

## Графовая модель распределённых вычислительных систем на базе облачных, туманных и граничных технологий для оптимизации потоков данных

*В.А. Черепенин<sup>1</sup>, Д.С. Пантелеев<sup>2</sup>, С.П. Воробьев<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация*

*<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Российская Федерация*

**Аннотация:** В работе представлен результат анализа современных подходов к организации распределённых вычислительных архитектур, объединяющих облачные, туманные и граничные уровни. Исследованы ограничения существующих моделей, не обеспечивающих целостного описания потоков данных и динамики взаимодействия вычислительных узлов. Предложена адаптивная графовая модель, в которой вычислительная система формализуется как взвешенный ориентированный граф с параметрами задержки, пропускной способности и энергопотребления. Модель реализована в среде графовой базы данных и предназначена для многокритериальной оптимизации маршрутов обмена информацией. Приведены зависимости для расчёта характеристик потоков и механизм выбора оптимальных маршрутов с учётом QoS-показателей. Практическая применимость концепции подтверждается возможностью её интеграции в инфраструктуры Интернета вещей, интеллектуальные производственные и транспортные системы, где требуется снижение задержек и повышение устойчивости вычислительной архитектуры.

**Ключевые слова:** распределённая вычислительная система, облачные вычисления, туманные вычисления, граничные вычисления, графовая модель, поток данных, оптимизация маршрута, многокритериальная оптимизация, пропускная способность, задержка передачи, энергопотребление, цифровой двойник, интернет вещей, база данных, алгоритм дейкстры.

Развитие концепции распределённых вычислительных систем сопровождается стремительным расширением исследовательских направлений, в центре которых находятся вопросы интеграции облачных (Cloud), туманных (Fog) и граничных (Edge) технологий, а также поиск эффективных графовых моделей представления потоков данных и межуровневых взаимодействий. Проведённый анализ современных прикладных публикаций демонстрирует наличие целого спектра инженерно реализованных решений, при этом выявляет и определённые методологические и архитектурные ограничения, требующие дальнейшей формализации.

Исследования Ф. Бриаторе и М. Бразжо [1], а также А.С.А. Мутханны [2] представляют собой примеры построения многоуровневых инфраструктур, объединяющих вычислительные мощности различных слоёв с целью повышения производительности и минимизации сетевых задержек. Концептуальным преимуществом указанных разработок является реализация распределённой логики принятия решений, при которой обработка части данных осуществляется на периферийных и промежуточных уровнях, а агрегирование и долговременное хранение — в облачной среде. Такая организация потоков доказала свою эффективность при управлении изменяющейся нагрузкой и адаптации вычислительных процессов в реальном времени. Тем не менее большинство предложенных архитектур остаются недостаточно чувствительными к динамике взаимосвязей между вычислительными узлами. Отсутствие формализованного графового описания ограничивает возможность автоматического анализа маршрутов передачи информации, что препятствует построению саморегулируемых топологий и алгоритмов оптимизации на уровне системы в целом.

Работы Д. Пателя и С. Мохаммеда [3], а также М.М. Ратхоре и соавторов [4] иллюстрируют внедрение облачно-периферийных подходов в конкретных отраслях, включая «умные» фабрики и интеллектуальные транспортные сети. Их значимость заключается в детальной проработке параметров потоков данных и моделировании нагрузочных характеристик в специализированных симуляционных средах — iFogSim, GraphX и других. Благодаря этому обеспечивается возможность оценки производительности систем при различных сценариях функционирования. В то же время данные разработки носят узкоотраслевой характер: применяемые модели адаптированы под специфику отдельных доменов и не обладают свойством переносимости в иные типы распределённых вычислительных структур, что снижает потенциал их универсализации.

В публикации А.Б.А. Алаасама и соавторов [5] предложен подход к построению цифровых двойников вычислительных процессов в контексте туманных вычислений, обеспечивающий сохранение состояния и устойчивость потоков. Аналогичные задачи отказоустойчивости решаются в работе Э.В. Мельника и А.Б. Клименко [6], где разработана методика восстановления вычислительных процессов после сбоев. Практическая направленность указанных исследований выражается в ориентации на обеспечение надёжности и непрерывности функционирования систем, что имеет принципиальное значение для распределённых сред. Однако представленные решения не опираются на графовую парадигму описания взаимосвязей между вычислительными потоками, из-за чего остаётся затруднённой формализация маршрутов передачи данных и балансировка вычислительной нагрузки между уровнями Cloud–Fog–Edge.

