

УДК: 004.75:519.687.1

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.51.4.036](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.51.4.036)

Туманные вычисления – основа эволюции и безопасности распределенного цифрового проектирования в бизнесе

И.В. Титова¹✉, Д.Ю. Дьяконов²

¹ООО РобоФинанс, Москва, Российская Федерация

²Mediar Inc., Сан-Франциско, Соединенные Штаты Америки

Резюме. В условиях роста сложности средств коммуникаций, оперативного управления и систем безопасности, требуется особая внимательность к инфологическим инструментам и инфраструктуре компании, организации. Цифровая экосистема является основой как коммуникаций, управленческого воздействия, так и основой эффективности и безопасности качества систем и бизнес-процессов организации. Цель исследования – системный анализ современной вычислительной инфраструктуры распределенной корпоративной работы – туманной или Fog Computing, ее возможностей, технологий и проблем, особенно, в сфере безопасности и проектирования. Методология представленного исследования включает методы системного анализа, инфологического и математического моделирования, экспертно-эвристический подход. Результатами исследования стали идентификация спектра проблем туманной инфраструктуры, возможностей гибкого и масштабируемого увеличения ее мощности и безопасности, отказоустойчивости, а также подходы к решению системных проблем инструментального, информационного, интеграционного и иного характера. Проведена также классификация туманных вычислений с акцентом на их безопасность. Исследования можно развивать и далее, в частности, по направлению обеспечения инфраструктур туманных вычислений, необходимой степенью гибкости, стандартами и их интеграцией, а также построения гибкой модели и алгоритмов идентификации параметров процессов.

Ключевые слова: туманные вычисления, безопасность, распределенные вычисления, цифровое проектирование, инфраструктура компании.

Для цитирования: Титова И.В., Дьяконов Д.Ю. Туманные вычисления – основа эволюции и безопасности распределенного цифрового проектирования в бизнесе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2072> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.036

Fog Computing – the foundation for distributed digital project evolution and security in business

I.V. Titova¹✉, D.Yu. Diakonov²

¹RoboFinance LLC, Moscow, the Russian Federation

²Mediar Inc., San Francisco, the United States of America

Abstract. In the context of the growing complexity of communications, operational management, security systems and special attention is required to the infological tools and infrastructure of the organizations. The digital ecosystem is the basis of both communications, management impact, and the basis for the efficiency and safety of the quality of the company's systems and business processes. The purpose of the study is a system analysis of the modern computing infrastructure of distributed corporate work – vague or Fog Computing, its capabilities, technologies and problems, especially in the field of security. The methodology of the presented study includes methods of system analysis, information-logical modeling and expert heuristic approach. The results of the study were the identification of the range of problems of the foggy infrastructure, the possibilities of flexible and scalable increase in its capacity and security, fault tolerance, as well as approaches to solving systemic problems of an

instrumental, informational, integration and other nature. A classification of foggy calculations was also carried out with an emphasis on their safety. Research can be further developed, in particular, in the direction of providing foggy computing infrastructures with the necessary degree of flexibility, standards and their integration, as well as building flexible models and algorithms for identifying process parameters.

Keywords: fog computing, security, distributed computing, digital design, enterprise infrastructure.

For citation: Titova I.V., Diakonov D.Yu. Fog Computing – the foundation for distributed digital project evolution and security in business. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(4). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2072> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.51.4.036

Введение

Любая компания стремится развивать свою информационно-логическую, цифровую инфраструктуру или, как принято определять, цифровую экосистему. Она является основой не только коммуникаций, принятия релевантных решений, особенно, управленческих, но и основой мобильности, оперативности, эффективности и безопасности качества корпоративных процессов и проектов. Сами клиенты, пользователи цифровых сервисов, ресурсов корпорации также способствуют эволюции экосистемы, адаптивности (регулируемости) траектории ее развития.

