

Алгоритм пространственной агрегации городских объектов и показателей притяжения для задач моделирования спроса на уличную парковку

И.Р. Ерёмин

Финансовый университет при правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

Аннотация: В работе предлагается алгоритм пространственной агрегации линейных городских объектов (уличных парковочных зон), основанный на восстановлении осевой линии улицы по дискретному набору координат и формировании интегральных показателей притяжения. Алгоритм ориентирован на задачи математического моделирования спроса на платную уличную парковку и обеспечивает устойчивое формирование объяснимых факторов для последующего использования в регрессионных и гравитационных моделях (в том числе модели Хаффа). Особенностью подхода является использование главных компонент для упорядочивания геометрии зон и снижение вычислительной сложности при работе с геоданными.

Ключевые слова: платная парковка, парковочный спрос, пространственная агрегация, точки притяжения, тарифная политика, пространственный анализ, умный город, модель Хаффа, городская инфраструктура, пространственное распределение спроса.

Введение

Системы платной уличной парковки относятся к классу городских инфраструктурных объектов, пространственная структура которых носит линейный характер. В отличие от внеуличных парковок или административно-территориальных единиц, спрос на уличную парковку формируется вдоль уличных сегментов и существенно зависит от локальной застройки, пешеходной доступности и конкурирующих парковочных альтернатив.

На практике исходные данные о парковочных зонах часто представлены в виде неупорядоченного набора GPS-координат, полученных из инвентаризационных или геоинформационных систем. Это приводит к необходимости восстановления упорядоченной геометрии зоны и корректного распределения пространственных показателей вдоль ее длины.

Использование традиционных зональных методов пространственной агрегации, основанных на полигонах, приводит к искажению геометрии объектов и снижению интерпретируемости факторов спроса. В этой связи

актуальной является задача разработки алгоритмов, ориентированных на линейные объекты городской инфраструктуры и допускающих интеграцию с классическими экономико-математическими моделями.

Целью настоящей работы является разработка вычислительного алгоритма, обеспечивающего восстановление упорядоченной геометрии уличных парковочных зон, формирование нормированных показателей притяжения на основе геоданных, интеграцию полученных показателей в гравитационную модель распределения спроса (модель Хаффа).

1. Обзор исследований

Вопросы моделирования спроса на городскую уличную парковку находятся на пересечении транспортной экономики, пространственного анализа и прикладного математического моделирования. Рост автомобилизации, ограниченность уличного пространства и развитие платных парковочных систем в крупных городах обуславливают необходимость построения формализованных моделей, позволяющих прогнозировать загрузку парковочных зон и оценивать влияние тарифной политики и городской среды на поведение пользователей.

Классические экономические исследования рассматривают парковку как ограниченный ресурс, спрос на который чувствителен к цене, доступности и альтернативным вариантам использования уличного пространства. В фундаментальной работе Шупа показано, что заниженная стоимость парковки приводит к избыточному спросу, росту поискового трафика и снижению эффективности использования уличного пространства [1].

Дальнейшее развитие эти идеи получили в эмпирических исследованиях, посвящённых оценке ценовой эластичности спроса на парковку. В работах [2, 3] показано, что повышение тарифа статистически значимо снижает среднюю продолжительность парковочной сессии и

повышает оборачиваемость мест, однако эффект существенно варьируется в зависимости от функционального назначения территории.

Современные исследования, основанные на микроданных и квазиэкспериментальных подходах, демонстрируют пространственную неоднородность поведенческих реакций пользователей. Чувствительность спроса к цене различается между деловыми, жилыми и транзитными зонами города, что подчёркивает необходимость пространственно-дифференцированного моделирования. Существенное направление исследований связано с применением пространственных моделей взаимодействия. В этом контексте особое место занимает модель Хаффа, первоначально разработанная для анализа торговых зон [4], но впоследствии широко адаптированная для задач транспортного и городского планирования [5–7].

Модель Хаффа описывает вероятность выбора пользователем конкретной зоны как функцию её аттрактивности и обобщённого расстояния. В ряде работ показано, что гравитационный подход эффективно применяется для моделирования распределения поездок, пешеходных потоков и выбора транспортной инфраструктуры [8–9].

В последние годы предлагаются модификации классической формулы, учитывающие неоднородность пользовательских предпочтений, нелинейный характер убывания привлекательности с расстоянием и насыщение инфраструктуры [10]. Применительно к парковочным системам такие модели позволяют перейти от агрегированного прогноза спроса к его распределению по отдельным парковочным зонам [11].