В работах Р.Т. Забелина и В.Э. Левшица [7], А.Б. Клименко [8], А.Н. Волкова [9], а также Е.В. Чипсановой и В.С. Елагина [10] представлены разнообразные алгоритмические механизмы оптимизации размещения задач и распределения микросервисов между узлами периферийной и туманной инфраструктуры. Использование методов многокритериальной оптимизации и метаэвристических стратегий (включая алгоритмы «серых волков», роя частиц и др.) позволяет добиться повышения эффективности использования ресурсов и снижения энергетических затрат. Вместе с тем эти решения остаются ориентированными на изолированные показатели эффективности — задержку, энергоёмкость или надёжность — и не формируют целостной модели взаимодействия потоков данных, что ограничивает их применимость в условиях масштабных и динамически изменяющихся сетей.

Работы Н.П. Будко и Н.В. Васильева [11], а также Д.Р. Никольского и соавторов [12] демонстрируют потенциал графовых методов при анализе телекоммуникационных сетей и систем управления базами данных. Ключевыми достоинствами таких подходов выступают высокая степень

визуализации сложных взаимосвязей, возможность выявления кластеров и аномалий посредством топологического анализа графов. Несмотря на эти преимущества, указанные методы ограничиваются статическим рассмотрением сетевой топологии, не учитывая эволюционную динамику и адаптивные изменения инфраструктуры в распределённых вычислительных системах.

Проведённый анализ научных и инженерных решений подтвердил, что большинство существующих методик описывает лишь частные фрагменты вычислительных процессов, не формируя целостной графовой картины функционирования распределённой среды.

Главная цель разработанной концепции заключается в создании адаптивной графовой модели распределённой вычислительной системы, предназначенной для комплексного представления топологии и динамики потоков данных, а также для решения задач многокритериальной оптимизации маршрутов обмена информацией.

Функциональная направленность модели предполагает:

- 1) отображение структуры взаимодействия между узлами трёх уровней вычислений — облачного, туманного и граничного;
- 2) формализацию ключевых параметров потоков данных (latency, bandwidth, dataType);
- 3) реализацию механизма оценки и оптимизации параметров распределённого трафика с учётом совокупности критериев производительности и надёжности.

Проектируемая система представлена в виде графовой базы данных, реализуемой, в частности, на платформе Neo4j.

Формально модель определяется как ориентированный граф согласно следующей формуле (1):

$$G = (V, E), (1)$$

где  $V$  — обозначает множество вершин — вычислительных узлов различного уровня, а  $E$  — совокупность рёбер, соответствующих каналам взаимодействия и направлениям потоков данных между ними.

Каждое ребро  $e_{ij} \in E$  характеризуется параметрами:

$latency_{ij}$  — задержка передачи, мс;

$bandwidth_{ij}$  — пропускная способность, Мбит/с;

$dataType_{ij}$  — тип транслируемых данных и т.п.

Вершины графа распределяются по категориям:

Device — физические и виртуальные устройства (сенсоры, контроллеры, серверы, беспилотные узлы и др.);

Level — уровни вычислительной инфраструктуры (Cloud, Fog, Edge, Private или Hybrid Cloud);

User — субъектные роли и права доступа (Administrator, IoT-Operator и др.);

Event — события системы (Temperature Anomaly, Security Breach, Backup Process и пр.).

Такая типизация обеспечивает многоуровневое визуальное отображение вычислительной среды — от локальных устройств до облачных агрегатов — и позволяет анализировать разнообразные отношения между элементами: физические соединения (CONNECTED\_TO), маршруты передачи данных (DATA\_FLOW) и зависимости субъектных взаимодействий (HAS\_ACCESS).

Для маршрута передачи информации, представленного формулой (2):

$$P = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (2)$$

вводятся функциональные показатели:

1) совокупная задержка передачи

$$L(P) = \sum_{(ij) \in P} l_{ij},$$

где  $l_{ij}$  — задержка на участке  $i \rightarrow j$ ;

2) эффективная пропускная способность:

$$B(P) = \min_{(i,j) \in P} b_{ij},$$

3) энергопотребление:

$$E(P) = \sum_{i \in P} (E_i^{stat} + \alpha_i load_i),$$

где  $E_i^{stat}$  — статистическая составляющая,  $\alpha_i$ , коэффициент чувствительности к нагрузке.

