

Инструменты построения моделей пространственного развития транспортной инфраструктуры в геомаркетинговых исследованиях

Кисляков А. Н. *, Тихонюк Н. Е., Малов М. С.

Владимирский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Владимир, Российская Федерация; *ankislyakov@mail.ru

РЕФЕРАТ

Работа посвящена актуальной проблеме оценки эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере с использованием теории графов и графовых моделей, позволяющих сформировать структуру экономических, информационных и других потоков, определяет перемещения людей, транспорта и товаров.

Целью работы является исследование моделей пространственного развития для оценки пространственной конкуренции, эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере и решения задач геомаркетинга. В качестве основной гипотезы в работе используется утверждение, что существующие модели пространственного развития могут быть комплексированы посредством инструментария теории графов.

Основной **задачей** является оценка эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере с использованием теории графов, позволяющей выявить перспективные направления стратегического планирования для размещения бизнес-проектов.

В статье показано, что для дальнейшего углубленного анализа устойчивости транспортной инфраструктуры необходимо провести анализ связности кластеров внутри графа с выделением мостов. Как результат продемонстрированы варианты построения графовой модели локации и решения на ее основе аналитических задач рационально с использованием инструментария библиотек network и osmnx языка python. Предложен подход к оценке эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере с использованием теории графов.

Вывод работы: анализ графов дорог позволяет определить оптимальные маршруты, точки пересечения, узлы и магистрали, влияющие на эффективность всей транспортной системы города, что позволяет прогнозировать спрос на различных направлениях, определять наиболее загруженные и перегруженные участки, а также идентифицировать слабые звенья в транспортной сети.

Ключевые слова: геомаркетинг, графовые модели, транспортная инфраструктура.

Для цитирования: Кисляков А. Н., Тихонюк Н. Е., Малов М. С. Инструменты построения моделей пространственного развития транспортной инфраструктуры в геомаркетинговых исследованиях // Управленческое консультирование. 2025. № 2. С. 46–56.

Tools for Transportation Infrastructure Effectiveness Assessing in Geomarketing Studies

Alexey N. Kislyakov*, Natalia E. Tikhonyuk, Mikhail S. Malov

Vladimir branch of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Vladimir, Russian Federation; *ankislyakov@mail.ru

ABSTRACT

The paper is devoted to the urgent problem of assessing the effectiveness of infrastructure projects in the transport sphere using graph theory and graph models that allow to form the

structure of economic, information and other flows, determines the movement of people, transport and goods.

The aim of the work is to study the models of spatial development to assess spatial competition, the effectiveness of infrastructure projects in the transportation sector and to solve geomarketing problems. The paper uses as its main hypothesis the assertion that existing models of spatial development can be complexified through the tools of graph theory.

The main **task** is to assess the effectiveness of infrastructure projects in the transportation sphere using graph theory, which allows to identify promising areas of strategic planning for the location of business projects.

It is shown that for further in-depth analysis of transport infrastructure sustainability it is necessary to analyze the connectivity of clusters within the graph with the allocation of bridges.

The variants of building a graph model of location and solving analytical problems on its basis rationally using the tools of network and osmnx libraries of python language are shown. An approach to assessing the efficiency of infrastructure projects in the transportation sphere using graph theory is proposed.

The analysis of road graphs allows to determine the optimal routes, intersection points, nodes and highways affecting the efficiency of the entire transport system of the city, which allows to forecast demand in different directions, to determine the most loaded and congested areas, as well as to identify weak links in the transport network.

Keywords: geomarketing, graph models, transport infrastructure.

For citing: Kislyakov A. N., Tikhonyuk N. E., Malov M. S. Tools for Transportation Infrastructure Effectiveness Assessing in Geomarketing Studies // Administrative consulting. 2025. N 2. P. 46–56.

Введение

Пространственный анализ данных позволяет более полно раскрыть потенциал предиктивной и описательной бизнес-аналитики и получить дополнительную информацию о поведенческой активности клиентов и пользователей, а также объяснить аномалии и отклонения данных. Исследования показали, что одним из решающих факторов успешности любого бизнеса является наличие сопутствующей инфраструктуры [1; 9].

