

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ ОБЛАЧНЫХ И ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Глушак Елена Владимировна,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
evglushak@yandex.ru

Клюев Дмитрий Сергеевич,
Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия,
klyuevd@yandex.ru

Воловач Владимир Иванович,
Поволжский государственный университет сервиса,
г. Тольятти, Россия,
volovach.vi@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-7-25-33

Manuscript received 30 May 2025;
Accepted 28 June 2025

Ключевые слова: туманные и облачные вычисления, производительность, загрузка сети, программа FogTorch, частота отказов, время обработки данных, надежность системы

В данной статье представлен сравнительный анализ функционирования облачных и туманных вычислений с использованием программного инструмента FogTorch. Исследование фокусируется на моделировании и оценке производительности, надежности и эффективности распределенных вычислительных систем. В работе подробно описаны этапы моделирования, включая определение инфраструктуры, настройку требований приложений, конфигурацию политик размещения и маршрутизации, а также процесс сбора и анализа результатов. На основе экспериментальных данных проведен детальный анализ частоты отказов узлов, доступности системы, времени обработки данных и загрузки сетевых ресурсов в зависимости от различных факторов нагрузки. Результаты исследования показывают, что туманные вычисления демонстрируют более высокую надежность при увеличении числа пользователей по сравнению с облачными системами, хотя и обладают меньшей производительностью при обработке ресурсоемких задач. Особое внимание уделено анализу зависимости объема передаваемых данных от количества подключенных устройств и влиянию географического распределения узлов на задержки в системе. На основе полученных результатов предложены практические рекомендации по оптимизации распределения задач между облачными и туманными узлами, повышению энергоэффективности и планированию масштабируемости системы с учетом растущего числа пользователей. Исследование также включает анализ производительности системы при различных сценариях нагрузки и предоставляет конкретные метрики для оценки эффективности распределенных вычислений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации гибридных облачно-туманных архитектур, особенно в контексте развития технологий Интернета вещей и промышленных систем автоматизации. Исследование демонстрирует важность комплексного подхода к проектированию гибридных облачно-туманных систем и предлагает конкретные стратегии для повышения их эффективности в условиях динамически меняющихся нагрузок и требований современных приложений.

Информация об авторах:

Глушак Елена Владимировна, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доцент, к.т.н., доцент кафедры сетей и систем связи, Самара, Россия, ORCID 0009-0000-5494-9746

Клюев Дмитрий Сергеевич, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, профессор, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой радиоэлектронных систем, Самара, Россия, ORCID 0000-0002-9125-7076

Воловач Владимир Иванович, Поволжский государственный университет сервиса, доцент, д.т.н., и.о. директора Высшей школы передовых производственных технологий, Самарская область, г. Тольятти, Россия. ORCID 0000-0002-0201-2545

Для цитирования:

Глушак Е.В., Клюев Д.С., Воловач В.И. Анализ распределения задач в системе облачных и туманных вычислений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №7. С. 25-33.

For citation:

E.V. Glushak, D.S. Klyuev, V.I. Volovach, "Analysis of the distribution of tasks in the cloud and fog computing system," T-Comm, 2025, vol. 19, no.7, pp. 25-33. (in Russian)

Введение

В условиях цифровой трансформации и бурного развития Интернета вещей (IoT) вопросы эффективной обработки и анализа данных приобретают всё большую актуальность [1]. Несмотря на широкое распространение облачных вычислений, они не всегда способны полностью удовлетворить растущие требования к скорости обработки данных и минимизации задержек. Это открывает потребность в новых подходах, и концепция туманных вычислений выступает как альтернатива для распределенной обработки данных, особенно когда речь идет о устройствах IoT [2, 3].

Туманные вычисления позволяют перенести обработку данных ближе к краю сети, что способствует снижению задержек и уменьшению нагрузки на сетевую инфраструктуру. Моделирование туманных вычислений становится важным инструментом для оценки их эффективности в оптимизации обработки данных, особенно в контексте применения IoT [4]. Это дает возможность исследовать, как оптимально распределить вычислительные ресурсы между облаком и локальными устройствами для минимизации задержек и снижения сетевой нагрузки. Анализ различных архитектур и стратегий распределения задач позволяет получить ценные данные о том, как улучшить общую производительность системы, что критически важно при проектировании эффективных решений [5-7].

Одним из ключевых преимуществ моделирования является способность выявлять возможные уязвимости и проблемы безопасности, возникающие при обработке данных на разных уровнях инфраструктуры. Использование программных средств позволяет исследовать различные сценарии применения туманных вычислений в реальном времени, что становится особенно важно для компаний, рассматривающих внедрение новых технологий. Моделирование также позволяет оценить потребности в сетевой инфраструктуре и спланировать интеграцию туманных вычислений с уже существующими системами [8-10].

