

УДК 004.94; 656.1; 519.8

Перколяционный анализ транспортной сети с выявлением критических дорог.

© 2025 г. Е. С. Данович^{1,*}, В. А. Ивенин¹, О. О. Рыбалов¹, М. С. Титов¹

¹ Центральный университет, 123056, г. Москва, ул. Гашека, д. 7, стр. 1

Данная работа посвящена применению теории перколяции для комплексного анализа устойчивости городских транспортных сетей к деградации инфраструктуры. Исследование проведено на примере сетей Москвы, Северного административного округа и Замоскворечья, смоделированных как ориентированные графы с реалистичными параметрами потоков. Методология основана на анализе двух сценариев деградации сети: случайному выведении элементов из строя и целенаправленной атаке на наиболее критичные рёбра. Для оценки функциональной устойчивости системы использовались метрики связности сети (LCC) и эффективности маршрутизации (Efficiency). Полученные результаты показали, что случайные отказы элементов сети обеспечивают запас прочности вплоть до удаления 42% рёбер, однако целенаправленная атака на критические инфраструктурные элементы приводит к коллапсу при потере всего 28% наиболее важных участков. Исследование подтверждает необходимость учёта динамических характеристик транспортных потоков и фокусирования усилий на защите уязвимых элементов инфраструктуры. Полученные геопространственные визуализации позволяют локализовать наиболее критичные участки на карте города и прогнозировать распространение заторов при превышении порога перколяции. Применённые инструменты анализа (OSMnx, NetworkX, Folium, Kepler.gl) демонстрируют практическую применимость методологии для решения задач стратегического планирования развития городской транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: перколяция, транспортные сети, критические дороги, графовые модели, визуализация.

1 Введение

Транспортные сети представляют собой сложные инфраструктурные си-

стемы, подверженные постоянному риску сбоев, вызванных как естественными причинами (перегрузки

в часы пик, дорожно-транспортные происшествия, перекрытия), так и чрезвычайными ситуациями (стихийные бедствия, отказы ключевых инфраструктурных элементов, таких как кольцевые развязки или тоннели). Определение наиболее критичных участков сети, таких как мосты или ключевые перекрестки, и прогнозирование момента, когда сбои в работе отдельных, даже территориально небольших, участков сети могут приводить к нелинейным, каскадным эффектам, вызывающим масштабные заторы и паралич транспортного сообщения на обширных территориях, является актуальной задачей. Так, 11 декабря 2025 года ввиду перекрытия нескольких улиц в центре Москвы по данным сервиса «Яндекс.Карты» движение встало: 10-балльные пробки по всей Москве [4](рис. 1).

В качестве решения проблемы перегрузки центра, как на данном примере, было предложено перенести железнодорожные вокзалы за пределы МКАД [8, 9]. Такое решение уменьшило бы общий автомобильный трафик в пределах города, особенно в центральном транспортном узле, и позволило бы использовать освободившиеся территории для уменьшения плотности автомобилей, и с их помощью можно было бы избежать та-

кой проблемы.

Проблема определения критических элементов и порогов устойчивости транспортных сетей не является новой и активно исследуется в научной литературе с применением различных подходов, включая теорию сложных сетей и перколяционный анализ, доказательство возможности применения которого доказано в [1]. В дальнейшем теория перколяции была успешно применена для нахождения усовершенствованного подхода к выявлению критических рёбер в транспортных сетях [3, 7]. В последующих научных исследованиях учёные приходят к выводу, что для эффективного моделирования потоков, а также для нахождения наиболее критичных узлов сети целесообразно сначала провести глубокий структурный анализ всей сети, указав наиболее влиятельные компоненты, и только после этого выделять зону влияния каждого из них и рассматривать их отдельно друг от друга [2]. Изучение идеи учета динамики сети показывает, что простого топологического анализа недостаточно. Результаты исследования [3] свидетельствуют о том, что учет пространственно-временной сети является важным условием для точного прогнозирования критических рёбер в реальном или конкретно за-