Задача оптимизации формулируется как многокритериальная:

$$F = \omega_1 L(P) + \omega_2 \frac{1}{B(P)} + \omega_3 E(P) \rightarrow \min,$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  — веса критериев (задержка, пропускная способность, энергопотребление).

Ограничения:

$$B(P) \geq B_{min};$$

$$L(P) \leq L_{max};$$

доступность узлов  $v_i \in A$  определяется актуальными записями в базе данных.

Для поиска оптимального маршрута используется взвешенный графовый алгоритм (например, модификация алгоритма Дейкстры), минимизирующий совокупный вес рёбер с учётом многокритериальности.

Графовая база данных реализована с использованием Cypher-запросов примеры которых представлены на рисунках 1 и 2.

cypher

```
MATCH (n)
WHERE n.bandwidth IS NOT NULL
RETURN DISTINCT "node" AS entity, n.bandwidth AS bandwidth
UNION ALL
MATCH ()-[r]-()
WHERE r.bandwidth IS NOT NULL
RETURN DISTINCT "relationship" AS entity, r.bandwidth AS bandwidth;
```

Рис. 1. – Пример выборки узлов и связей по параметру пропускной способности

cypher

```
MATCH (n)
WHERE n.bandwidth IS NOT NULL
RETURN DISTINCT "node" AS entity, n.bandwidth AS bandwidth
UNION ALL
MATCH ()-[r]-()
WHERE r.bandwidth IS NOT NULL
RETURN DISTINCT "relationship" AS entity, r.bandwidth AS bandwidth;
```

Рис. 2. – Пример выборки по типам передаваемых данных

Использование подобных запросов позволяет в реальном времени диагностировать конфигурацию сети, выявлять узкие места, контролировать соответствие QoS-показателям и выполнять экспресс-оценку эффективности топологии.

Разработанная модель обладает выраженной практической применимостью в различных секторах цифровой экономики и промышленной автоматизации. Она может быть использована для:

- 1) моделирования инфраструктур Интернета вещей (IoT), включая производственные, транспортно-логистические и медицинские системы;
- 2) оптимизации потоков данных между уровнями Cloud–Fog–Edge с целью снижения задержек и повышения пропускной способности;
- 3) организации мониторинга событий и механизмов резервного копирования в распределённых вычислительных сетях;
- 4) интеграции с системами цифровых двойников для решения задач предиктивного обслуживания и анализа отказов оборудования.

Предложенная концепция отличается от существующих решений рядом принципиальных особенностей. Впервые создана формализованная графовая структура распределённой вычислительной системы, охватывающая все три уровня инфраструктуры — облачный, туманный и граничный — в едином аналитическом контуре. Модель поддерживает динамическое моделирование потоков данных с учётом временных, пропускных и энергетических метрик, обеспечивая тем самым возможность комплексной оптимизации.

Кроме того, система реализует многокритериальную процедуру маршрутизации, интегрирующую алгоритмы поиска кратчайшего пути и методы балансировки нагрузки. Гибкая архитектура модели допускает расширение состава узлов и событий без нарушения целостности структуры, что придаёт ей свойства масштабируемости и адаптивности.

Разработанная графовая модель, опирающаяся на принципы взаимосвязанности вычислительных уровней и формализованное представление потоков данных, образует универсальный инструмент анализа, моделирования и оптимизации распределённых вычислительных систем. Её применение позволяет повысить устойчивость архитектуры, сократить задержки при передаче информации и обеспечить рациональное использование вычислительных ресурсов в условиях возрастающих нагрузок.