Отдельный массив исследований посвящён прогнозированию заполняемости парковочных мест во времени. В работах последних лет используются эконометрические модели временных рядов, пространственно-

временные регрессии, а также методы машинного обучения, включая градиентный бустинг и графовые нейронные сети [12].

Несмотря на высокую точность краткосрочного прогноза, такие методы часто характеризуются низкой интерпретируемостью и высокой зависимостью от объёма обучающих данных. В ряде обзорных работ подчёркивается, что использование «чёрных ящиков» ограничивает применение моделей в задачах тарифного регулирования и стратегического планирования городской инфраструктуры [13].

Современные исследования активно используют геоинформационные данные и открытые источники, такие как OpenStreetMap, для формирования показателей аттрактивности городской среды [14]. Анализ плотности точек интереса (уровня интереса), функционального состава застройки и пешеходной доступности позволяет количественно описывать факторы притяжения, влияющие на транспортное и парковочное поведение пользователей [15].

Показано, что включение индикаторов уровня интереса существенно повышает объясняющую способность моделей спроса, особенно в центральных районах города и зонах смешанного использования. При этом подчёркивается необходимость агрегирования таких показателей на уровне уличных сегментов или парковочных зон, что требует корректной пространственной формализации [16].

Несмотря на значительный объём исследований, в существующей литературе сохраняется ряд нерешённых вопросов. Во-первых, многие работы фокусируются либо на краткосрочном прогнозе загрузки парковок, либо на оценке ценовой эластичности, не связывая эти аспекты с моделью активной клиентской базы сервиса [11]. Во-вторых, широкое использование машинного обучения ограничивает интерпретируемость результатов и их применимость в нормативно-экономическом обосновании тарифных решений [13].

В этой связи актуальной научной задачей является разработка интерпретируемой пространственной модели распределения парковочного спроса, сочетающей экономическую обоснованность, пространственную адекватность и масштабируемость. Настоящее исследование направлено на решение данной задачи путём адаптации гравитационного подхода (модели Хаффа) к уличным парковочным зонам и интеграции его в модель прогнозирования активной клиентской базы платного парковочного сервиса.

2. Исходные данные и постановка задачи

2.1 Геометрия парковочной зоны

Каждая парковочная зона задается множеством точек

$$Z = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N, \quad N \geq 2$$

где (x_i, y_i) – долгота и широта точек, полученных из инвентаризационных и геоинформационных систем. Порядок следования точек априори неизвестен, а геометрия зоны может представлять собой ломаную линию, содержать локальные шумы позиционирования.

Требуется восстановить упорядоченную линейную геометрию зоны.

2.2 Точки притяжения

Точки притяжения извлекаются из открытых геоданных OpenStreetMap и включают: коммерческие объекты, офисные и деловые здания, объекты общественного и социального назначения, учреждения здравоохранения и питания. Показатели уровня интереса используются для формирования объясняющих переменных в моделях спроса.

3. Метод упорядочивания геометрии зоны

3.1 Использование метода главных компонент

Для восстановления направления улицы применяется метод главных компонент. Рассматривается матрица координат:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{pmatrix}, \quad \tilde{X} = X - \bar{X}.$$

вычисляется сингулярное разложение:

$$\tilde{X} = U\Sigma V^T.$$

Первый вектор v_1 матрицы V интерпретируется как направление улицы.