Для корпоративных целей применяются три базовые модели облачных взаимодействий [1]: частное, публичное или гибридное (смешанное) облако. Российский рынок облачных услуг базируется на моделях предоставления услуг типа SaaS, IaaS, PaaS и по данным экспертов (например, [2]) в 2024 году достиг 392 млрд. руб. и с ежегодным темпом роста в 26 % вырастет вдвое к 2029 году.

Рынок Fog Computing к 2032 году, по данным TAdvizer, вырастет до \$14 млрд. Это и затраты инфраструктурные, и услуги Fog Computing. Это способствует приросту в сфере IoT, СИИ и 5G, приближение устройств к клиенту.

Термин «Туманные вычисления» ввел Флавио Бономи (Cisco) в 2011 году в качестве продвижения категории «Облачные вычисления» на границы сети. Официальное определение [3]: туманные вычисления – это масштабируемая многоуровневая модель повсеместного доступа к общим вычислительным ресурсам.

Технологически, Fog Computing ассоциируется с распределенными дата-центрами, в которых серверы располагаемы в местах вплоть до сетевого пользователя, т. е. дата-центры фактически «выносятся» к конечному пользователю и поддерживают их мобильность. Это, например, необходимо в интернете вещей (IoT-взаимодействиях) с геолокацией и малой задержкой при обработке данных, без передачи большим дата-центрам: «густое облако снижается до границ сети, и пользователь видит туман». Справедлива формула: «Туманные вычисления + Облачные сервисы = Распределенный центр обработки (распределенное хранилище данных)».

Ключевая идея Fog Computing – создать «туманный» слой распределенных узлов вычислений (маршрутизаторы, шлюзы, микросерверы, IoT-устройства) около периферии сети, чем это могут облачные ЦОД [4].

При облачной обработке данных и проектировании следует обращаться в соответствующие ЦОД. При росте объемов и сложности потоков данных между устройствами «Интернета (промышленных) вещей» или I(I)IoT и облаком возникает нехватка трафика сети. Например, при использовании автопилота, умного светофора, ответственное за поставку и обработку данных облако может не удовлетворять условиям обработки данных распределенной сети, в частности, «на лету», в реальном режиме или условиям латентности связей, конфиденциальности данных [5].

Цель работы – системный анализ принципов и архитектуры, возможностей и проблем (особенно, безопасности), а также ключевых технологий Fog Computing и их использования в цифровом распределенном проектировании.

Объект исследования – сервис, работающий на уровне туманов, технология его поддержки.

Материалы и методы

Исследование базируется на проведенной системной аналитике литературных данных (анализ-синтез, сравнение-оценка), эвристическом, инфологическом и математическом моделировании.

Следует отметить, что усложняет методологию Cloud Computing и обработка «высоко-поточных» сетей, и распределение данных («приемников-передатчиков»), необходимость приложений с единой интерфейсной и проектной парадигмой. На решение этих системных проблем и ориентированы туманные вычисления. Они позволяют устранить разрывы (задержки) обработки облачных данных в узлах I(I)oT, перенося вычисления ближе к устройству.

Есть и другие методологически близкие парадигмы вычислений: краевые (Edge computing), мгlistые (Mist computing), росистые (Dew computing) [6] и др. Но в парадигме туманных вычислений отражаются системные цели, проблемы, возможности.

Результаты

При всех достоинствах облачных взаимодействий, существуют взаимодействия и задачи, для которых низка их эффективность [7]. Множество проблем связано со SMART- и I(I)oT-инфраструктурами. В таких инфраструктурах, как «умный дом (город, офис, завод и т. д.)», на первое место выходит качество взаимодействий при проектировании и разработке. Оно определяется временем отклика, чувствительностью, защищенностью канала, помехоустойчивостью, близостью задач и ресурсов к клиенту, виртуализацией и др.

В результате проведенных исследований удалось определить наиболее значимые принципы, возможности и системные проблемы Fog Computing.