В этом случае наиболее актуальным является вопрос развития методик и инструментов анализа близости (proximity analysis) [3; 7], формирующего представление об обеспеченности объектов, локаций (или доступность) какими-либо другими полезными объектами городской инфраструктуры для выработки инвестиционных решений по открытию и развитию бизнеса. Наличие подобной обеспечивающей инфраструктуры влияет на мобильность потребителей, безопасность, устойчивость социально-экономической системы и привлекательность инвестиций.

Геомаркетинговые исследования позволяют повысить эффективность анализа размещения объектов, выполнить кластеризацию объектов, сегментацию потребителей, оценку конкурентной среды, прогноз размера целевой аудитории и др. [13; 2].

Однако для решения практических задач зачастую не хватает как информации об объектах инфраструктуры на отдельной территории, так и эффективных методик и программных инструментов для анализа взаимосвязей наличия инфраструктуры и поведенческой активностью клиентов. Простой пример: наличие платной парковки у торгового центра может как привлечь дополнительную аудиторию, формируя более комфортную городскую среду для отдельного сегмента покупателей, так и отсеять часть целевой аудитории, которая формировала основу для ведения других форм бизнеса.

Второй особенностью является бурное развитие маркетплейсов и сервисов доставки в крупных городах, что требует пересмотра классических моделей прогно-

зирования товарооборота в локациях, так как расстояние от покупателя до торговой точки перестает иметь решающее значение для покупателя. При этом на первый план выходит транспортная инфраструктура.

Целью работы является исследование моделей пространственного развития для оценки пространственной конкуренции, эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере и решения задач геомаркетинга. В качестве основной гипотезы в работе используется утверждение, что существующие модели пространственного развития могут быть комплексированы посредством инструментария теории графов. В работе предлагается подход к оценке эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере с использованием теории графов, позволяющий выявить перспективные направления стратегического планирования для размещения бизнес-проектов.

Методы исследования

Анализ близости объектов в пространстве особенно актуален для решения задач, связанных с пространственной конкуренцией, основанной на двух вариантах моделей экономической конкуренции в пространстве — дифференциация «по линии» (модель линейного города, предложенная Г. Хоттелином в 1929 г.) и дифференциация «по окружности» (модель города на окружности) [8].

Модель линейного города активно изучалась А. Даунсом, К. Итоном, Р. Липси, Э. Чемберлином и предполагает существование определенных пространственных зон для размещения торговых и производственных предприятий. В рамках этой зоны пользователи отдадут однозначное предпочтение тем предприятиям, которые находятся внутри этой зоны.

Наиболее простая модель, используемая для описания месторасположения торговых точек, это модель Рейли, построенная вокруг концепции существования определенной зоны притяжения пользователей, которая определяется расстоянием до торговой точки от места проживания.

Главным недостатком модели линейного города является то, что существует ряд экзогенных факторов, которые должны быть учтены при построении моделей пространственной конкуренции. Различные исследователи к таким факторам относят городскую миграцию (путь от работы до дома), уникальность ассортимента, глубину ассортимента, наличие факторов дополнительного притяжения, удобство транспортной доступности и т. д.

Еще одна модель города на окружности представляет собой модель пространственной дифференциации рынка, в которой город расположен на линии окружности, а фирмы размещены вдоль этой окружности на одинаковом расстоянии друг от друга [2]. В этой модели предельные издержки фирм постоянны и одинаковы для всех, а население города равномерно размещено вдоль окружности. Все перемещения населения за покупками происходят только по окружности. Эта модель используется для изучения монополистической конкуренции в пространстве.

Изучение теории пространственного развития в градостроительстве также достаточно развито. Так, модель изолированного государства фон Тюнена [14] и концентрическая модель Бёрджеса и Хойта [11] направлены на изучение механизмов развития территорий, как с учетом моноцентричной схемы организации социально-экономического пространства, территории, так и с учетом множества центров, которые можно в некотором приближении интерпретировать как точки роста и/или перспективные центры экономического развития территории. В случае полицентричного варианта развития используется модель центральных мест Кристаллера — Лёша [10], формирующая «каркас», напоминающий графовую модель, связующий

точки роста территории, а также ряд моделей [6], позволяющих учесть взаимное влияние как отдельных территорий, так и их совокупности, например, в форме крупных городских агломераций друг на друга.

