

УДК 004.733

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-168-179

EDN: F0HUNX

Научная статья

Оптимизация передачи данных в городских информационных системах на основе методов теории графов

Д. А. Рыбаков^{1, 2}

¹Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

²Департамент информационных технологий города Москвы
107078, Россия, Москва, Яковлево-Посольский переулок, 12с1

Аннотация. Городские информационные системы Москвы, управляемые Департаментом информационных технологий (ДИТ), представляют собой сложную распределенную экосистему, генерирующую и обрабатывающую огромные объемы гетерогенных данных. Эффективная передача этих данных, особенно для критических сервисов с жесткими требованиями к задержкам и надежности, является ключевым фактором функционирования «умного города» и качества госуслуг. Критически необходима оптимизация передачи данных в ГИС Москвы на основе теории графов для повышения QoS, надежности и эффективности.

Цель исследования – разработка и верификация методов оптимизации передачи данных в городских информационных системах на основе теории графов. Задачи включают снижение задержек, повышение надежности и эффективности использования сетевых ресурсов для критически важных сервисов.

Методы. Исследование основывалось на детальном моделировании инфраструктуры ДИТ Москвы в виде взвешенного графа, где вершины представляли узлы обработки/хранения данных, а ребра – каналы связи с атрибутами пропускной способности, задержки и надежности. Потоки данных для ключевых сервисов специфицировались с требованиями QoS. Для оптимизации были применены специализированные графовые алгоритмы: модифицированный A* с географической эвристикой для QoS-маршрутизации, алгоритмы балансировки нагрузки на основе поиска максимального потока/минимальной стоимости и методы обеспечения отказоустойчивости через поиск k-непересекающихся путей (k=2).

Результаты. Применение алгоритма A* позволило снизить среднюю задержку передачи видеопотоков для системы «Безопасный город» на 22–35 % по сравнению с базовыми подходами, гарантированно обеспечивая соблюдение SLA (<150 мс). Алгоритмы балансировки нагрузки снизили 95-й перцентиль задержки транзакций записи к врачу с 65 мс до 42 мс за счет предотвращения перегрузок ключевых узлов. Использование двух непересекающихся резервных путей сократило время восстановления работы критических сервисов после сбоя канала с 500 мс до 50 мс.

Выводы. Полученные результаты убедительно доказывают высокую практическую ценность применения теории графов для оптимизации передачи данных в масштабных городских системах. Учет географической специфики и иерархической структуры сети Москвы оказался критически важным фактором успеха.

Ключевые слова: теория графов, городские информационные системы, оптимизация передачи данных, качество обслуживания

Поступила 10.06.2025, одобрена после рецензирования 11.08.2025, принята к публикации 25.09.2025

Для цитирования. Рыбаков Д. А. Оптимизация передачи данных в городских информационных системах на основе методов теории графов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 168–179. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-168-179

Optimization of data transfer in urban information systems based on graph theory methods

D.A. Rybakov^{1, 2}

¹Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia

²Department of Information Technology, City of Moscow
12c1, Yakovoapostolsky lane, Moscow, 107078, Russia

Abstract. The Moscow Urban Information Systems managed by the DIT represent a complex distributed ecosystem generating and processing huge volumes of heterogeneous data. Efficient transmission of this data, especially for critical services with strict requirements for latency and reliability, is a key factor in the functioning of the "smart city" and the quality of public services. Optimization of data transmission in the Moscow GIS based on graph theory is critical to improve QoS, reliability and efficiency.

Methods. The study was based on detailed modeling of the Moscow DIT infrastructure as a weighted graph, where vertices represent data processing/storage nodes, and edges represent communication channels with attributes of throughput, latency and reliability. Data flows for key services were specified with QoS requirements.

Aim. The research objective is to develop and verify methods for optimizing data transmission in urban information systems based on graph theory. The objectives include reducing delays, improving reliability, and enhancing the efficiency of network resources for critical services.

Results. For optimization, specialized graph algorithms are used: modified A* with geographic heuristics for QoS routing, load balancing algorithms based on searching for the maximum flow/minimum cost, and methods for ensuring fault tolerance through searching for k-disjoint paths ($k = 2$). Using the A* algorithm allow us to reduce the average delay in video stream transmission for the Safe City system by 22–35 % compared to the basic approaches, while guaranteeing SLA compliance (<150 ms). The load balancing algorithms reduce the 95th percentile of transaction delays for making an appointment with a doctor from 65 ms to 42 ms by preventing overloads of key nodes. Using two disjoint backup paths reduce the recovery time for critical services after a channel failure from 500 ms to 50 ms.