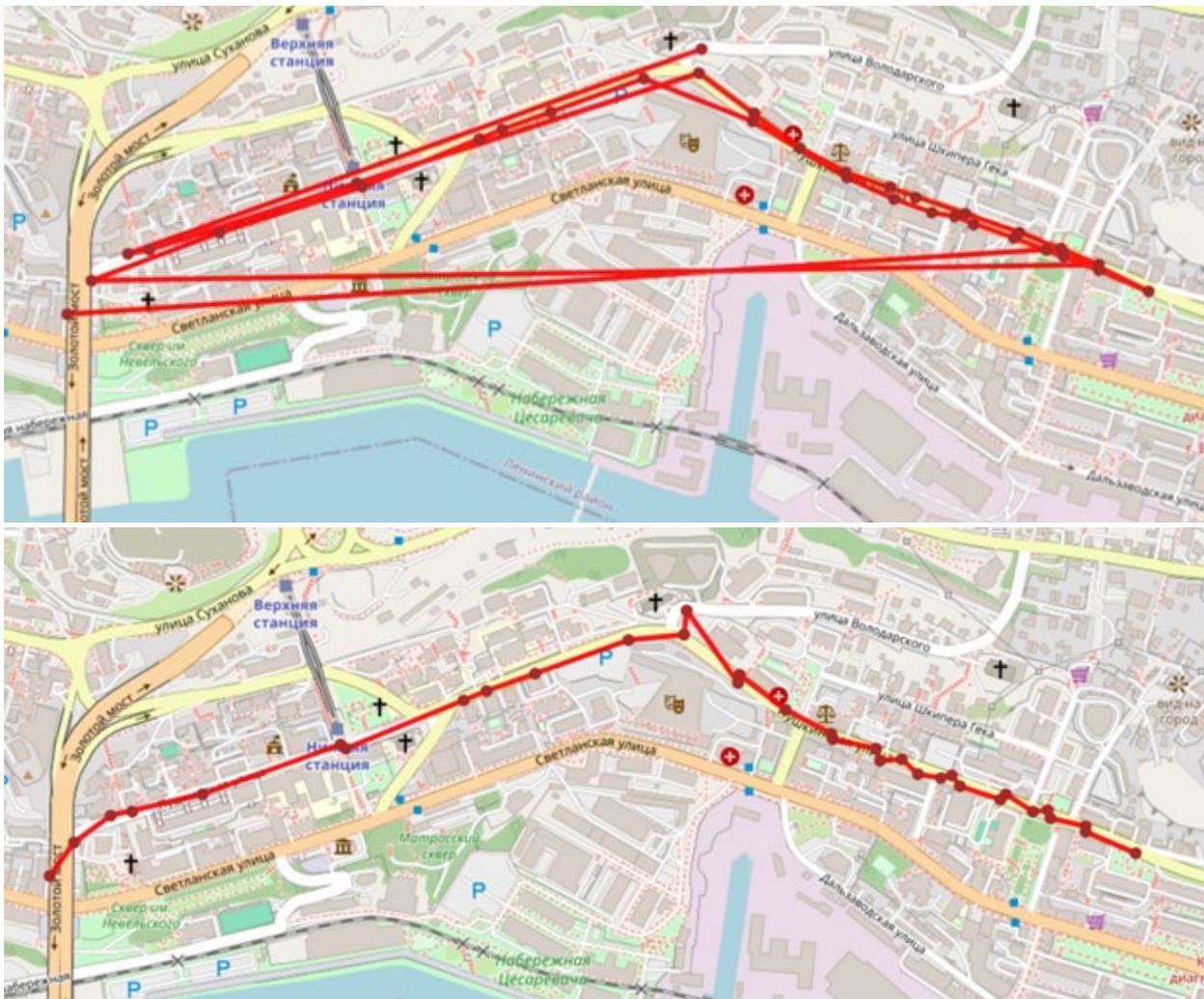


Рис. 1. Восстановление геометрии парковочной зоны 320 методом главных компонент (до/после)

Каждая точка проецируется на ось:

$$p_i = \tilde{X}_i \cdot v_1,$$

после чего точки сортируются по возрастанию p_i . Это позволяет восстановить порядок точек вдоль улицы даже при сложной ломаной геометрии.

Результатом является упорядоченная последовательность:

$$(x_{(1)}, y_{(1)}), \dots, (x_{(N)}, y_{(N)}),$$

определяющая осевую линию парковочной зоны.

Для примера показано восстановление геометрии парковочной зоны 320 на улице Пушкинской (см. рис. 1) (модель данных парковочного сервиса была описана в статье [17]).

4. Пространственная дискретизация зоны

Для учета неоднородности окружающей застройки осевая линия дискретизируется с фиксированным шагом h (в метрах) (см. рис. 2). В каждой точке дискретизации формируется локальное окружение радиуса R , в пределах которого производится агрегация уровней интереса, полученные из OpenStreetMap.