В рамках подобных моделей пространственного развития единым оказывается подход к рассмотрению системы городской инфраструктуры в качестве сетевой модели. Оценка эффективности инфраструктурных проектов в транспортной сфере с использованием инструментария теории графов является важным инструментом для принятия решений и оптимизации развития транспортной системы на уровне крупных городов и регионов. Графовые модели позволяют анализировать различные аспекты транспортной инфраструктуры, такие как автомобильные и пешеходные маршруты, железные дороги, аэропорты и т. д.

Одним из перспективных методов, используемых для оценки эффективности инфраструктурных проектов, является метод минимального связующего дерева (MST) (Алгоритм Прима) [4]. Этот метод позволяет найти наименьший подграф, который соединяет все вершины. В контексте транспортной инфраструктуры вершины графа могут представлять собой различные объекты, такие как транспортные хабы, узлы пересечения, терминалы перевозки, а ребра графа — транспортные маршруты или магистрали населенных пунктов. Оценка эффективности любого бизнес-проекта в том числе основывается на стоимости эксплуатации этих маршрутов, а также на дополнительных факторах, таких как количество пассажиров или грузов, которые будут перевозиться по этим маршрутам.

В реальных ситуациях экономического анализа пространство региона и пространство города в существенной степени выступают как дискретное пространство, которое описывается первичными графовыми моделями, представляющими собой математический объект G , состоящий из вершин V и связей E . Совокупность вершин и ребер в привязке к географическому расположению объектов представляет собой как отдельные улицы, так и участки улиц (E), соединенных узловыми точками — перекрестками (V). Применение графовых моделей к описанию структуры потоков ресурсов на определенной территории формирует сетевую модель экономического пространства города (территории), представляющую собой крупномасштабную сеть, позволяющую учесть признаки организации социально-экономического и физического пространства [1; 12].

Результаты

Для построения графовой модели локации и решения на ее основе аналитических задач рационально использовать инструментарий языка программирования Python, с прикладными пакетами для построения и анализа графов NetworkX и igraph, а также API сервиса OpenStreetMap (OSM) — картографического проекта с открытым исходным кодом, который предоставляет данные об улицах, перекрестках и других объектах в пространстве [9]. Так, библиотека OSMnx позволяет реализовать загрузку данных в виде сетевой структуры с привязкой к определенной локации и с дополнительным описанием транспортной инфраструктуры, в том числе: контуры реальных объектов и зданий; данные о высотах точек рельефа местности; улицы, автомобильные и пешеходные дороги; расчет скорости и времени в пути.

Для графов варианта а), б) и в) транспортной инфраструктуры г. Владимир, изображенной на рис. 1, ранее полученные на основе исследования [8] масштаб и конфигурация сети значительно отличаются по основным характеристикам графа, показанным в таблице.

В рамках текущего исследования реализованные графы могут быть рассмотрены совместно с аналогичными графами месторасположения хозяйствующих