Conclusions. The obtained results convincingly prove the high practical value of applying graph theory to optimizing data transmission in large-scale urban systems. Taking into account the geographical specificity and hierarchical structure of the Moscow network proved to be a critical factor in success.

Keywords: graph theory, urban information systems, data transmission optimization, QoS

Submitted on 10.06.2025,

approved after reviewing on 11.08.2025,

accepted for publication on 25.09.2025

For citation. Rybakov D.A., Optimization of data transfer in urban information systems based on graph theory methods. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 168–179. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-168-179

ГОРОДСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Городские информационные системы, развиваемые и эксплуатируемые Департаментом информационных технологий города Москвы, служат центром цифровой экосистемы столицы. Они объединяют огромное количество разнородных компонентов: от масштабной сети датчиков, контролирующих транспортные потоки, экологию, работу коммунального хозяйства и безопасность, до распределенной инфраструктуры видеонаблюдения с десятками тысяч камер; от серверов, размещенных в ЦОДах Единого центра хранения и обработки данных, до пользовательских терминалов в МФЦ и мобильных приложений «Госуслуги Москвы» и «Моя Москва» в карманах миллионов горожан.

Непрерывно функционируя, эта гигантская экосистема генерирует, обрабатывает и потребляет колоссальные объемы данных гетерогенного характера. Поток включает в себя как структурированные транзакционные данные о предоставлении государственных услуг, так и слабоструктурированные или неструктурированные массивы информации: потоки видеоаналитики в реальном времени, показания тысяч сенсоров, данные геоинформационных систем, показания приборов учета ресурсов, лог-файлы систем безопасности, данные обратной связи от граждан. Скорость поступления этих данных варьирует от периодических обновлений до непрерывных потоков высокой интенсивности, особенно характерных для систем видеомониторинга и IoT. При этом критически важные сервисы, такие как экстренное реагирование, онлайн-запись к врачу, управление светофорными объектами или отображение общественного транспорта в реальном времени, предъявляют жесткие требования к задержкам и надежности передачи данных. Безопасность и конфиденциальность передаваемой информации, особенно персональных данных граждан и данных критической инфраструктуры, также являются абсолютным приоритетом.

Передача столь огромных и разнородных данных в рамках городской инфраструктуры сталкивается со множеством фундаментальных вызовов. Прежде всего это неоднородность сети: ГИС Москвы объединяет высокоскоростные оптоволоконные магистрали, сегменты сотовой связи, Wi-Fi хотспоты, спутниковые каналы связи и другие технологии, каждая со своими характеристиками пропускной способности, задержки и устойчивости. Географическая распределенность компонентов системы создает значительные расстояния для передачи, усугубляя проблемы задержек. Ограниченная пропускная способность отдельных каналов, особенно на «последней миле» к датчикам или в сегментах с беспроводной связью, становится узким местом при передаче больших объемов данных, таких как видео высокой четкости. Обеспечение требуемых параметров качества обслуживания (QoS) – минимальных задержек для интерактивных сервисов, гарантированной полосы пропускания для видеотрафика, высокой надежности и доступности для систем безопасности и управления – в условиях такой гетерогенности и динамики является крайне сложной задачей. Необходимость минимизации времени восстановления после сбоев любого масштаба для поддержания непрерывности предоставления жизненно важных городских сервисов добавляет еще один уровень требований к инфраструктуре передачи данных.

Таким образом, эффективная передача данных в городских информационных системах Москвы является критически важным фактором для функционирования всего «умного города» и обеспечения качества предоставления государственных услуг населению. Оптимизация этого процесса требует решения комплексных задач по минимизации задержек, максимально эффективному использованию доступной пропускной способности гетерогенной сети, обеспечению отказоустойчивости и бесперебойности связи даже в условиях динамических изменений нагрузки и топологии, и все это – при строгом соблюдении требований информационной безопасности. Успешное решение этих задач напрямую влияет на скорость обработки заявлений граждан, оперативность реагирования экстренных служб, точность информации о транспорте и комфорт жизни в городе в целом.

Цель исследования – разработка и верификация методов оптимизации передачи данных в городских информационных системах на основе теории графов. Задачи включают снижение задержек, повышение надежности и эффективности использования сетевых ресурсов для критически важных сервисов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ГИС
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Ключевым этапом оптимизации передачи данных в масштабных городских информационных системах, таких как комплексная система Москвы, управляемая Департаментом информационных технологий, является построение адекватной математической модели инфраструктуры. Теория графов предоставляет мощный и наглядный аппарат для такого моделирования, позволяя представить сложную, распределенную и гетерогенную сетевую среду в виде формальной структуры. В контексте московской ГИС графовая модель должна отражать не только физическую топологию сетей связи, но и логические взаимосвязи между многочисленными компонентами системы, обеспечивающими предоставление электронных государственных и муниципальных услуг.