В этой работе представлен сравнительный анализ работы облачных и туманных вычислений с использованием инструмента FogTorch. Результаты работы позволяют детально оценить преимущества и ограничения каждого подхода в различных условиях эксплуатации.

Задание исходных данных для моделирования

Для эффективного функционирования FogTorch рекомендуется придерживаться определенных минимальных и рекомендуемых характеристик. Процессор должен быть 2-ядерный с тактовой частотой 1,8 ГГц, оперативная память 4 ГБ, место на диске 500 МБ свободного пространства. Однако, к рекомендуемым требованиям будет относиться процессор 4-ядерный с тактовой частотой 2,5 ГГц или выше, оперативная память 8 ГБ или больше, место на диске 1 ГБ свободного пространства.

Проведем моделирование облачных и туманных вычислений с помощью FogTorch и получим данные, которые помогают оценить производительность и устойчивость приложений в условиях туманных вычислений. Зададим для начала три устройства: видеочамера, датчик влажности и датчик температуры оборудования промышленного IoT.

Создадим два облачных центра с идентификаторами cloud_1 и cloud_2. Для каждого центра определены поддерживаемые технологии (например, java, ruby, mySQL, spark и т.д.), а также их географическое положение (x, y).

Реализуем три узла туманных вычислений с идентификаторами fog_1, fog_2 и fog_3. Для каждого узла задаются поддерживаемые технологии и параметры оборудования, где *cores* – количество ядер, *ram* – объем оперативной памяти в ГБ (например, fog_1 имеет 10 ГБ, fog_2 – 2 ГБ, fog_3 – 4 ГБ), *storage* – объем доступного хранилища. Для каждого узла также указано его географическое расположение (координаты x и y).

Определим соединения (связи) между узлами туманных вычислений и облачными центрами, где *a* и *b* – идентификаторы узлов, которые соединяются, *latency* – задержка соединения в миллисекундах, *bandwidth* – пропускная способность соединения в Мбит/с.

Например, между узлами fog_1 и cloud_1 задано соединение с задержкой 130 мс и пропускной способностью 6 Мбит/с.

Для каждого заданного устройства указываются различные параметры. *Identifier* – уникальный идентификатор устройства (например, fire0, extinguisher0, water0 и т.д.), *type* – тип устройства (например, fire, extinguisher, water, wind, pressure, temperature), *fogNode* – идентификатор узла туманных вычислений, к которому подключено устройство, *x* и *y* – географические координаты устройства.

Рассмотрим, как задачи распределяются между облачными и туманными узлами, оптимальное размещение для минимизации задержек и оптимизации производительности.

Оценка результатов проведенных исследований

Рассмотрим математическую модель облачных и туманных вычислений. Множество узлов представим, как $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество облачных узлов, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ – множество туманных узлов, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ – множество устройств IoT [11]. Характеристики узлов представим в виде $CPU(x)$ – вычислительная мощность узла *x*, $RAM(x)$ – объем оперативной памяти узла *x*, $Store(x)$ – объем хранилища узла *x*, $Coord(x) = (x_1, x_2)$ – географические координаты узла *x*. Для каждой пары узлов (*i, j*) обозначим задержку, как $L(i, j)$ – задержка между узлами *i* и *j* (мс), $B(i, j)$ – пропускная способность канала между узлами *i* и *j* (Мбит/с). Определим функцию загрузки системы:

$$Load(t) = \alpha \cdot CPU_load(t) + \beta \cdot RAM_load(t) + \gamma \cdot Network_load(t) \quad (1)$$

α, β, γ – весовые коэффициенты,

$CPU_load(t)$ – загрузка процессора в момент времени *t*,

$RAM_load(t)$ – загрузка памяти в момент времени *t*,

$Network_load(t)$ – загрузка сети в момент времени *t*.

Функция надежности системы определяется выражением (2):

$$R(n) = P(T \geq t | N = n) \quad (2)$$

где n – количество активных пользователей; T – время безотказной работы; P – вероятность безотказной работы.

Для облачных узлов $R_c(n) = 0,92 - 0.0002n$ (при $n \leq 500$).
Для туманных узлов $R_f(n) = 0,98 - 0.00016n$ (при $n \leq 500$).