Во-первых, «туманы», как «облака» используют те же ИТ-ресурсы, но их спектр гораздо шире и «богаче», они более гибкие в реализуемой архитектуре. При этом «туманы» – не альтернатива «облакам», а их дополнение и возможность более гибкого и интерактивного, масштабируемого применения, увеличения мощности и безопасности вычислительной структуры.

Во-вторых, «туманные» технологии предоставляют значительные преимущества для IoT-устройств и smst-приложений в реальном времени обработки, особенно, при проектировании «на лету». Они снижают задержки, сокращают объем передаваемых в ЦОД данных и позволяют фильтровать и агрегировать их на самой периферии сети (в облако поступают лишь самые важные данные), что расширяет полосу пропускания и отказоустойчивость, повышает безопасность и экономит ресурсы. Расширяется и сфера применения, в частности, в мониторинге ситуаций логистики, экологии, энергопотребления, медицины и др.

В-третьих, выделяются следующие системные проблемы Fog Computing:

1) необходимо разрабатывать (адаптировать) специальный инструментарий (технологии);

2) необходимо обеспечивать безопасность Fog-узлов и конфиденциальность информации, например, с помощью единой политики безопасности и адаптивного проектирования и риск-управления [8];

3) использовать требуемую гибкость интеграции в условиях отсутствия единых стандартов Fog Computing, в частности, IEEE 802.15.4;

4) обеспечить узлы Fog Computing необходимой степенью энергоэффективности уже на этапе проектирования (на «датчиковом слое», например, на основе ОС TinyOS2, интеллектуальных систем Multi-Intelligent Era, Big Data);

5) обеспечение единого интерфейса датчиков, сенсоров и приборов;

6) обеспечить релевантность потребностям IoT (IIoT), например, с помощью идентификации и идентификаторов (QR и др.) подключения к IoT;

7) обеспечение геораспределенности и эффективности шлюзов, поддержка различных БД и интеграции различных типов сетей.

Проблема безопасности в «туманах» – многоаспектная и многокритериальная. Она включает:

1) управление доступом (AccessControlIssues, ACI), предоставление неавторизованному пользователю привилегированного доступа к данным, инфраструктуре при установке клиентских программ и их конфигурирования;

2) удержание аккаунта (AccountHijacking, AH), противодействие захвату учетных пользовательских записей;

3) минимизация отказов (Denial of Service) при запросах конечных пользователей;

4) противодействие несанкционированному доступу к конфиденциальным данным (DataBreach, DB);

5) минимизация потерь данных (DataLoss, DL) по различным причинам;

6) минимизация ошибок реализации API-интерфейсов (InsecureAPI, IA);

7) поиск и минимизация уязвимостей инфраструктуры (System&Application Vulnerabilities, SAV), например, конфигурационных;

8) минимизация инсайдерства, внутренних проблем, злоумышленников с правами доступа (MaliciousInsider, MI);

9) минимизация ошибок из-за недобросовестности пользователей и администраторов (InsufficientDueDiligence, IDD);

10) минимизация недобросовестного, злонамеренного использования архитектуры и системы (Abuse&NefariousUse, ANU).

При всех достоинствах облачных взаимодействий при проектировании, существуют взаимодействия и задачи, для которых низка их эффективность. Множество проблем связано со SMART- и I(I)IoT-инфраструктурами. В таких инфраструктурах, как «умный дом (город, офис, производство)» и др., на первое место выходит качество взаимодействий. Оно определяется временем отклика, чувствительностью, защищенностью канала, помехоустойчивостью, близостью задач и ресурсов к клиенту, виртуализацией и др.

Отметим ключевые технологии поддержки туманных вычислений:

1) виртуализация программным слоем машины на основе аппаратных ресурсов физической машины (гипервизором) или прикладным слоем на основе буферного ПО, библиотек файлов для запуска приложений (контейнером);

2) оркестризация или управление распределением вычислений между узлами «тумана» [9];

3) блокчейн [10];

4) цифровое проектирование.