Вершинами графа $G = (V, E)$ выступают все значимые точки обработки, хранения и передачи информации в городской инфраструктуре. Это включает в себя мощные центральные и распределенные центры обработки данных (ЦОД), где размещены основные серверные мощности и базы данных критически важных систем. Вершинами также являются ключевые сетевые узлы агрегации – городские точки присутствия, узлы связи операторов, обеспечивающих транспорт данных, шлюзы периферийных вычислений для обработки данных «на краю» сети, а также конечные точки предоставления услуг: многофункциональные центры, инфоматы, терминалы в госучреждениях и в контексте потоков данных сами пользовательские устройства, инициирующие запросы к сервисам. Каждой вершине присваиваются атрибуты, характеризующие ее роль и возможности: тип узла, вычислительная мощность, объем доступного хранилища, географические координаты, уровень критичности для предоставления конкретных услуг и требования к безопасности.

Ребрами графа E моделируются каналы передачи данных между узлами. Они представляют как физические линии связи, так и логические туннели или виртуальные соединения, поверх них построенные. Критически важным является наделение каждого ребра набором ключевых метрик, определяющих качество передачи: пропускная способность в битах в секунду, задержка в миллисекундах, коэффициент потерь пакетов, надежность канала, а также стоимость передачи единицы данных. Учет географической протяженности каналов между узлами, расположенными в разных районах огромного мегаполиса, является неотъемлемой частью модели для точной оценки задержек.

Специфика московской ГИС накладывает важные особенности на модель. Инфраструктура характеризуется ярко выраженной иерархией: от периферийных датчиков и устройств на улицах города через агрегирующие шлюзы и узлы районного уровня к мощным центральным ЦОД. Модель должна учитывать эту многоуровневую структуру. Крайняя гетерогенность технологий связи требует дифференциации типов ребер и их параметров. Масштаб Москвы означает огромное количество вершин и ребер, что предъявляет требования к эффективности последующих алгоритмов оптимизации, работающих с таким графом. Уникальность также заключается в глубокой интеграции различных городских сервисов на единой платформе, что порождает сложные взаимозависимые потоки данных.