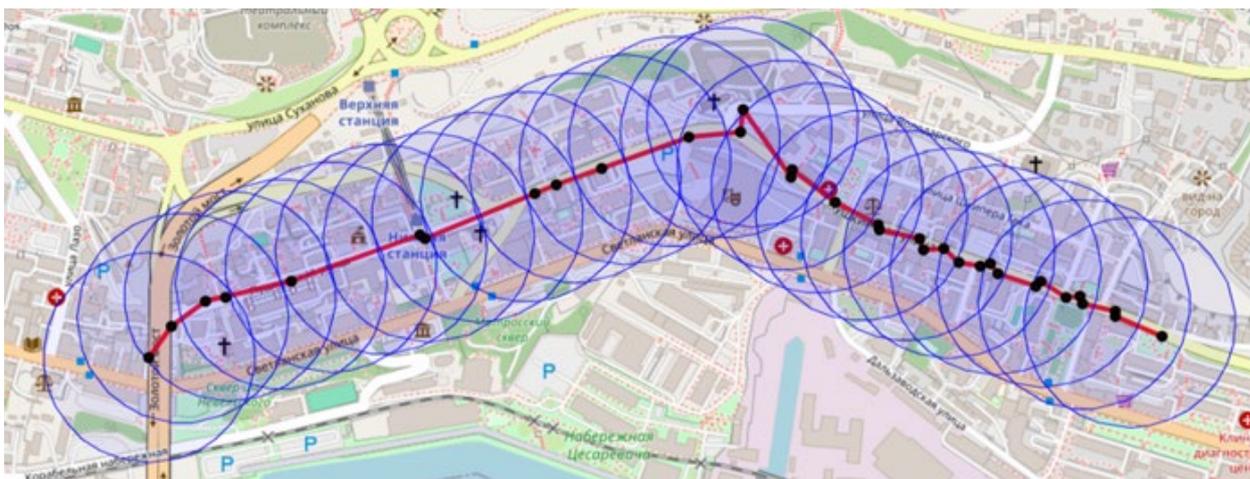


Рис. 2. Радиусы 200 м вдоль улицы 320 с шагом 100 м

Это позволяет сгладить локальные выбросы, избежать зависимости результатов от плотности исходных точек, корректно нормировать показатели по длине зоны.

Для каждой группы уровня интереса g рассчитывается индекс:

$$I_g = \frac{|\mathcal{P}_g|}{L/100}$$

где:

- $|\mathcal{P}_g|$ – число уникальных объектов группы g ,

- L – длина зоны в метрах.

Суммарная привлекательность зоны определяется как:

$$I_{\text{total}} = \sum_g I_g.$$

Такая нормировка обеспечивает сопоставимость зон различной протяженности и делает показатели пригодными для использования в регрессионных и гравитационных моделях.

5. Применение в моделях спроса

Сформированные показатели используются в качестве переменных:

- в регрессионных моделях заполняемости парковочных зон,
- в гравитационных моделях распределения спроса (модель Хаффа),
- в сценарных расчетах изменения тарифов.

Важным преимуществом подхода является интерпретируемость факторов, что особенно критично для прикладных задач городского управления.

6. Гравитационная модель распределения спроса (модель Хаффа)

В рамках прогнозирования показателей платного парковочного сервиса ключевой задачей является распределение агрегированного спроса на парковочные сессии между отдельными парковочными зонами. При этом предполагается, что общий объем потенциального спроса формируется активной клиентской базой сервиса и определяется макро- и мезофакторами (уровень автомобилизации, тарифная политика, сезонность), тогда как распределение спроса по зонам зависит от их пространственных и функциональных характеристик.

Для решения данной задачи в работе используется гравитационный подход, основанный на модели Хаффа, позволяющий формализовать вероятностный выбор пользователем конкретной парковочной зоны в условиях конкуренции между зонами.

В классической формулировке модель Хаффа задаёт вероятность выбора пользователем i -го объекта (зоны) как:

$$P_i = \frac{A_i \cdot f(d_i)}{\sum_{j=1}^N A_j \cdot f(d_j)},$$

где:

- P_i – вероятность выбора i -й зоны;
- A_i – показатель привлекательности зоны;
- d_i – обобщённое расстояние до зоны;
- $f(d)$ – функция убывания привлекательности с расстоянием;
- N – количество конкурирующих зон.

В качестве функции расстояния в настоящем исследовании используется степенная форма:

$$f(d_i) = d_i^{-\beta},$$

где $\beta > 0$ – параметр пространственного затухания спроса.

В отличие от классических задач торговых зон, парковочные зоны обладают рядом специфических особенностей:

- выбор зоны осуществляется в пределах локального городского района;
- конкуренция между зонами носит выраженный пространственный характер;
- аттрактивность зоны формируется не только ёмкостью, но и окружающей городской средой.