---

## Литература

1. Briatore F., Braggio M. Edge, Fog and Cloud Computing Framework for Flexible Production // *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 253. pp. 2206–2218. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.281.
2. Мутханна А. С. А. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета вещей высокой и сверхвысокой плотности // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9, № 3. С. 42–59. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59.
3. Patel D., Mohammed S. Cloud and Edge Computing for Developing Smart Factory Models Using an iFogSim Wrapper: Transportation Management System (TMS) Case Study // *TechRxiv*. 2020. pp. 1–6. DOI: 10.36227/techrxiv.12061764.v1.
4. Rathore M. M., Shah S. A., Awad A., Shukla D., Vimal S., Paul A. A Cyber-Physical System and Graph-Based Approach for Transportation Management in Smart Cities // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 14. pp. 1–21. DOI: 10.3390/su13147606.
5. Алаасам А. Б. А., Радченко Г. И., Черных А. Н., Гонсалес-Компеан Х. Л. Цифровые двойники в туманных вычислениях: организация обработки данных с сохранением состояния на базе микропотоков работ // *Труды Института системного программирования РАН*. 2021. Т. 33, вып. 1. С. 65–80. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-5.
6. Мельник Э. В., Клименко А. Б. Методика восстановления вычислительного процесса информационно-управляющих систем на основе концепции «туманных вычислений» после сбоя // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 9. С. 551–563.
7. Забелин Р. Т., Левшиц В. Э. Оптимизация распределения ресурсов в системах периферийных вычислений для приложений реального времени //

---

Профессиональный вестник: Информационные технологии и безопасность. 2025. № 1. С. 62–68.

8. Клименко А. Б. Повышение ресурсной эффективности распределённых архитектур систем обработки данных на основе априорных данных о поздних сроках завершения работ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 2. С. 124–139. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139.

9. Волков А. Н. Динамические туманные вычисления и бессерверная архитектура: на пути к зелёным ИКТ // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 3. С. 24–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-24-34.

10. Чипсанова Е. В., Елагин В. С. Методы распределения ресурсов концепции мобильных граничных вычислений // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2023. Т. 16, № 1. С. 4–13. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-1-4-13.

11. Будко Н. П., Васильев Н. В. Обзор графо-аналитических подходов к мониторингу информационно-телекоммуникационных сетей и их применение для выявления аномальных состояний // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 6. С. 53–75. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-53-75.

12. Никольский Д. Р., Барабанов В. Ф., Гребенникова Н. И., Коваленко С. А., Нужный А. М. Анализ графовых систем управления базами данных // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19, № 6. С. 13–20. DOI 10.36622/VSTU.2023.19.6.002.

### References

1. Briatore F., Braggio M. Edge, Fog and Cloud Computing Framework for Flexible Production. Procedia Computer Science. 2025. Vol. 253. pp. 2206–2218. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.281.

2. Muthanna A. S. A. Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. 2023. Vol. 9, No. 3. pp. 42–59. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59.
3. Patel D., Mohammed S. Cloud and Edge Computing for Developing Smart Factory Models Using an iFogSim Wrapper: Transportation Management System (TMS) Case Study. TechRxiv. 2020. pp. 1–6. DOI: 10.36227/techrxiv.12061764.v1.
4. Rathore M. M., Shah S. A., Awad A., Shukla D., Vimal S., Paul A. A Cyber-Physical System and Graph-Based Approach for Transportation Management in Smart Cities. Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 14. pp. 1–21. DOI: 10.3390/su13147606.
5. Alaasam A. B. A., Radchenko G. I., Chernykh A. N., Gonzalez-Compean Kh. L. Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN [Proceedings of ISP RAS]. 2021. Vol. 33, Iss. 1. pp. 65–80. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-5.
6. Melnik E. V., Klimenko A. B. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018. No. 9. pp. 551–563.
7. Zabelin R. T., Levshits V. E. Professional'ny vestnik: Informatsionnye tekhnologii i bezopasnost'. 2025. No. 1. pp. 62–68.
8. Klimenko A. B. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2023. Vol. 27, No. 2. pp. 124–139. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-2-124-139.
9. Volkov A. N. Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. 2024. Vol. 10, No. 3. pp. 24–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-24-34.
10. Chipsanova E. V., Elagin V. S. Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli. 2023. Vol. 16, No. 1. pp. 4–13. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-1-4-13.
11. Budko N. P., Vasiliev N. V. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2021. No. 6. pp. 53–75. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-6-53-75.
12. Nikolsky D. R., Barabanov V. F., Grebennikova N. I., Kovalenko S. A., Nuzhny A. M. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo



universiteta. 2023. Vol. 19, No. 6. pp. 13–20. DOI:  
10.36622/VSTU.2023.19.6.002.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 11.09.2025**

**Дата публикации: 29.10.2025**