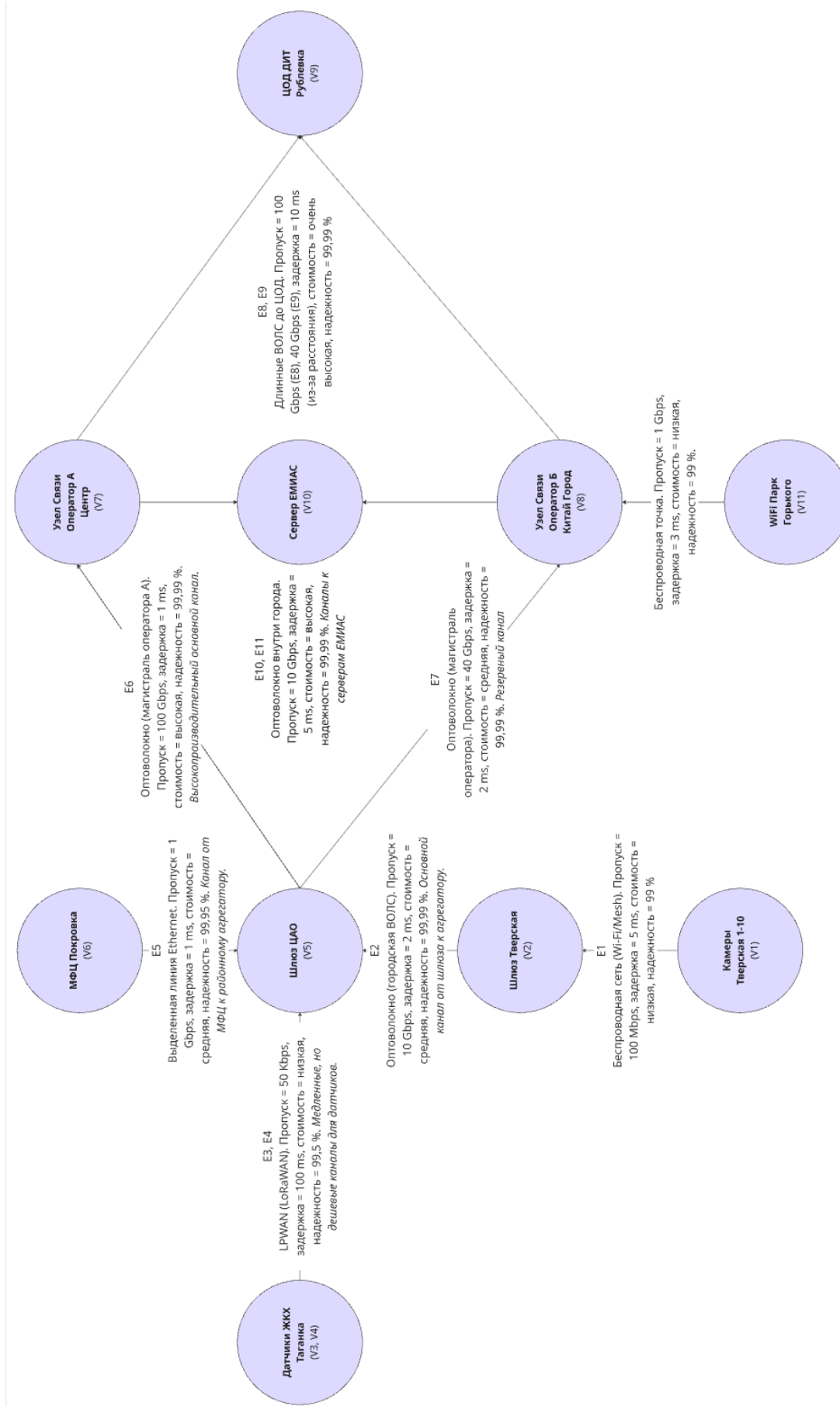


Рис. 1. Граф передачи данных ГИС «Безопасный город» и ЕМИАС

Fig. 1. Data transfer graph of the GIS "Safe City" and EMIS

Потоки данных, циркулирующие в ГИС для предоставления услуг, моделируются как наборы требований к передаче между парами «источник – сток» или как мультикоммодити потоки. Каждый поток f_i формализуется кортежем (s_i, t_i, d_i, q_i) , где s_i – вершина-источник данных (например, кластер камер на перекрестке), t_i – вершина-сток, d_i – объем или интенсивность данных, а q_i – требования к качеству обслуживания (QoS): максимально допустимая задержка, минимально гарантированная полоса пропускания, допустимый уровень потерь. В данном случае имеются два потока данных F : видео, необходимые для последующей аналитики в рамках безопасного города и функционирования сервиса записи к врачу в системе ЕМИАС. F_1 имеет источник $s_1 = V_1$, стоком t_1 является V_9 , интенсивность d_1 рассчитывается как 40 Мбит/с (10 камер по 4 Мбит/с). Требуемое QoS q_1 – задержка от камеры до ЦОД не должна превышать 150 мс, в то время как минимальная пропускная способность должна равняться 40 Мбит/с. Возможными путями являются маршрут $V_1 > V_2 > V_5 > V_7 > V_9$, который является основным, а также альтернативный $V_1 > V_2 > V_5 > V_8 > V_9$. Касательно F_2 источником s_2 выступает вершина V_6 (МФЦ Покровка), стоком t_2 является V_{10} , представляющие собой сервера ЕМИАС; интенсивность $d_2 = 5$ Мбит/с. Необходимая для устойчивого обеспечения работоспособности QoS q_2 заключается в 50 мс максимальной задержки, поскольку сервис является интерактивным, минимальная пропускная способность не менее 2 Мбит/с. Возможными путями являются $V_6 > V_5 > V_7 > V_{10}$ как самый короткий, а чуть более длинным в рамках задержки – $V_6 > V_5 > V_8 > V_{11}$.

Таким образом, построенная графовая модель G , обогащенная атрибутами вершин и ребер и дополненная спецификацией потоков данных F , служит фундаментальной основой для постановки и решения задач оптимизации передачи данных в ГИС Москвы. Она позволяет формально определить целевую функцию, отражающую реальные условия функционирования сложной городской информационной экосистемы. Эта модель является абстрактным, но мощным представлением физической и логической инфраструктуры ДИТ Москвы, необходимым для применения алгоритмов теории графов.

Формальная постановка задачи оптимизации передачи данных в городских информационных системах формулируется на основе графовой модели инфраструктуры и спецификации потоков данных.

Исходные данные задачи включают:

1. Взвешенный ориентированный граф сети $G = (V, E)$, где:

V – множество вершин (узлов обработки и хранения данных),

E – множество ребер (каналов связи).