Для каждой парковочной зоны формируется осевая линия улицы. Зона дискретизируется с фиксированным шагом, после чего для каждой дискретной точки рассчитываются:

- плотность точек притяжения по функциональным группам в заданном радиусе;
 - объём бесплатных парковочных мест;
-

- среднее пешеходное расстояние до центра города по улично-дорожной сети.

Полученные показатели агрегируются и нормируются по длине зоны, что обеспечивает сопоставимость зон различной протяжённости.

С учётом этого аттрактивность парковочной зоны A_i в модели определяется как мультипликативная функция её характеристик:

$$A_i = \beta_0 + \beta_1 S_i + \beta_2 F_i + \beta_3 T_i + \beta_4 W_i + \beta_5 POI_i,$$

где:

- S_i – количество парковочных мест в зоне;
- F_i – количество бесплатных парковочных мест в радиусе;
- T_i – нормативный тариф парковки;
- W_i – среднее пешеходное расстояние до центра города по улично-дорожной сети;
- POI_i – нормированный показатель плотности точек притяжения k -й группы (офисы, торговля, питание, медицина и др.);
- β_{0-5} – параметры.

Таким образом, модель сохраняет интерпретируемость: каждый множитель имеет ясный экономический смысл и может быть проанализирован отдельно.

Пусть Q – прогнозируемое количество парковочных сессий за расчётный период (полученное из модели активной клиентской базы). Тогда ожидаемое число сессий в зоне i определяется как:

$$\hat{Q}_i = Q \cdot P_i.$$

7. Результаты

Модель была применена к данным платного парковочного сервиса города Владивостока, включающим геометрию парковочных зон, тарифы, фактические объёмы парковочных сессий и пространственные характеристики городской среды (см. рис. 3).

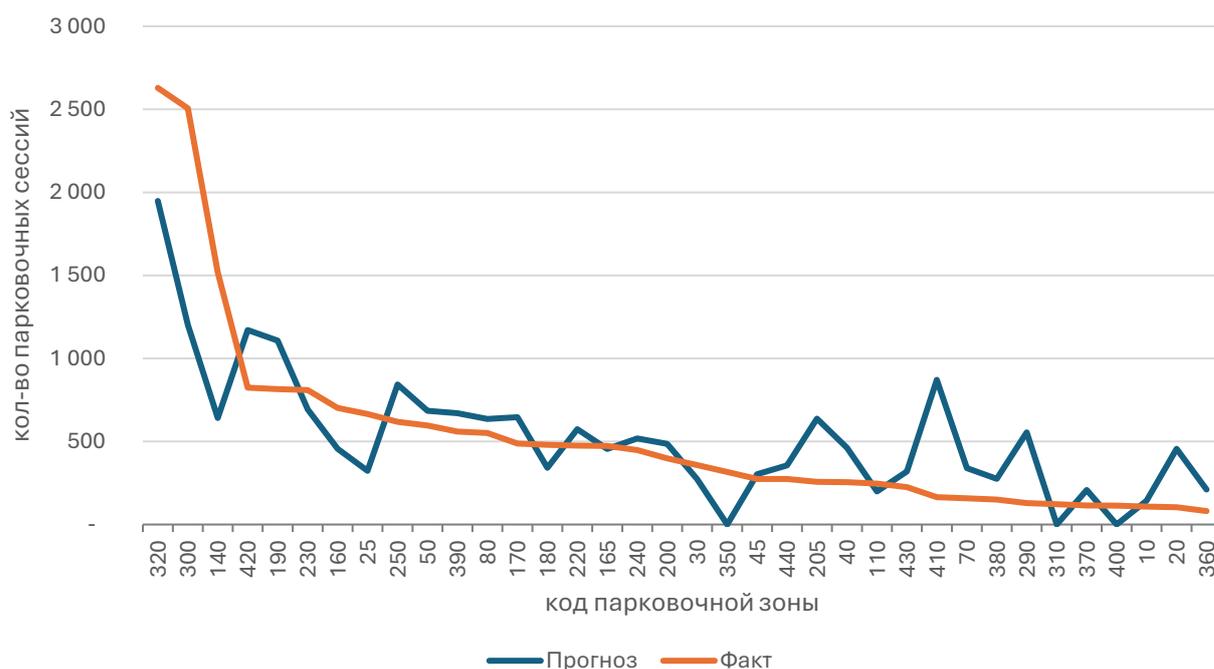


Рис. 3. Количество парковочных сессий по зонам за период июнь-август 2025

Полученные результаты показали высокую объясняющую способность пространственных факторов. Зоны с высокой плотностью офисных и торговых точек интереса демонстрируют устойчиво более высокую долю спроса даже при сопоставимых тарифах. Пешеходное расстояние до центра города оказывает статистически значимое влияние на распределение спроса, подтверждая применимость гравитационного подхода. Коэффициент β_3 у тарифа имеет экономически разумный знак и порядок величины, что позволяет использовать модель для сценарного анализа тарифных изменений.