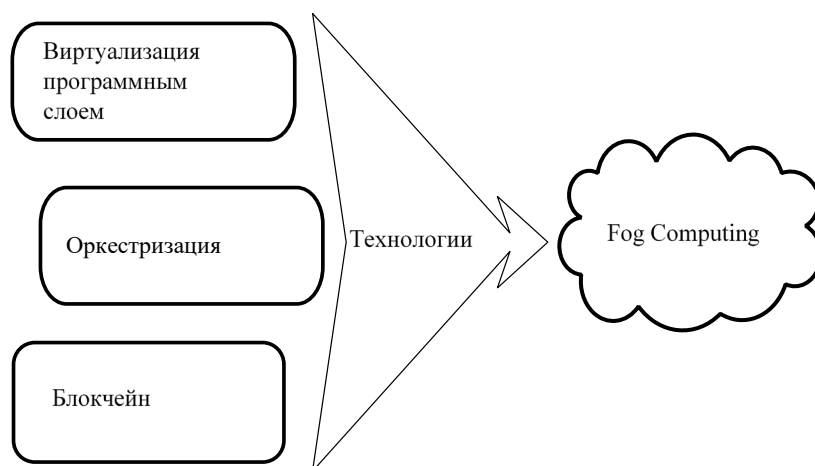


Рисунок 1 – Ключевые технологии Fog Computing
Figure 1 – Key Fog Computing technologies

Ключевые характеристики туманных и облачных вычислений [11] тесно связаны. В частности, за счет децентрализации, гетерогенности, стандартизации, протоколирования, эффективности, открытости, параметризации, универсальности, эластичности, независимости и размещения между клиентом и облаком с пулом общих ресурсов и перераспределением по спросу.

Платформы проведения туманных вычислений можно классифицировать:

1) Open Source, например, Cisco Iox – платформа для IoT под Linux, Iox, интегрируемая с MS Azure IoT Hub или FogFlow, FogFrame 2.0, FogBus и др.;

2) закрытые, коммерческие, например, Nebbiolo Technologies – для поддержки I(i)IoT, Fog, SDK и др.

Среди публичных Fog-платформ можно отметить MS Azure IoT, Amazon IoT Greengrass, API-решения Google, Yandex и др.

Fog Computing обеспечит вычисления в «тумане», поверх устройств, например, IoT-датчиков. Вычислительные возможности таких устройств «в тумане» уже позволят вести вычисления разгружая сервера, сети, приближая устройства к данным и потребителям. При этом софт (услуги, сервис проектирования) адаптируется к требованиям сети, осуществляется отслеживание взаимодействий с устройствами по принципу: «поиск ближайшей точки доступа по горизонтальным взаимодействиям с ЦОД». Сети в туманах могут быть гетерогенны (разной структуры, топологии).

В современном состоянии исследований безопасности туманных вычислений без нечетких моделей и нейросетей сложно обойтись.

Чтобы построить нейросеть на нечетком аппарате, определим лингвистические переменные, используя, например, треугольные L-R-функции, определяемые на декартовом произведении $Q = P \times P$ и алгоритм Цукамото. Можно предложить нижеследующий алгоритм.

1. Для каждой лингвистической переменной

$$x \in X = \{x_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\},$$

где i, j – номера запроса и ресурса (показателя), x_{ij} – значение показателя важности, определяем меру истинности:

$$f_k(x), k = 1, 2, \dots, K.$$

2. Находим меру истинности по правилам $\alpha_k, k = 1, 2, \dots, K$:

$$\alpha_k = \min \{ \mu_{A_{ij}}(x) \},$$

с заданной функцией принадлежности $\mu_{A_{ij}}(x)$ и при заданных значениях входа x .

3. По каждому из правил находятся четкие значения переменных выхода:

$$\beta_k = f_k^{-1}(\alpha_k).$$

4. Используя момент центра тяжести для одноэлементных множеств, находим:

$$x = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k,$$

где

$$\alpha = \sum_{k=1}^K \alpha_k.$$

При обучении нечеткой нейросети параметры (функции принадлежности, набор правил для покрытия Q) уточняется самим предметным аналитиком в сотрудничестве с дата- и системным аналитиком-проектировщиком.