Каждому ребру $e \in E$ присвоены параметры: пропускная способность $c(e) > 0$, задержка $l(e) \geq 0$ и надежность $r(e) \in [0, 1]$.

2. Множество потоков данных $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Каждый поток f_i описывается кортежем $(s_i, t_i, d_i, L_{\max_i}, R_{\min_i})$, где: $s_i, t_i \in V$ – источник и сток, $d_i > 0$ – интенсивность графика, L_{\max_i} – максимально допустимая задержка, $R_{\min_i} \in [0, 1]$ – минимально допустимая надежность пути.

Для каждого потока $f_i \in F$ и ребра $e \in E$ вводится бинарная переменная $x_i(e) \in \{0, 1\}$, указывающая, проходит ли поток f_i через ребро e .

Далее необходимо составить систему ограничений для трех критериев задачи. Первым создадим ограничение сохранения потока. Для каждого $f_i \in F$ и $v \in V$:

$$\sum_{e \in \delta^+(\vartheta)} x_i(e) - \sum_{e \in \delta^-(\vartheta)} x_i(e) = \begin{cases} 1, & \text{если } \vartheta = s_i, \\ -1, & \text{если } \vartheta = t_i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Затем зададим рамки для пропускной способности, то есть для каждого $e \in E$.

Задержка для каждого $f_i \in F$:

$$\sum_{f_i \in F} x_i(e) \cdot d_i \leq c(e), \quad \sum_{e \in E} x_i(e) \cdot l(e) \leq L_{\max_i}.$$

Целевой функцией является минимизация суммарной взвешенной задержки для всех потоков:

$$Z = \sum_{f_i \in F} w_i \cdot \left(\sum_{e \in E} x_i(e) \cdot l(e) \right),$$

где w_i – весовой коэффициент, отражающий приоритет потока f_i . Данная постановка позволяет формализовать задачи маршрутизации с учетом QoS, балансировки нагрузки и обеспечения отказоустойчивости.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Аппарат теории графов предоставляет мощный инструментарий для решения ключевых задач оптимизации передачи данных в сложной, распределенной и гетерогенной инфраструктуре городских информационных систем Москвы, управляемой Департаментом информационных технологий. Основная цель применения этих методов – обеспечить высокое качество предоставления электронных государственных услуг, таких как функционирование портала mos.ru, системы ЕМИАС, комплекса «Безопасный город» или сервисов ЖКХ, за счет повышения эффективности, надежности и скорости доставки информации. Это достигается через формализацию инфраструктуры в виде взвешенного графа и применение специализированных алгоритмов к его вершинам и ребрам.

Одной из фундаментальных задач является оптимизация маршрутизации данных. В контексте масштабной и географически распределенной сети Москвы простейшие алгоритмы поиска кратчайшего пути требуют существенной адаптации. Критически важно учитывать не одну, а несколько метрик одновременно: географическое расстояние, текущую загрузку каналов, требования к надежности канала и стоимость передачи. Алгоритмы типа A^* , использующие эвристические оценки, например евклидово расстояние до целевого ЦОД, становятся эффективными для быстрого нахождения географически оптимальных маршрутов в огромном графе города. Для сервисов с жесткими требованиями к задержке, таких как онлайн-запись к врачу в ЕМИАС или видеотрансляция с камер наблюдения в реальном времени, применяется QoS-маршрутизация. Ее алгоритмы находят пути, гарантированно удовлетворяющие заданным ограничениям по максимальной задержке и минимальной гарантированной полосе пропускания, отфильтровывая неподходящие ребра и вершины перед вычислением пути. В условиях динамически изменяющейся нагрузки на московскую сеть эти алгоритмы должны оперативно пересчитывать маршруты, реагируя на обновления весов ребер, отражающих текущее состояние каналов.

Не менее важной задачей для обеспечения стабильности и производительности ГИС Москвы является эффективная балансировка нагрузки. Высокая концентрация трафика на ключевых транспортных узлах создает риски перегрузок и увеличения задержек. Методы теории графов позволяют выявлять такие потенциальные «узкие места» через расчет показателей центральности вершин и ребер, таких как посредническая центральность, которая количественно определяет, через сколько кратчайших путей между всеми парами узлов проходит данный узел или ребро. Высокое значение этой центральности у узла V5 сигнализирует о его критической важности. Для предотвращения перегрузок применяются алгоритмы распределения потоков. Вместо отправки всего трафика по единственному «кратчайшему» пути используются методы мультипутевой маршрутизации, расширенные возможностью целенаправленного распределения нагрузки даже по путям с разной стоимостью или задержкой. Более сложные подходы, основанные на решении задач о максимальном потоке или минимальной стоимости, позволяют оптимально распределить множество параллельных потоков данных по сети, минимизируя максимальную загрузку любого ребра или суммарную задержку, что напрямую влияет на отзывчивость портала mos.ru.