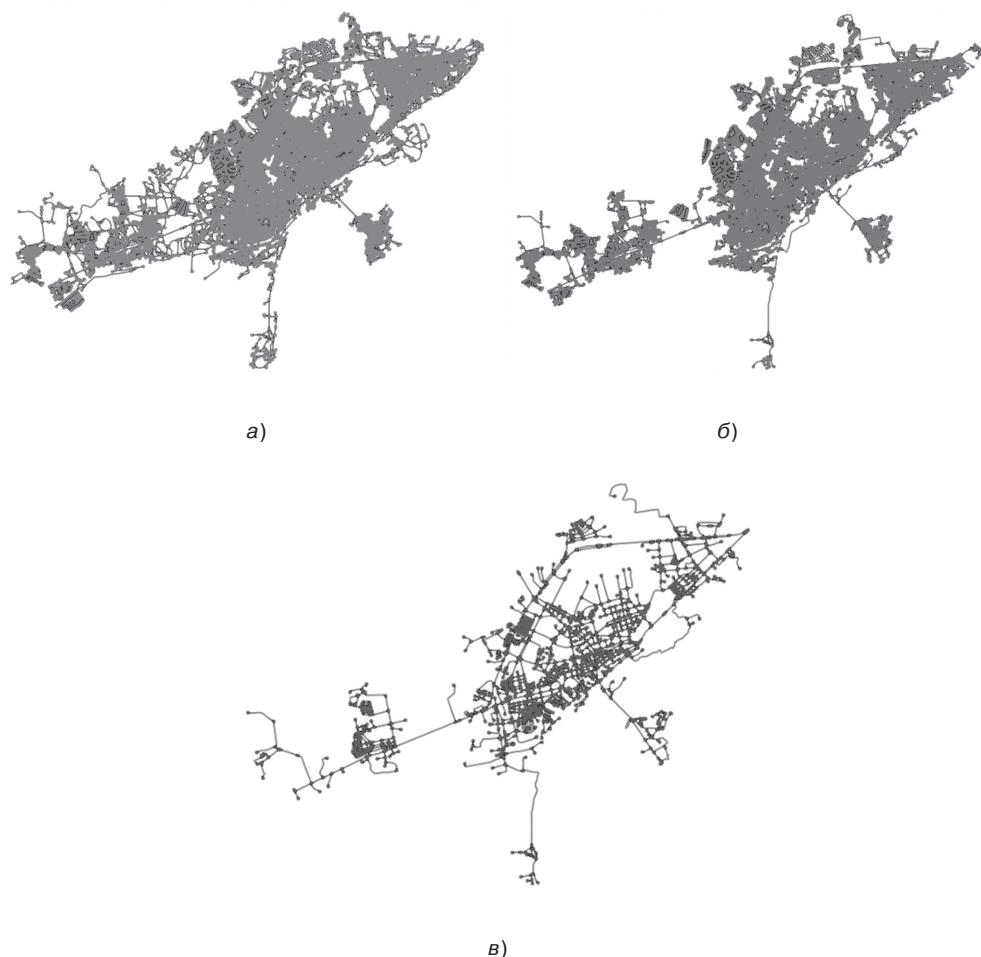


Рис. 1. Визуализация первичного графа транспортной инфраструктуры г. Владимир на уровне а) пешеходных маршрутов, б) автомобильных дорог со всеми типами покрытия, в) асфальтированных дорог с наличием тротуаров, регулируемых перекрестков и т.п. [5]

Fig. 1. Visualization of the primary graph of transport infrastructure in Vladimir at the level of a) pedestrian routes, b) roads with all types of sidewalk, c) paved roads, presence of sidewalks, regulated intersections, etc. [5]

субъектов. Кроме того, полученные с помощью вычисления соответствующих метрик расстояний [4; 12] данные об удаленности различных инвестиционных площадок или прочих хозяйствующих субъектов (промышленных предприятий, сортировочных центров и т.п.) от локаций с развитой транспортной инфраструктурой могут быть использованы не только в качестве признаков для построения предиктивных моделей.

Следующим этапом является симплификация графа — с удалением самозамкнутых петель и двуправленных ребер в целях представления первичного графа в формате неориентированного графа с возможностью добавления признаков вершин и ребер, а также дальнейшего углубленного анализа устойчивости транспортной инфраструктуры — выделением мостов [12]. Ребро в неориентированном

Таблица

Характеристики графов транспортной сети г. Владимир
 Table. Characteristics of transport network graphs in Vladimir city

Вариант графа	Число вершин	Число ребер	Диаметр	Средняя длина геодезической цепи	Количество кластеров
вариант а)	28 942	82 550	213	64,44	29
вариант б)	14 453	34 559	188	61,20	32
вариант в)	1538	3795	74	26,20	8

связном графе является мостом, если его удаление разъединяет граф, т. е. ребро, которое не принадлежит ни одному циклу. На рис. 2 выделены ребра, выходящие в цепочки магистралей, являющихся связующими «мостами» между отдельными локациями города.

Дополнительным признаком, позволяющим учесть перспективы развития бизнес-проектов в определенной локации, является возможность оценки степени близости к прочим объектам городской инфраструктуры [9]. Так, например, открытая библиотека *estatu* для получения и объединения открытых пространственных данных, изначально предназначенная для оценки «вариантов использования недвижимости», предоставляет инструменты для объединения загруженных данных,



Рис. 2. Визуализация упрощенного неориентированного графа транспортной инфраструктуры г. Владимир на уровне асфальтированных дорог, наличия тротуаров, регулируемых перекрестков и т. п.

Fig. 2. Visualization of a simplified undirected graph of the transport infrastructure of Vladimir at the level of paved roads, sidewalks, regulated intersections, etc.