Нейро-нечеткие системы позволят оперативно распределять вычислительные ресурсы туманной структуры вычислений по классам пользователей и типам (классам) их необходимости в вычислениях.

В модели туманных вычислений приложения используются в удаленном и массовом режиме доступа, а данные – в «тумане» (на сервере поставщика «туманных/облачных» услуг), приложения – в многопользовательском доступе с оплатой по транзакциям. Это обеспечит устойчивость, функциональность системы в длительном периоде.

Риск-устойчивость можно повысить использованием языковых моделей и онтологий. Но эта сложная проблема, которая требует отдельного рассмотрения.

Обсуждение

С помощью туманных вычислений можно активизировать различные инструменты экономии времени профессионалов DevOps (DevSecOps). Сейчас можно говорить о философии IaaS-DevOps, помогающей разработчикам выпустить на рынок оперативно инновационный продукт и заменить популярную модель IaaS (PaaS).

IaaS помогает создавать единую инфраструктуру или программную экосистему. Например, с ориентацией на банковские транзакции, различные правила и нормы банкинга.

IaaS предоставляет спецификации инфраструктуры, которые необходимы для получения уверенности, что системы получаемой инфраструктуры будут одинаковой безопасности. Станет возможно отслеживать изменения, различия версий благодаря согласованному выделению ресурсов и автоматизации задач. Не будет необходимости управлять сетями, хранилищем, можно сосредоточиться на эффективной поддержке разработчиков, проектировщиков.

Гибкие Agile-системы IaaS типа SpaceLift избавят от большинства недостатков, позволят автоматизировать безопасность и мониторинг процессов. Возможна автоматизация настроек, модификация облачных и туманных приложений (шаблонов) и политики безопасности экосистемы.

Заключение

Рост данных во всех смыслах (объем, темп, сложность) и нагружаемость облака привели к гибкому, эффективному виду туманных вычислений при высокой транспортабельности, с низкой задержкой при локальных вычислениях.

Технология Fog Computing является важным шагом в развитии распределенных вычислений и проектов. Она позволяет приблизить вычислительные ресурсы к периферии сети, снизить задержки, повысить эффективность и обеспечить более гибкие возможности для обработки и анализа информации в реальном времени.

Несмотря на существующие проблемы и вызовы, Fog Computing имеет огромный потенциал для трансформаций в проектировании и создания новых инновационных приложений. Учитывая стремительное развитие IoT и потребность в оперативной аналитике, можно с уверенностью утверждать, что Fog Computing станет ключевой технологией проектирования и разработки будущего.

При разворачивании туманных вычислений, перемещение и хранение данных поближе к клиенту, конечному узлу не является системно-определяющим, а сами устройства, например, смартфоны для видеонаблюдения могут стать конечным вычислительным узлом экосистемы. Туманные вычисления иерархически охватывают облако, ядро (гипервизор), транспортный канал или сеть, границу, клиента и др. Это недостаточно точно изолируемые вычислительные среды.

Рынок туманных услуг (сравнительно с облачными) пока не такой объемный, но он динамичен и эволюционирует благодаря своему разнообразию и мультиплатформенности, масштабируемости, экономичности. Он требует системного и сравнительного анализа, поэтому работа развиваемая.

