пунктах России разной людности за период 2014–2022 гг. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 4. С. 235–241. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-4-235-241>, EDN: KBZVAI
14. Папилин Д. В., Проказов М. Ю. Оптимизация размещения объектов сбора и переработки твердых коммунальных отходов (на примере Балашовского района Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 13–19. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-1-13-19>, EDN: FROCTD
15. Преображенский Ю. В., Молочко А. В. Оценка развития междугородного автобусного сообщения в Саратовской области // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 18–23. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-1-18-23>, EDN: ELLJFZ
16. Преображенский Ю. В., Папилин Д. В. Делимитация метрополитенских ареалов на основе транспортной доступности крупнейших городов (на примере Волго-Уральского макрорегиона) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Науки о Земле. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 80–92. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2025-25-2-80-92>, EDN: DMHDFE

Поступила в редакцию 08.05.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025;
принята к публикации 29.05.2025; опубликована 30.09.2025

The article was submitted 08.05.2025; approved after reviewing 12.05.2025;
accepted for publication 29.05.2025; published 30.09.2025