Модель корректно работает при добавлении новых зон и не требует переобучения сложных алгоритмов, что делает её применимой для практического использования в городском управлении.

Заключение

Предложен алгоритм пространственной агрегации линейных городских объектов, позволяющий корректно учитывать геометрию парковочных зон и окружающую застройку. Использование метода главных компонент

обеспечивает устойчивое восстановление осевой линии улицы и снижает чувствительность к шуму исходных данных. Полученные показатели обладают высокой объяснительной способностью и пригодны для включения в эконометрические и гравитационные модели спроса.

Нормированные показатели притяжения позволяют интегрировать пространственные данные в гравитационную модель Хаффа. Подход отличается интерпретируемостью, вычислительной эффективностью и пригодностью для прикладного использования в системах городского управления.

Адаптация модели Хаффа к задаче распределения спроса на уличную парковку позволила получить интерпретируемую и масштабируемую математическую модель, связывающую тарифную политику, пространственные характеристики городской среды и поведение пользователей. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования гравитационного подхода в задачах анализа и оптимизации платных парковочных систем.

Литература

1. Shoup D. C. The High Cost of Free Parking. Chicago: Planners Press, 2005. 733 p. URL: routledge.com/The-High-Cost-of-Free-Parking/Shoup/p/book/9781932364965 (дата обращения: 18.12.2025).
2. Pierce G., Shoup D. Getting the prices right: An evaluation of pricing parking by demand in San Francisco. Journal of the American Planning Association. 2013. Vol. 79, No. 1. pp. 67–81. DOI: doi.org/10.1080/01944363.2013.787307
3. Ommeren J., Wentink D., Rietveld P. Empirical evidence on cruising for parking. Transportation Research Part A. 2012. Vol. 46, No. 1. pp. 123–130. DOI: doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.011
4. Huff D. L. Defining and estimating a trading area. Journal of Marketing. 1964. Vol. 28, No. 3. pp. 34–38. DOI: doi.org/10.2307/1249154



5. Fotheringham A. S., O’Kelly M. E. Spatial Interaction Models: Formulations and Applications. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1989. 224 p. URL: research-portal.st-andrews.ac.uk/en/publications/spatial-interaction-models-formulations-and-applications/ (дата обращения: 22.12.2025)
 6. Haynes K. E., Fotheringham A. S. Gravity and Spatial Interaction Models. Beverly Hills: Sage Publications, 1984. 88 p. URL: archive.org/details/gravityspatialin0000hayn (дата обращения: 22.12.2025)
 7. Cheng J., Bertolini L. Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 32. P. 95–105. DOI: doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.08.004
 8. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. Modelling Transport. 4th ed. Chichester: Wiley, 2011. 586 p. URL: wiley.com/en-us/Modelling+Transport%2C+4th+Edition-p-9780470760390 (дата обращения: 22.12.2025).
 9. Wilson A. G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion, 1970. 166 p. URL: archive.org/details/entropyinurbanre0000wils (дата обращения: 22.12.2025).
 10. Suárez-Vega R., Gutiérrez-Acuña J., Rodríguez-Díaz M. Locating a supermarket using a locally calibrated Huff model. *Applied Geography*. 2015. Vol. 29. pp. 217-233. DOI: doi.org/10.1080/13658816.2014.958154
 11. Millard-Ball A., Hampshire R., Weinberger R. Parking behavior: the curious lack of cruising for parking in San Francisco. *Land Use Policy*. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.031
 12. Zhang J., Zheng Y., Qi D. Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 31, No. 1. DOI: doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10735
-