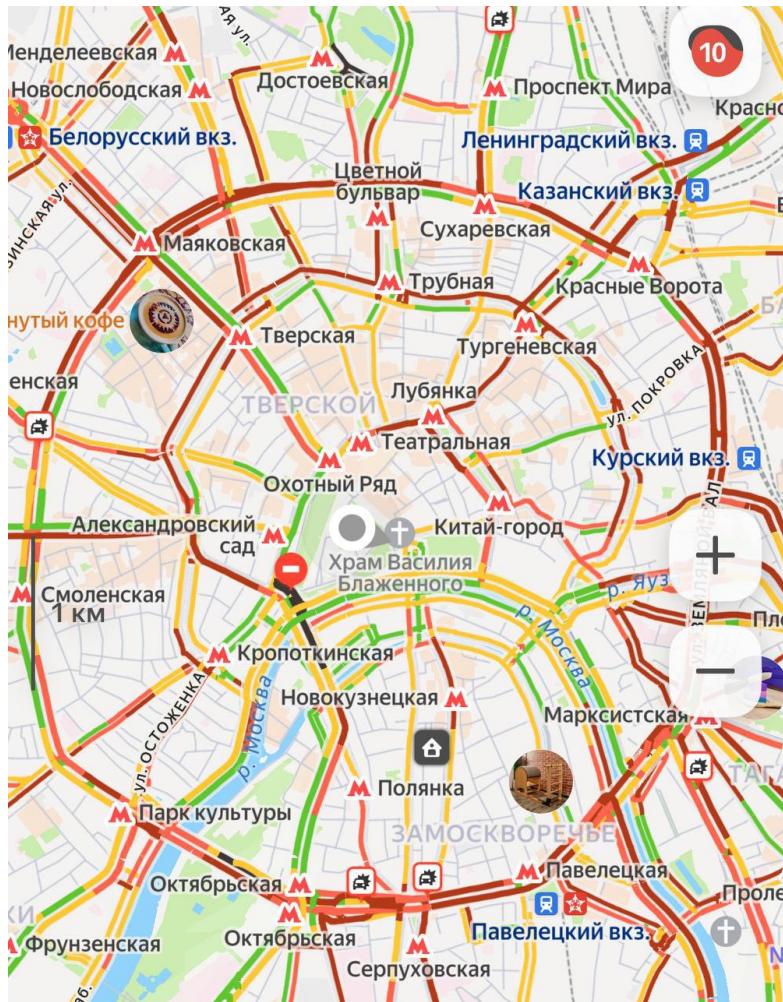


Рис. 1: Транспортная ситуация в Москве 11 декабря 2025 года по данным сервиса «Яндекс.Карты»

данном времени. Задача автоматизированного планирования сети лесных дорог [5] была решена в [6] с использованием графовой математической модели, что позволяет применить данный метод для аналогичного рассмотрения транспортной сети в городе.

Несмотря на наличие значительного объема исследований, посвященных отдельным аспектам анализа транспортных систем, остается не

до конца решенной задача комплексного применения теории перколяции для точного определения момента наступления момента потери связности транспортной сети в реальных городских сетях, подверженных отказам ключевых инфраструктурных элементов (мостов, перекрестков). Существующие работы часто фокусируются либо на абстрактных моделях, либо на качественной оценке критич-

ности. В данной статье мы стремимся заполнить этот пробел. Целью нашего исследования является разработка и аprobация количественной методологии, которая позволит не только точно найти критические дороги и мосты, оказывающие наибольшее влияние на пропускную способность системы, но и определить порог перекола – ту критическую долю отключенных дорог, при которой транспортная сеть необратимо теряет связность и перестает функционировать как единое целое.