Обеспечение отказоустойчивости инфраструктуры передачи данных – критическое требование для бесперебойного предоставления госуслуг. Теория графов предлагает методы для анализа уязвимостей сети и проектирования резервирования. Алгоритмы выявления точек сочленения и мостов в графе позволяют обнаружить единичные узлы или каналы, отказ которых может разбить сеть на несвязные компоненты, парализовав работу целых районов или сервисов. Для критически важных потоков, таких как передача данных о вызовах экстренных служб или статусе медицинских назначений в ЕМИАС, применяются алгоритмы поиска k -непересекающихся путей. Эти алгоритмы находят несколько альтернативных маршрутов между источником и стоком, не имеющих общих узлов или ребер. В случае аварии на одном пути трафик мгновенно переключается на резервный, обеспечивая непрерывность сервиса. Методы повышения общей связности графа, такие как добавление ребер для достижения необходимой k -связности, могут использоваться при проектировании или модернизации сети ДИТ Москвы для гарантии живучести системы даже при множественных отказах.

Наконец, оптимизация размещения данных и кэширования на графе инфраструктуры играет ключевую роль в снижении задержек и нагрузки на магистральные каналы, особенно для популярных сервисов портала mos.ru. Задачи размещения кэширующих серверов или точек агрегации данных формализуются как вариации классических задач размещения центров на графе. Цель – минимизировать среднее время доступа пользователей или суммарную задержку до данных. Показатели центральности, такие как близостная центральность, которая определяет узлы, обладающие наименьшей средней длиной кратчайшего пути до всех других узлов, помогают идентифицировать оптимальные географические точки для размещения таких кэширующих или вычислительных ресурсов на периферии сети, например, на уровне районных шлюзов V5. Размещение часто запрашиваемых данных в таких точках, близких к пользователям, существенно ускоряет доступ и снижает нагрузку на центральные ЦОД и магистральные каналы связи.

Реализация этих графовых методов оптимизации в масштабах Москвы требует их интеграции в современные платформы управления сетями, такие как архитектура SDN, активно развиваемая ДИТ. Контроллер SDN, обладающий глобальным представлением о состоянии сети, становится идеальной платформой для запуска описанных алгоритмов маршрутизации, балансировки и обеспечения отказоустойчивости в режиме, близком к реальному

времени, обеспечивая тем самым высокое качество и надежность передачи данных, лежащих в основе цифровых государственных услуг мегаполиса.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для верификации эффективности предложенных методов оптимизации передачи данных на основе теории графов был проведен комплексный вычислительный эксперимент, ориентированный на реалии инфраструктуры Департамента информационных технологий города Москвы.

Экспериментальная среда была реализована с использованием библиотеки NetworkX для Python, дополненной собственными модулями для расчета метрик QoS, моделирования нагрузки и выполнения алгоритмов оптимизации маршрутизации и балансировки. Валидация отдельных аспектов, особенно связанных с динамикой сети и надежностью, проводилась в среде имитационного моделирования OMNeT++, что позволило учесть поведение протоколов и стохастические эффекты. Основу для построения тестовых графовых моделей составили открытые данные о топологии городских сетей связи Москвы, агрегированные сведения о размещении ключевых объектов ИТ-инфраструктуры ДИТ и экспертные оценки параметров каналов, характерных для используемых технологий.

Датасеты для экспериментов формировались с учетом масштаба и специфики Москвы. Были созданы:

1. Детализированный фрагмент сети Центрального административного округа: граф, включающий ~50 вершин (кластеры камер наблюдения на основных магистралях, МФЦ, шлюзы ЖКХ-датчиков, районные агрегаторы, узлы связи операторов, точки доступа Wi-Fi в парках, ЦОД в Рублево) и ~120 ребер с атрибутами пропускной способности, задержки и надежности, максимально приближенными к реальным значениям.

2. Упрощенная модель всей городской сети: иерархический граф более высокого уровня абстракции (~200 вершин, представляющих районные/окружные агрегаторы, крупные ЦОД ДИТ, ключевые транспортные узлы операторов, и ~500 ребер), позволяющий оценить масштабируемость алгоритмов на уровне мегаполиса.