13. Molnar C. Interpretable Machine Learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable. 2nd ed. 2023. URL: christophm.github.io/interpretable-ml-book/ (дата обращения: 18.12.2025).
14. OpenStreetMap contributors. Planet dump. URL: openstreetmap.org (дата обращения: 18.12.2025)
15. Yuan Y., Raubal M., Liu Y. Correlating mobile phone usage and travel behavior—A case study of Harbin, China. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2012. Vol. 36, No. 2. P. 118–130. URL: scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=EjJ4kswAAAAJ&citation_for_view=EjJ4kswAAAAJ:ISLTfruPkqcC
16. Boeing G. Street Network Models and Indicators for Every Urban Area in the World. *SSRN Electronic Journal*. 2020. DOI: doi.org/10.2139/ssrn.3695331
17. Ерёмин И.Р., Никитин П.В. Анализ данных сервиса платной парковки для создания эффективной системы ценообразования для умного города (на примере Владивостока) // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. № 12. URL: moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1585

References

1. Shoup D. C. *The High Cost of Free Parking*. Chicago: Planners Press, 2005. 733 p. URL: routledge.com/The-High-Cost-of-Free-Parking/Shoup/p/book/9781932364965 (дата обращения: 18.12.2025).
 2. Pierce G., Shoup D. Getting the prices right: An evaluation of pricing parking by demand in San Francisco. *Journal of the American Planning Association*. 2013. Vol. 79, No. 1. pp. 67–81. DOI: doi.org/10.1080/01944363.2013.787307
 3. Ommeren J., Wentink D., Rietveld P. Empirical evidence on cruising for parking. *Transportation Research Part A*. 2012. Vol. 46, No. 1. pp. 123–130. DOI: doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.011
-



4. Huff D. L. Defining and estimating a trading area. *Journal of Marketing*. 1964. Vol. 28, No. 3. pp. 34–38. DOI: doi.org/10.2307/1249154
 5. Fotheringham A. S., O’Kelly M. E. *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 224 p. URL: research-portal.st-andrews.ac.uk/en/publications/spatial-interaction-models-formulations-and-applications/ (дата обращения: 22.12.2025)
 6. Haynes K. E., Fotheringham A. S. *Gravity and Spatial Interaction Models*. Beverly Hills: Sage Publications, 1984. 88 p. URL: archive.org/details/gravityspatialin0000hayn (дата обращения: 22.12.2025)
 7. Cheng J., Bertolini L. Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*. 2013. Vol. 32. pp. 95–105. DOI: doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.08.004
 8. Ortúzar J. de D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. 4th ed. Chichester: Wiley, 2011. 586 p. URL: wiley.com/en-us/Modelling+Transport%2C+4th+Edition-p-9780470760390 (дата обращения: 22.12.2025).
 9. Wilson A. G. *Entropy in Urban and Regional Modelling*. London: Pion, 1970. 166 p. URL: archive.org/details/entropyinurbanre0000wils (дата обращения: 22.12.2025).
 10. Suárez-Vega R., Gutiérrez-Acuña J., Rodríguez-Díaz M. Locating a supermarket using a locally calibrated Huff model. *Applied Geography*. 2015. Vol. 29. pp. 217-233. DOI: doi.org/10.1080/13658816.2014.958154
 11. Millard-Ball A., Hampshire R., Weinberger R. Parking behavior: the curious lack of cruising for parking in San Francisco. *Land Use Policy*. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.031
 12. Zhang J., Zheng Y., Qi D. Deep Spatio-Temporal Residual Networks for Citywide Crowd Flows Prediction. *Proceedings of the AAAI Conference on*
-



- Artificial Intelligence. 2017. Vol. 31, No. 1. DOI: doi.org/10.1609/aaai.v31i1.10735
13. Molnar C. Interpretable Machine Learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable. 2nd ed. 2023. URL: christophm.github.io/interpretable-ml-book/ (date assessed 18.12.2025).
14. OpenStreetMap contributors. Planet dump. URL: openstreetmap.org (date assessed 18.12.2025)
15. Yuan Y., Raubal M., Liu Y. Correlating mobile phone usage and travel behavior— A case study of Harbin, China. Computers, Environment and Urban Systems. 2012. Vol. 36, No. 2. pp. 118–130. URL: scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=EjJ4kswAAAAJ&citation_for_view=EjJ4kswAAAAJ:ISLTfruPkqcC
16. Boeing G. Street Network Models and Indicators for Every Urban Area in the World. SSRN Electronic Journal. 2020. DOI: doi.org/10.2139/ssrn.3695331
17. Eremin I.R., Nikitin P.V. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii. 2024. №12. URL: moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1585

Дата поступления: 25.12.2025

Дата публикации: 22.02.2026