Рассмотрим функцию частоты отказов (3):

$$F(I) = a + bI + cI^2 \quad (3)$$

I – нагрузка на систему (%); $a = 12$ (базовое количество отказов); b, c – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Объем передаваемых данных определим по формуле (4):

$$V(u) = k_1u + k_2u^2 \quad (4)$$

где u – количество пользователей; k_1, k_2 – коэффициенты масштабирования.

Определим целевую функцию оптимизации:

$$\min(E) = w_1T + w_2L + w_3P \quad (5)$$

где T – время обработки данных; L – задержка передачи; P – энергопотребление.

К ограничениям системы отнесем следующие неравенства [12]:

а) загрузка любого узла $Load(x, t) \leq MaxLoad(x)$ для всех $x \in C \cup F$,

б) задержка передачи данных $L(i, j) \leq MaxLatency(i, j)$,

в) доступность системы $R(n) \leq MinR(n)$.

Для оптимального распределения задач между туманом и облаком необходимо минимизировать общую задержку или энергопотребление системы [13, 14]. Это можно сделать с использованием различных методов оптимизации.

Рассмотрим оптимизацию с учетом задержки [15-17]. Определение, сколько задач должно быть передано в облако или обработано в тумане с учетом времени отклика и доступных вычислительных мощностей:

$$\min\left(\sum_{i=1}^{N_{fog}} t_{fog}(i) + \sum_{i=1}^{N_{cloud}} t_{cloud}(i)\right) \quad (6)$$

Также рассмотрим оптимизацию с учетом энергопотребления [18]. Минимизация потребляемой энергии для обработки задач, распределяя их между туманом и облаком в зависимости от энергии, затраченной на передачу данных и обработку.

$$\min\left(\sum_{i=1}^{N_{fog}} E_{fog}(i) + \sum_{i=1}^{N_{cloud}} E_{cloud}(i)\right) \quad (7)$$

где $E_{fog}(i)$ и $E_{cloud}(i)$ – энергии, затраченные на передачу и обработку задач в тумане и облаке соответственно.

Облачные узлы (Cloud) обрабатывают задачи быстрее, особенно при малом количестве ядер, и демонстрируют более стабильное время выполнения. Туманные узлы (Fog) медленнее, что может быть связано с распределением вычислений между узлами или ограничениями локальных ресурсов [19, 20]. При большом количестве ядер (например, 16) различие в производительности уменьшается, но Cloud остаётся более эффективным решением. Fog лучше подходит для задач с ограничениями по задержкам, но для ресурсоёмких операций, требующих высокой производительности, предпочтительны Cloud-узлы.

Полученные при моделировании результаты сведём в таблицу 1.

Таблица 1

Анализ частоты отказов по времени и нагрузке

Нагрузка (%)	Частота отказов
0	12
10	13
20	13,5
30	14
40	14,5
50	15
60	15,5
70	16
80	17,5
85	19
90	18,5
95	18
100	18

Проанализируем частоту отказов узлов по нагрузке и времени. Покажем, как количество отказов узлов меняется в зависимости от уровня нагрузки и времени. А также доступность узлов по нагрузке и времени. По данным моделирования отобразим процент доступных узлов, учитывая, как временные, так и нагрузочные факторы (рис. 1, 2).

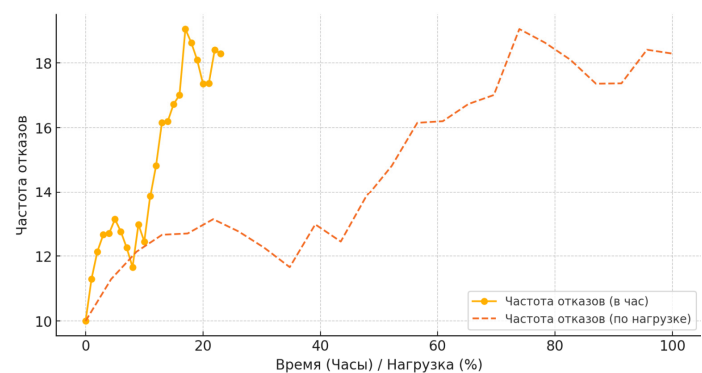


Рис. 1. Частота отказов по времени и нагрузке

График зависимости от нагрузки показывает более плавную тенденцию к росту. Начиная примерно с 12 отказов при малой нагрузке, частота постепенно увеличивается по мере роста нагрузки системы. При достижении нагрузки около 80% наблюдается более существенный рост частоты отказов, которая достигает максимума примерно в 19 отказов при нагрузке 85-90%. В конце графика при максимальной нагрузке частота отказов немного снижается и стабилизируется на уровне около 18 отказов.