попарной проверки источников, анализа близости и т.д. Возможные варианты загружаемых данных по категориям:

- water: водные объекты;
- park: парки;
- light: уличные фонари;
- municipality: административные границы;
- school: школы;
- driving school: автошкола;
- bar: бары;
- waste disposal: утилизация отходов;
- toilet: общественные туалеты;
- police: полиция

На рис. 3 показан пример использования этой библиотеки для оценки индекса «экологичности» жилого района путем подсчета доли зеленых насаждений в заданном радиусе. На основе рассчитанных значений площади зеленых насаждений можно сделать вывод об уровне экологии заданной территории.

Кроме того, данный пакет позволяет выполнить анализ близости для построения маршрутов к POI (точкам интереса) требуемой категории. На рис. 4 показан пример оценки близости локации к общественным пространствам категории «парки».

На рис. 4 также показаны кратчайшие (в данном случае пешеходные) маршруты до каждого из указанных объектов, что позволяет оценить не только общее расстояние от локации до каждого из выбранных объектов, но и сформировать представление об основных маршрутах следования потенциальных потребителей.

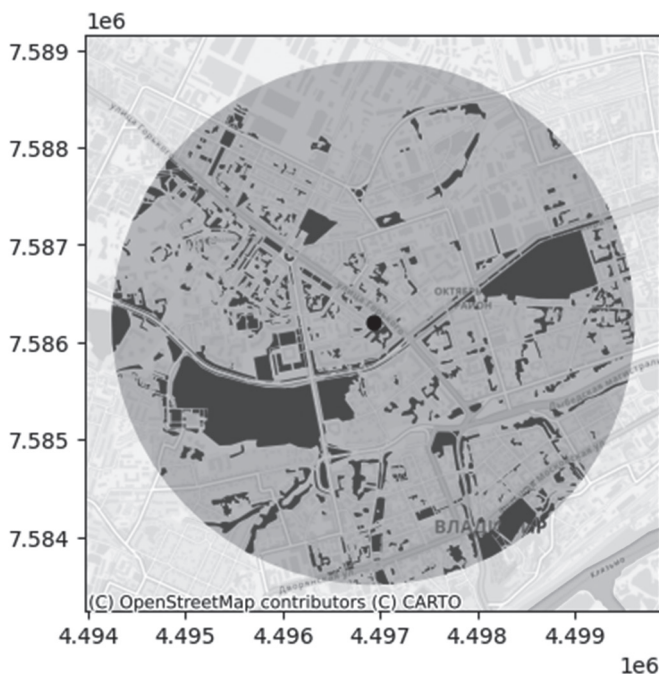


Рис. 3. Оценка площади зеленых насаждений в заданной локации г. Владимир (17%)
Fig. 3. Estimation of the area of green spaces in a given location of Vladimir (17%)

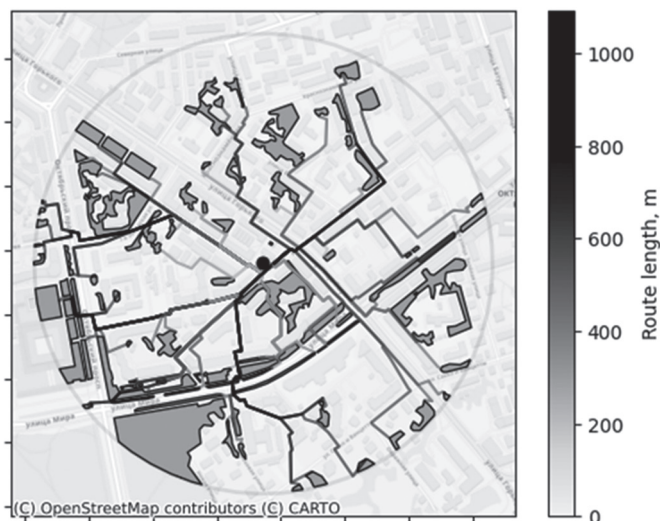


Рис. 4. Оценка близости локации к общественным пространствам категории «парки»

Fig. 4. Assessment of the location's proximity to public spaces of the category «parks»

Обсуждение

Прикладными направлениями использования предлагаемого метода являются:

1. Исследование текущей транспортной сети. Первым шагом будет изучение текущего состояния транспортной сети города. С использованием открытых данных различных сервисов картографии существует возможность представить транспортную сеть в виде графа, где узлы представляют улицы, перекрестки, а ребра — транспортные связи между ними. Такие показатели, как центральность узлов или центральность ребер, используются для определения ключевых элементов транспортной инфраструктуры и их влияния на эффективность системы.
2. Прогнозирование будущего спроса на транспорт. Это направление включает в себя прогнозирование плотности транспортного потока на дорогах и прогнозирование изменений в численности населения отдельных районов города. Такие прогнозы помогут нам определить основные тенденции развития транспортной сети и выработать решения по позиционированию бизнеса.
3. Оптимизация транспортных потоков. Алгоритмы поиска кратчайшего пути помогают определить оптимальные маршруты от точек продаж или пунктов выдачи до основных групп потребителей. Существует возможность использования алгоритмов поиска минимального связующего дерева, чтобы определить наиболее эффективное распределение транспорта, в том числе с учетом строительства новых дорог.
4. Оценка экономической эффективности пространственной конкуренции. Графовый анализ позволяет оценить затраты на реализацию бизнес-проектов, спрогнозировать потенциальное увеличение доходов от введения в эксплуатацию новой инфраструктуры и определить соотношение затрат и выгод на основе алгоритмов центральности для определения ключевых узлов, на которые следует сосредоточить ресурсы, и алгоритмы сравнения проектов для выбора наиболее эффективных вариантов.

5. Оценка пространственного развития для улучшения качества жизни (в рамках концепции «город для жителей»). Метод позволит определить оптимальные места размещения объектов социальной инфраструктуры с учетом развития территории.

Выводы

С использованием графовых алгоритмов можно построить модель транспортной сети с учетом различных параметров, таких как городская плотность, местоположение населенных пунктов, потенциальный пассажиропоток и другие факторы. Анализ графов дорог позволяет определить оптимальные маршруты, точки пересечения, узлы и магистрали, влияющие на эффективность всей транспортной системы города.

Это позволяет прогнозировать спрос на различных направлениях, определять наиболее загруженные и перегруженные участки, а также идентифицировать слабые звенья в транспортной сети. Таким образом, графовый анализ позволяет принимать обоснованные решения по оптимизации маршрутов, повышению пропускной способности и экономической эффективности проектов развития транспортной сети.

В целом, применение комплексного подхода с использованием методов оценки экономической эффективности и графовых алгоритмов позволяет более точно анализировать и планировать пространственное развитие, что способствует более эффективному использованию бюджетных средств и обеспечению устойчивого развития территории.

Литература

1. Абрамов А. Л., Пугач П. А. Графовые модели городов. М.: Управление по издательской деятельности Саратовского университета, 2021.
2. Бухаров Д. М. Моделирование фрактального развития городской структуры // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пространственное развитие территорий в условиях цифровизации: социо-эколого-экономические системы». Грозный: Спектр, 2020. С. 66–72.
3. Грекусис Д. Методы и практика пространственного анализа. Описание, исследование и объяснение с использованием ГИС / Пер. с англ. А. Н. Киселева. М.: ДМК Пресс, 2021.
4. Кисляков А. Н. Графовые методы описания торгового профиля региона // Управленческое консультирование. 2022. № 2. С. 70–80.
5. Кисляков А. Н. Совершенствование методов анализа пространственных данных для задач исследования региональных рынков // Проблемы и перспективы развития социально-экономических и гуманитарных наук: педагогика, психология, экономика, юриспруденция : Сборник научных статей, Москва, 19 декабря 2023 г. Саратов: Центр вынужденных переселенцев «Саратовский источник», 2024. С. 209–214.
6. Манаева И. В., Канищева А. В. Закон Ципфа: межстрановой анализ // Экономический анализ: теория и практика. 2018. Т. 17, № 7 (478). С. 1337–1351.
7. Окунев И. Ю. Основы пространственного анализа: монография. М.: Аспект Пресс, 2020.
8. Павлов Ю. В. Фракталы как инструмент территориального планирования агломерационных систем // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 2242–2248.
9. Романова А. И., Миронова М. Д. Математические модели комплексного развития городов : учебно-методическое пособие. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2018.
10. Сидоров А. В. Городские издержки и их роль в теории центральных мест а la Кристаллер-Леш // Журнал НЭА. 2018. № 4 (40). С. 12–31.
11. Ханнанова Е. А., Овечкина Е. К. Хронологический обзор и анализ моделей городского развития, разработанных в США и Европе в XVIII–XX вв. // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 439–445.
12. Garlaschelli D., Ruzzenenti F., Basosi R. Complex Networks and Symmetry I: A Review // Symmetry. 2010. N 2. P. 1–27.