2 Модели и методы

Для реализации поставленной цели необходима формулировка конкретных исследовательских задач и выбор верного научного аппарата. В данном исследовании транспортная инфраструктура разделяется на 3 различные начальные карты для Москвы целиком, для Северного Административного округа и для Замоскворечья и каждая моделируется как ориентированный граф $G = (V, E)$, где узлы V представляют собой ключевые транспортные развязки и перекрестки, а рёбра E соответствуют соединяющим их дорожным участкам. Каждой карте присваиваются атрибуты: Количество узлов, количество ребер и количество О-Д пар. Где набор О-Д

(Отправление-Назначение) пар находится путем выбора несколько точек в "центре" (условном центре, в зависимости от графа: для Москвы от центра города на 8 км радиус это примерно ТТК, для САО чуть больше 8 км берем, для Замоскворечья поменьше, в итоге чтобы в этом условном центральном районе было намного меньше точек чем на "периферии"), и несколько точек на "периферии". Далее создаем n пар между этими точками, где $n=5000$ для Москвы, $n=3000$ для САО и $n=1000$ для Замоскворечья, чтобы каждая пара была "центр""периферия". Таким образом мы будем смотреть на важность дорог, примерно моделируя утренний час пик когда все едят в центр. Мы предлагаем метод перехода от статичной структурной схемы к функциональной динамической модели, используя инструментарий теории перекола для симуляции процесса постепенного выведения элементов сети из строя. Центральным элементом предлагаемой методологии является моделирование случайной и целенаправленной деградации сети с постепенным ухудшением пропускной способности для последующего анализа функциональной устойчивости системы. Для каждой из них будут считаться метрики LCC — процентное со-

отношение количества существующих путей от любой точки до любой другой к количеству всех путей из всех точек и Efficiency — доля увеличения среднего времени пути при удалении каждого отдельного ребра. Где она рассчитывается формулой:

$$Efficiency = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$$

где:

- n — общее число узлов
- d_{ij} — кратчайшее время в пути между узлами i и j . Если пути нет, то $1/d_{ij} = 0$

Это позволяет установить критический порог перколяции (p_c). Дан- ный показатель представляет собой точное значение пропорции нефункциональных элементов инфраструктуры, при достижении которого про- исходит нелинейный фазовый пере- ход: единая транспортная система фрагментируется на изолированные сегменты, что приводит к наруше- нию ключевых транспортных потоков и системному коллапсу.

Для реализации исследования использовался комплекс методов тео- рии перколяции и современных про- граммных инструментов: библиотеки OSMnx, NetworkX, Folium и Kepler.gl. Актуальные географические данные загружались с помощью OSMnx, что

позволило получить реалистичную модель дорожной сети города, вклю- чая исследуемые мосты и перекрестки. Анализ и расчеты: основные вычисления и реализация алгорит- мов проводились на базе библиоте- ки NetworkX. Этот инструмент ис- пользовался для: постепенного уда- ления ребер, расчета метрик связ- ности сети, определения критическо- го порога перколяции (p_c), при ко- тором сеть теряет функциональность. Визуализация результатов: для на- глядного представления и интерпре- тации пространственных данных при- менялись инструменты интерактив- ной визуализации: Folium использо- вался для создания карт с выделением критических участков; Kepler.gl обес- печил возможность построения слож- ных многослойных геопространствен- ных визуализаций сценариев отказов и распространения заторов.

3 Результаты и обсужде- ние

В ходе исследования была успешно апробирована предложенная методо- логия на основе теории перколяции для анализа устойчивости транспорт- ной сети Москвы, САО и Замоскво- речья. Графики показывают зависи- мость параметра LCC от доли удален- ных ребер из всех ребер при случай-

ном удалении и при целенаправленном удалении наиболее важных элементов, а также зависимость метрики Efficiency, которая показывает то, насколько в общем больше в процентном соотношении стало добраться из одной точки графа в другую при удалении каждого ребра. График общей связности сети выглядит как сигмоида (см. рис. 2, рис. 3, рис. 4), а график Efficiency является гиперболой.