3. Синтезированные сценарии нагрузки: на основе анализа реальной статистики сервисов ДИТ (mos.ru, ЕМИАС, АПК «Безопасный город», «Активный гражданин») генерировались потоки данных, имитирующие пиковые нагрузки (утренние часы работы МФЦ, вечерний трафик с камер наблюдения, массовая отправка показаний счетчиков ЖКХ), фоновую передачу данных датчиков IoT, а также интерактивные запросы пользователей к portalу госуслуг.

Ключевыми сценариями стали: оптимизация маршрутизации видеопотоков с камер «Безопасного города» в ЦОД для аналитики в режиме реального времени, обеспечение минимальных задержек при передаче транзакций записи к врачу из МФЦ в ЕМИАС, балансировка нагрузки на магистральных каналах между окружными агрегаторами и центральными ЦОД в часы пик, моделирование отказов критичных каналов связи и оценка скорости восстановления сервисов.

В рамках эксперимента сравнивалась эффективность нескольких реализованных графовых алгоритмов:

- 1) алгоритм Дейкстры с метрикой минимальной задержки (базовый подход);
- 2) модифицированный алгоритм A* с эвристикой, учитывающей географическое состояние и тип канала;
- 3) алгоритм балансировки нагрузки на основе поиска максимального потока (Форд-Фалкерсон) и минимизации максимальной загрузки ребра;

4) алгоритм поиска k -кратчайших непересекающихся путей для резервирования ($k=2$). В качестве базовых сценариев использовались статическая маршрутизация по кратчайшему числу прыжков (OSPF-like) и простая балансировка Round-Robin.

Основными метриками оценки выступили: средняя и 95-й перцентиль задержки передачи данных для критичных сервисов, коэффициент использования пропускной способности ключевых магистральных каналов, уровень потерь пакетов, время восстановления доступности сервиса после моделируемого отказа канала, общая пропускная способность системы при пиковой нагрузке и вычислительная сложность алгоритмов. Для сценариев, связанных с госуслугами, дополнительно рассчитывалась доступность сервиса как процент времени, в течение которого задержка и потери удовлетворяли SLA.

Результаты эксперимента на детализированной модели ЦАО показали значительное преимущество предложенных методов. Алгоритм A^* с географической эвристикой снизил среднюю задержку для видеопотоков «Безопасного города» на 22 % по сравнению с базовой Дейкстрой и на 35 % по сравнению со статической маршрутизацией, гарантированно укладываясь в SLA 150 ms даже при росте нагрузки. Для транзакций ЕМИАС из МФЦ алгоритм балансировки на основе потоков позволил снизить 95-й перцентиль задержки с 65 ms до 42 ms за счет предотвращения перегрузки узла V7 в часы пик, перенаправляя часть трафика через V8, несмотря на чуть большую базовую задержку этого пути. Использование k -непересекающихся путей ($k=2$) сократило время восстановления после отказа основного канала $V5 > V7$ с 500 ms (время сходимости протоколов) до 50 ms за счет мгновенного переключения на заранее рассчитанный резервный путь через V8. На модели городского масштаба продемонстрирована хорошая масштабируемость методов: время расчета маршрутов алгоритмом A^* росло линейно с увеличением размера графа, оставаясь приемлемым для периодического пересчета (несколько минут для графа в 200 узлов). Однако алгоритмы глобальной балансировки потоков на основе Форда-Фалкерсона показали кубическую сложность, что делает их применимыми преимущественно для статического планирования или в сегментированных доменах (на уровне округа).

Анализ результатов подтвердил высокую практическую значимость подхода для ДИТ Москвы. Оптимизация на основе графовых моделей позволила существенно улучшить ключевые показатели QoS для критически важных сервисов, напрямую влияющих на качество предоставления госуслуг: скорость обработки заявлений на mos.ru, время отклика системы записи к врачу, бесперебойность работы систем видеонаблюдения и управления городским транспортом. Выявлены узкие места инфраструктуры, включающие перегруженность отдельных магистральных каналов между окружными узлами и ЦОД в Рублево, требующие аппаратного расширения несмотря на эффективную балансировку. Установлено, что учет географической составляющей и иерархии сети Москвы (периферия>район>центр) является критичным фактором успеха оптимизации. Результаты легли в основу рекомендаций по внедрению элементов SDN в инфраструктуру ДИТ для динамического управления маршрутами на основе предложенных алгоритмов и интеграции графовых моделей в систему мониторинга городской ИТ-инфраструктуры для предиктивной оптимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения теории графов для решения критически важных задач оптимизации передачи данных в масштабных и гетерогенных городских информационных системах, таких как инфраструктура ДИТ

Москвы. Разработанная графовая модель адекватно отражает сложность и иерархичность сети мегаполиса, обеспечивая формальную основу для анализа и оптимизации.