13. Kuk G., Marijn J. The Business Models and Information Architectures of Smart Cities // Journal of Urban Technology. 2011. N 18 (2). P. 39–52.
14. Tannier C., Pumain D. Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example // Cybergeog: European Journal of Geography. 2005. 10.4000/cybergeog.3275.

Об авторах:

Кисляков Алексей Николаевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры информационных технологий Владимирского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимир, Российская Федерация); ankislyakov@mail.ru

Тихонюк Наталья Евгеньевна, кандидат экономических наук, заведующая кафедрой экономики Владимирского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимир, Российская Федерация); tasha-ti@yandex.ru

Малов Михаил Сергеевич, аспирант Владимирского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимир, Российская Федерация); michaelmalov21@gmail.com

References

1. Abramov A. L., Pugach P. A. Graph models of cities. M.: Department of publishing activities of Saratov University, 2021. (In Russ.)
2. Bukharov D. M. Modeling of fractal development of urban structure // Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation «Spatial development of territories in the conditions of digitalization: socio-ecological-economic systems». Grozny: Spektr, 2020. P. 66–72. (In Russ.)
3. Grekusi D. Methods and practice of spatial analysis. Description, research and explanation with the use of GIS. Moscow: DMK Press, 2021. (In Russ.)
4. Kislyakov A. N. Graph methods for describing the trade profile of the region // Administrative Consulting [Upravlencheskoe konsul'tirovanie]. 2022. N 2. P. 70–80. (In Russ.)
5. Kislyakov A. N. Improvement of methods of spatial data analysis for the tasks of regional markets research // Problems and prospects of development of socio-economic and humanitarian sciences: pedagogy, psychology, economics, jurisprudence: collection of scientific articles, Moscow, December 19, 2023. Saratov: Center of forced migrants «Saratov source», 2024. P. 209–214. (In Russ.)
6. Manaeva I. V., Kanischeva A. V. Zipf's law: cross-country analysis // Economic analysis: theory and practice [Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika]. 2018. Vol. 17, N 7 (478). P. 1337–1351. (In Russ.)
7. Okunev I. Yu. Fundamentals of spatial analysis: Monograph. Moscow: Aspect Press, 2020. (In Russ.)
8. Pavlov Y. V. Fractals as a tool for territorial planning of agglomeration systems // Fundamental Research [Fundamental'nye issledovaniya]. 2013. N 10. P. 2242–2248. (In Russ.)
9. Romanova A. I., Mironova M. D. Mathematical models of the complex development of cities: Educational and methodical manual. Kazan, 2018. (In Russ.)
10. Sidorov A. V. Urban costs and their role in the theory of central places a la Christaller-Lesch // Journal of NEA [Zhurnal NEA]. 2018. N 4 (40). P. 12–31. (In Russ.)
11. Hannanova E. A., Ovechkina E. K. Chronological review and analysis of urban development models developed in the USA and Europe in the XVIII–XX centuries // Innovations and Investments [Innovatsii i investitsii]. 2023. N 10. P. 439–445. (In Russ.)
12. Garlaschelli D., Ruzzenenti F., Basosi R. Complex Networks and Symmetry I: A Review // Symmetry. 2010. N 2. P. 1–27.
13. Kuk G., Marijn J. The Business Models and Information Architectures of Smart Cities // Journal of Urban Technology. 2011. N 18 (2). P. 39–52.
14. Tannier C., Pumain D. Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example // Cybergeog: European Journal of Geography. 2005. 10.4000/cybergeog.3275.

About the authors:

Alexey N. Kislyakov, Doctor of Economics, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies of Vladimir branch of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Vladimir, Russian Federation); ankislyakov@mail.ru

Natalia E. Tikhonyuk, Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Economics of Vladimir branch of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Vladimir, Russian Federation); tasha-ti@yandex.ru

Mikhail S. Malov, postgraduate student of Vladimir branch of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Vladimir, Russian Federation); michaelmalov21@gmail.com