Моделирование показало, что при случайном выведении элементов из строя общая связность сети остается высокой вплоть до удаления значительной доли рёбер, что свидетельствует об определенном запасе прочности системы при непредсказуемых единичных сбоях. Однако моделирование целенаправленной атаки (удаление наиболее критичных, с точки зрения пропускной способности и центральности, рёбер) выявило более быстрое падение связности сети. На всех графиках видна ломаная линия для целенаправленной атаки, что свидетельствует о том, что после отключения самых важных дорог, сеть значительно ухудшает свою пропускную способность.

Было установлено точное значение порога перколяции для параметра LCC: $p_c = 0.42$ для случайного удаления и $p_c = 0.28$ для

целенаправленного удаления, и найдена критическая величина метрики Efficiency: $p_c = 0.2$. Этот результат подтверждает, что целенаправленные атаки на критические инфраструктурные элементы приводят к коллапсу сети быстрее, чем случайные отказы. Наглядные геопространственные визуализации, выполненные с помощью Folium и Kepler.gl, позволили локализовать наиболее уязвимые участки на карте города и продемонстрировали, как именно распространяются заторы при превышении установленного порога. Полученные количественные данные подтверждают гипотезу о том, что для предотвращения масштабного транспортного коллапса критически важно не только учитывать топологию сети, но и динамику потоков, а также фокусировать внимание на защите и резервировании конкретных ключевых инфраструктурных элементов.

4 Заключение

Моделирования показали, что при случайном выведении элементов из строя сеть демонстрирует плавный переход от связной системы к хаотичной и сохраняет связность вплоть до удаления 42% ребер. При этом моделирование целенаправленной атаки установило критический порог пер-

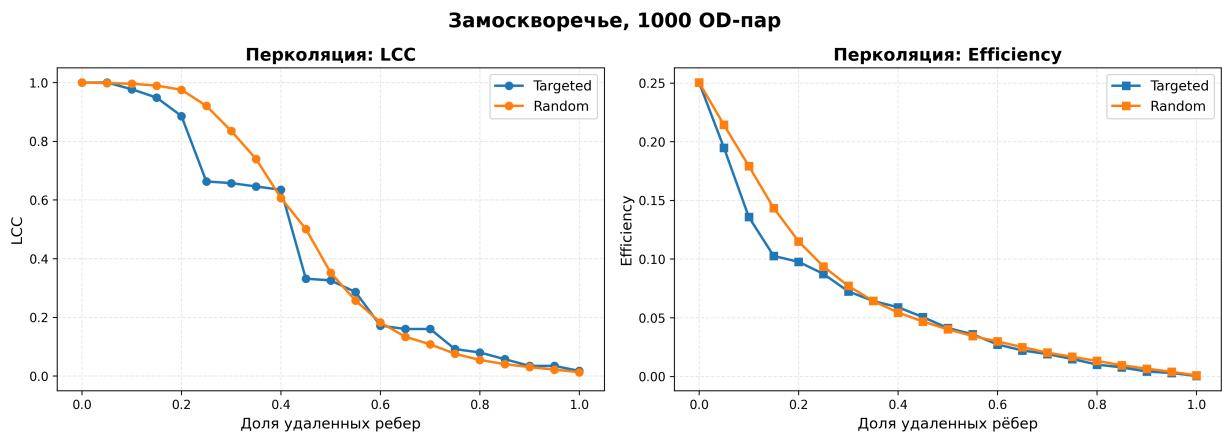


Рис. 2: Переколияционный анализ для Замоскворечья с 1000 OD-пар: зависимость LCC и Efficiency от доли удаленных ребер