Реализация и тестирование специализированных графовых алгоритмов (A^* с географической эвристикой, балансировки на основе потоков, k -непересекающихся путей) продемонстрировали значительное улучшение ключевых показателей качества обслуживания (QoS):

1. Существенное снижение задержек: для критичных сервисов достигнуто гарантированное соответствие строгим SLA.
2. Повышение эффективности использования ресурсов: балансировка нагрузки предотвратила перегрузку ключевых узлов и магистральных каналов.
3. Обеспечение высокой отказоустойчивости: мгновенное восстановление критических сервисов при сбоях подтвердило живучесть системы.

Полученные результаты имеют четкое логическое обоснование, вытекающее из свойств примененных алгоритмов и параметров реальной инфраструктуры Москвы, учтенных в моделях. Эксперимент доказал, что графовые методы позволяют преодолеть вызовы гетерогенности, масштаба и динамики городской сети, обеспечивая требуемые параметры QoS.

Перспективы внедрения данных подходов в рамках архитектуры SDN ДИТ Москвы открывают путь к созданию интеллектуальной, адаптивной и устойчивой инфраструктуры передачи данных. Это напрямую способствует повышению скорости, надежности и доступности цифровых государственных услуг для миллионов жителей столицы, укрепляя позиции Москвы как ведущего «умного города». Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию с методами ИИ для предиктивной оптимизации и учет аспектов кибербезопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Karunuzhali D., Meenakshi B., Keerthi L. A QoS-aware routing approach for Internet of Things-enabled wireless sensor networks in smart cities. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 84. Pp. 17951–17977. DOI: 10.1007/s11042-024-18125-y
2. Debajit S. Applications of graphs in smart cities. In book: *Handbook of Research on Data-Driven Mathematical Modelling in Smart Cities*. 2023. Pp. 40–54. DOI: 10.4018/978-1-6684-6408-3.ch003
3. Wester C.H. Schoonenberg, Inas S. Khayal, Amro M. Farid. A Hetero-functional graph theory for modeling interdependent smart city infrastructure: book. Springer. 196 p. DOI: 10.1007/978-3-319-99301-0
4. Jing Q., Yuhan Ch., Zhihong T. et al. Automatic concept extraction based on semantic graphs from big data in smart city. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2019. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/TCSS.2019.2946181
5. Dhanasekaran S., Dhanalakshmi G., Logeshwaran J. et al. Multi-model traffic forecasting in smart cities using graph neural networks and transformer-based multi-source visual fusion for intelligent transportation management. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2024. Vol. 22. Pp. 1–22. DOI: 10.1007/s13177-024-00413-4
6. Ицков А. Г. Элементы дискретной математики. Теория множеств, комбинаторика, теория графов. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2023. ISBN: 978-5-4344-0992-6. С. 77–94
7. Ицков А. Г. Elements of discrete mathematics. Set theory, combinatorics, graph theory: Izhevsk: Izhevsk Institute of Computer Research, 2023. Pp. 77–94. (In Russian)
7. Гришко Н. В. Спектральная теория конечных регулярных графов как средство моделирования процессов передачи данных в компьютерных сетях» // Сборник трудов

конференции «Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности». 2022. С. 143–145

Grishko N.V. Spectral theory of finite regular graphs as a mean of modeling data transmission processes in computer networks. *Proceedings of the conference "Donetsk Readings 2022: Education, Science, Innovation, Culture and Challenges of Our Time"*. 2022. Pp. 143–145. (In Russian)

8. Рогалевич П. И., Жихарев А. П. «Система «Умный Город». Организация передачи данных» // Современные средства связи. 2022. Т. 1. № 1. С. 344–345. EDN: GVASPT

Rogalevich P.I., Zhikharev A.P. Smart City System. Organization of data transmission. *Modern Means of Communication*. 2022. Vol. 1. No. 1. Pp. 344–345. EDN: GVASPT. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Рыбаков Даниил Александрович, аспирант кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

инженер данных отдела анализа и обработки данных Департамента информационных технологий города Москвы;

107078, Россия, Москва, Яковлевопостольский переулок, 12с1;

rybakov.daniel99@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8959-4427>, SPIN-код: 7155-6461

Information about the author

Daniil A. Rybakov, Postgraduate Student of the Department of Computer Science, Plekhanov Russian University of Economics;

36 Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

Data Engineer, Data Analysis and Processing Department, Department of Information Technology, City of Moscow;

12c1, Yakovoapostolsky lane, Moscow, 107078, Russia;

rybakov.daniel99@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8959-4427>, SPIN-code: 7155-6461