В частности, в области развития инструментов автоматизации (интеллектуализации) управления и безопасности узлов и данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Мурат Е.П. Внедрение облачных технологий как вектор развития компании. *Вестник Академии знаний*. 2020;(37):205–211.
Murat E.P. Introduction of Cloud Technologies as a Vector of Company Development. *Vestnik Akademii znanii*. 2020;(37):205–211. (In Russ.).
2. Горшков Е.С., Тарасова В.Н. Развитие российских облачных платформ в первой четверти XXI века. *История и педагогика естествознания*. 2024;(3–4):55–60. <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2024-3-4-55-60>
Gorshkov E.S., Tarasova V.N. Development of Russian Cloud Platforms in the First Quarter of the 21st Century. *History and Pedagogy of Natural Science*. 2024;(3–4):55–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2226-2296-2024-3-4-55-60>
3. Haouari F., Faraj R., AlJa'am J.M. Fog Computing Potentials, Applications, and Challenges. In: *2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*, 25–26 August 2018, Beirut, Lebanon. IEEE; 2018. P. 399–406. <https://doi.org/10.1109/COMAPP.2018.8460182>
4. Ravandi B., Papapangiotou I. A Self-Learning Scheduling in Cloud Software Defined Block Storage. In: *2017 IEEE 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*, 25–30 June 2017, Honolulu, HI, USA. IEEE; 2017. P. 415–422. <https://doi.org/10.1109/CLOUD.2017.60>
5. Hong Ch.-H., Varghese B. Resource Management in Fog/Edge Computing: A Survey on Architectures, Infrastructure, and Algorithms. *ACM Computing Surveys*. 2019;52(5). <https://doi.org/10.1145/3326066>

6. Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н. Обзор технологий организации туманных вычислений. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2020;9(3):35–63. <https://doi.org/10.14529/cmse200303>
Kirsanova A.A., Radchenko G.I., Chernykh A.N. Overview of Fog Computing Organization Technologies. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2020;9(3):35–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/cmse200303>
7. Garcia J., Simó E., Masip-Bruin X., Marín-Tordera E., Sánchez-López S. Do We Really Need Cloud? Estimating the Fog Computing Capacities in the City of Barcelona. In: *2018 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion (UCC Companion), 17–20 December 2018, Zurich, Switzerland*. IEEE; 2019. P. 290–295. <https://doi.org/10.1109/UCC-Companion.2018.00070>
8. Kaziev V.M., Shapsigov A.H. Business Infrastructure Resilience to IT Infrastructure Risks and Its Modeling. In: *AIMSA-2024: International Workshop on Advanced Information Security Management and Applications, 02–06 May 2024, Stavropol, Russia*. Cham: Springer; 2024. P. 124–131. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72171-7_13
9. Wen Zh., Yang R., Garraghan P., Lin T., Xu J., Rovatsos M. Fog Orchestration for Internet of Things Services. *IEEE Internet Computing*. 2017;21(2):16–24. <https://doi.org/10.1109/MIC.2017.36>
10. Tuli Sh., Mahmud R., Tuli Sh., Buyya R. FogBus: A Blockchain-Based Lightweight Framework for Edge and Fog Computing. *Journal of Systems and Software*. 2019;154:22–36. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.04.050>
11. Kumar R., Charu Sh. Comparison Between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization. *International Journal of Modern Computer Science and Applications*. 2015;3(1):42–47. <https://doi.org/10.13140/2.1.1759.7765>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Титова Ирина Вадимовна, руководитель
отдела управления проектами ООО РобоФинанс,
Москва, Российская Федерация.
e-mail: ititova808@gmail.com
ORCID: [0009-0004-1731-4572](https://orcid.org/0009-0004-1731-4572)

Irina V. Titova, Head of Project Management
Office, RoboFinance LLC, Moscow, the Russian
Federation.

Дьяконов Дмитрий Юрьевич, учредитель,
Mediar Inc., Сан-Франциско, Соединенные
Штаты Америки.
e-mail: matt@mediar.ai
ORCID: [0009-0005-5527-7212](https://orcid.org/0009-0005-5527-7212)

Dmitrii Yu. Diakonov, Founder, Mediar Inc.,
San Francisco, the United States of America.

*Статья поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 22.10.2025;
принята к публикации 07.11.2025.*

*The article was submitted 11.09.2025; approved after reviewing 22.10.2025;
accepted for publication 07.11.2025.*