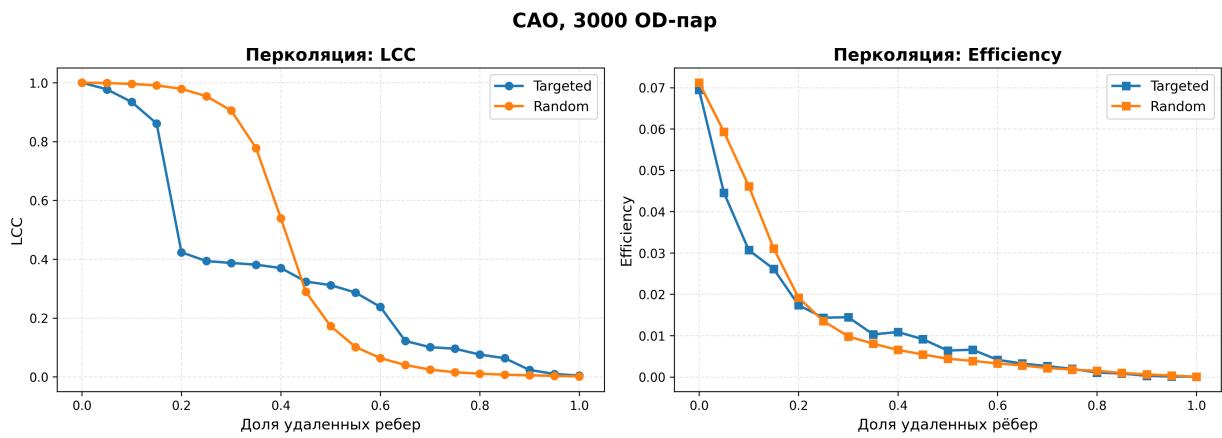


Рис. 3: Переколияционный анализ для САО с 3000 OD-пар: зависимость LCC и Efficiency от доли удаленных ребер

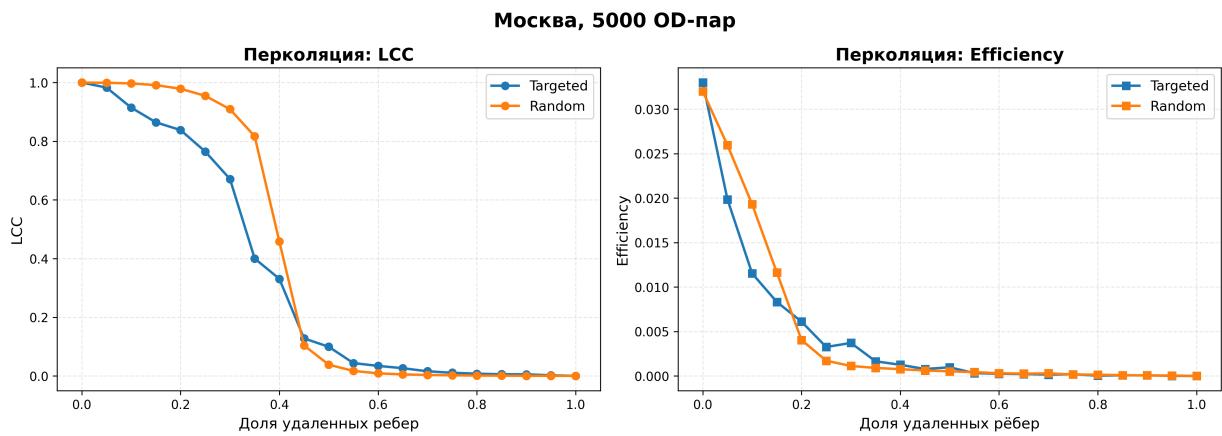


Рис. 4: Переколияционный анализ для Москвы с 5000 OD-пар: зависимость LCC и Efficiency от доли удаленных ребер

коляции ($p_c = 0.28$), при достижении которого потеря всего 28% ключевых рёбер приводит к катастрофической фрагментации транспортной системы и потере ее функциональной связности. Полученные количественные данные и визуализации подтверж-

жают необходимость учета динамических характеристик сети и фокусирования усилий на защите и резервировании конкретных уязвимых элементов инфраструктуры для предотвращения масштабных транспортных коллапсов.