Такое поведение системы может свидетельствовать о том, что частота отказов более чувствительна к начальному периоду работы системы, чем к увеличению нагрузки, поскольку при росте нагрузки увеличение частоты отказов происходит более плавно и предсказуемо.

Пунктирная линия на графике отображает зависимость доступности системы от нагрузки, выраженной в процентах. График начинается с относительно высоких показателей доступности около 94-95% при небольшой нагрузке. По мере увеличения нагрузки до 20-25% наблюдается повышение доступности до пиковых значений около 100%.

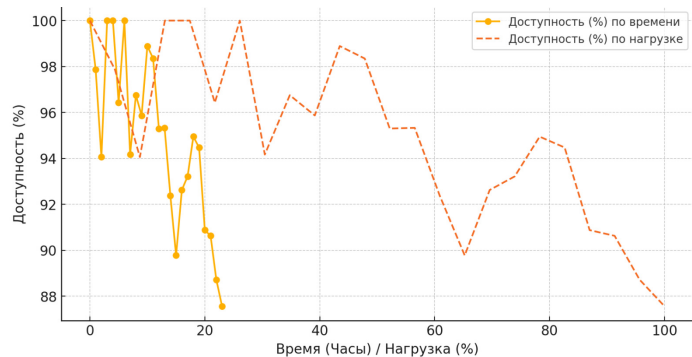


Рис. 2. Доступность по времени и нагрузке

Затем происходит некоторое снижение, после чего следует новый подъем до локального максимума около 98% при нагрузке 40%. После этого начинается постепенное снижение доступности, особенно заметное в диапазоне нагрузки 60-70%, где показатель падает до примерно 90%.

В дальнейшем наблюдается небольшое восстановление до 94-95% в районе 75-80% нагрузки, но затем следует устойчивое снижение доступности. При приближении нагрузки к 100% доступность системы падает до минимальных значений около 88%. Такое поведение графика может свидетельствовать о том, что система наиболее эффективно работает при средних значениях нагрузки (20-40%), но начинает испытывать существенные трудности при высоких нагрузках, превышающих 60%.

Чтобы построить графики, иллюстрирующие различия в производительности приложений, выполняемых в облаке и на узлах туманных вычислений, необходимо рассмотреть:

1. Время обработки данных – для облачных и туманных вычислений, показывающее, как различия в архитектуре влияют на скорость. Показывает, что при увеличении нагрузки время обработки данных в облаке выше, чем на туманных узлах, особенно при высокой нагрузке (рис. 3).

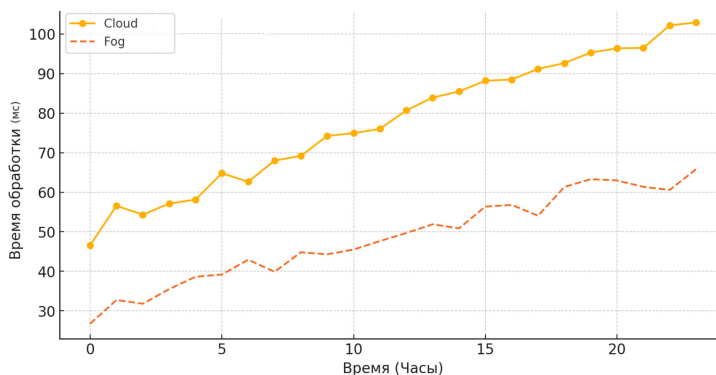


Рис. 3. Время обработки данных у облачных и туманных вычислений

2. Производительность по нагрузке – оценка производительности обоих типов архитектур при изменении уровня нагрузки. Иллюстрирует, что производительность туманных вычислений остаётся выше по сравнению с облачными сервисами при росте нагрузки, что объясняется близостью узлов к источнику данных (рис. 4).

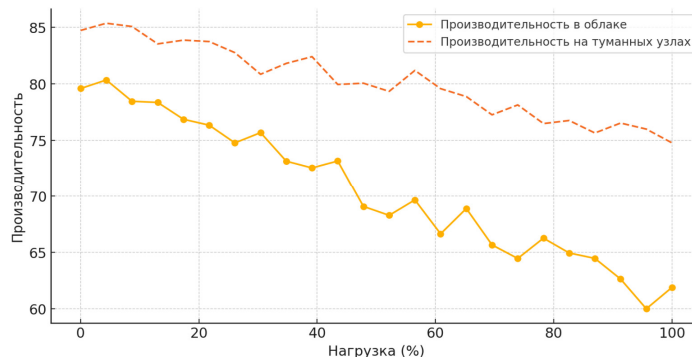


Рис. 4. Производительность в облачных и туманных вычислениях

Эти графики помогают оценить, как различные архитектуры влияют на скорость обработки данных и производительность.