Список литературы

- [1] Некрасова А. А., Соколов С. С. Исследование возможности применения теории переколяции для управления потоками данных в информационных сетях на транспорте // Сборник научных трудов Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 35. С. 138–146.
- [2] Хабаров В. И., Беков М. А., Квашнин В. Е. Критические объекты транспортной инфраструктуры мегаполисов и агломераций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (70). С. 20–27.
- [3] Гаспарян Г. А. Обнаружение критически важных звеньев в пространственно-временных маршрутных сетях с использованием теории сложных сетей // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2025. № 3. С. 131–142.
- [4] URL: <https://www.rbc.ru/society/11/12/2025/693ae9839a79476666be9d4c>
- [5] Пятин Д. С. Совершенствование методов решения задачи автоматизированного планирования сети лесных дорог // Современные проблемы лесного хозяйства : материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 127–131.
- [6] Катаров В. К., Рожин Д. В., Сюнёв В. С. Оптимальное проектирование сети лесных дорог: от методов к решениям // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 3. С. 32–47.

- [7] Баламирзоев А. Г., Батманов Э. З., Султанахмедов М. А., Муртузов М. М., Игитов Ш. М. Управление транспортными потоками на основе переколяционной стохастической модели // Информационные технологии в науке и образовании : материалы Всероссийской научно-практической конференции. Махачкала : АЛЕФ, 2019. С. 13–16.
- [8] Глухарев К. К., Вишнев И. П., Исаков А. В., Фролов К. В. Устройство транспортной системы и способ регулирования транспортно-пассажирским потоком мегаполиса: патент РФ №2104363, приоритет от 24 мая 1995 г.
- [9] Глухарев, К. К. О моделировании автомобильных потоков на магистральной сети / К. К. Глухарев, А. М. Валуев, И. Н. Калинин, Н. М. Улюков // Труды Московского физико-технического института. — 2013. — Т. 5, № 4 (20). — С. 102–114.

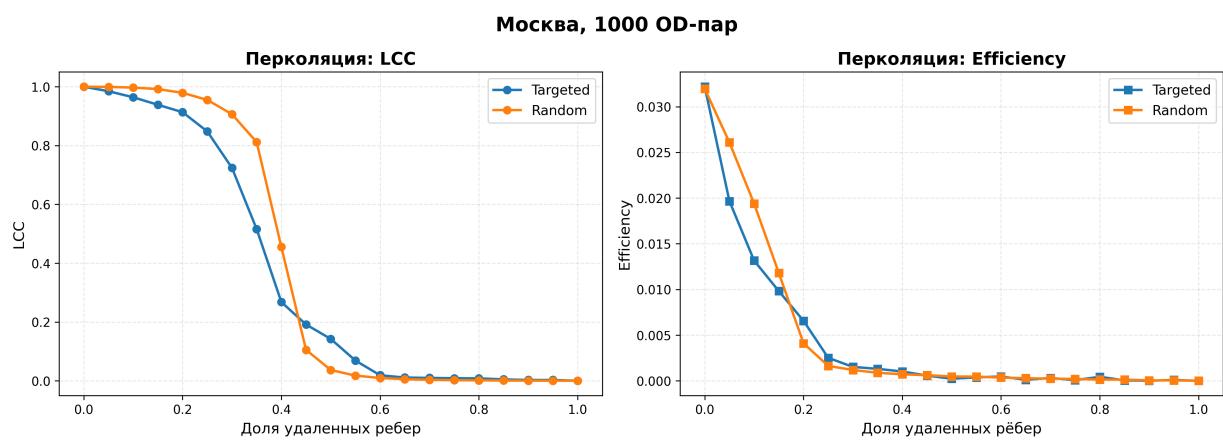


Рис. 5: Перколяционный анализ для Москвы с 1000 OD-пар: зависимость LCC и Efficiency от доли удаленных ребер