Загрузка CPU показывает, как уровень загрузки процессора изменяется по времени, где туманные узлы демонстрируют большую вариативность (рис. 5).

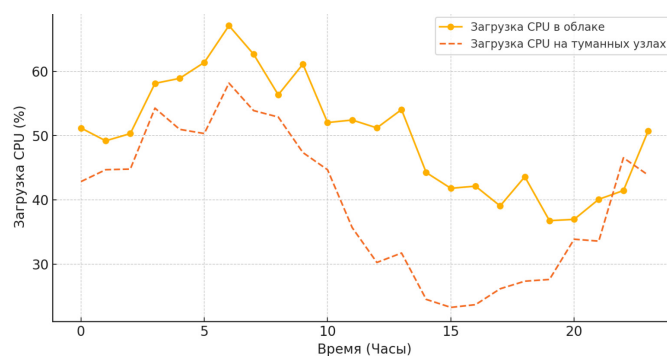


Рис. 5. Загрузка процессора по времени

Для анализа распределения нагрузки между облаком и туманными узлами по времени рассмотрим загрузку процессора, которая отображает, как меняется загрузка CPU для облака и туманных вычислений, использование памяти, которое показывает использование памяти в зависимости от времени, и загрузка сети, которая иллюстрирует трафик сети, обрабатываемый облачными и туманными узлами. Другие ресурсы (например, дисковая нагрузка) покажет нагрузку на дисковую систему. Эти данные помогут увидеть, как распределяется нагрузка по разным архитектурам в течение времени. Использование памяти иллюстрирует, как объем используемой памяти меняется с течением времени, причем облачные ресурсы потребляют больше памяти в среднем (рис. 6).

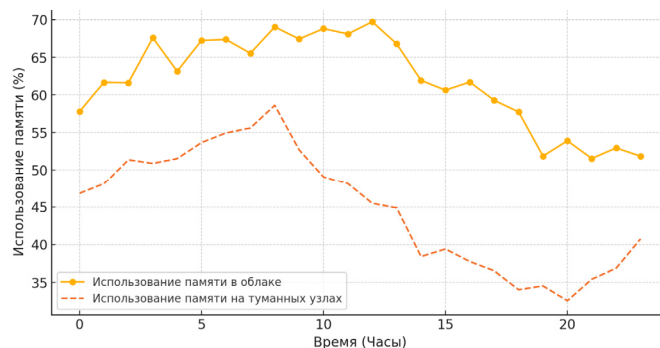


Рис. 6. Использование памяти

Загрузка сети демонстрирует сетевую нагрузку, где облачные узлы обрабатывают больший объем трафика (табл. 5, рис. 7).

Таблица 5

Загрузка сети в течение суток

Час	Облачные узлы (%)	Туманные узлы (%)
0-1	68	48
5	75	55
13-15	64	40
24	70	58-60

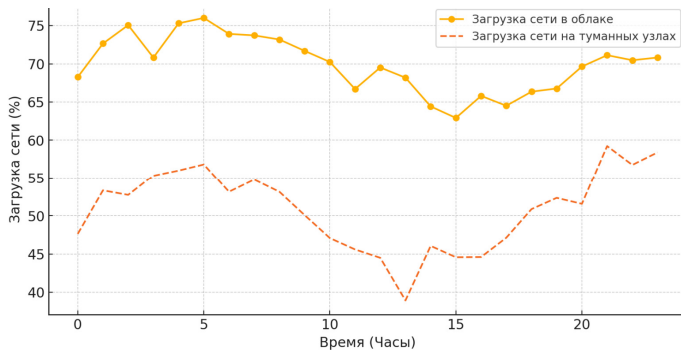


Рис. 7. Загрузка сети

График демонстрирует 24-часовой период наблюдения, где отчетливо видна динамика изменения нагрузки в обеих средах. Загрузка сети в облаке показывает относительно высокие и стабильные значения, колеблющиеся в диапазоне от 65% до 75%. В начале периода наблюдается рост с 68% до пикового значения около 75% в районе 5-го часа. После этого происходит постепенное снижение до минимума примерно 64% около 15-го часа, затем снова наблюдается восстановление до уровня 70% к концу периода наблюдения.

Загрузка сети на туманных узлах демонстрирует более низкие значения и большую волатильность. Начальные показатели около 48% постепенно увеличиваются до 55% в первые 5 часов, затем наблюдается снижение до критического минимума около 40% в районе 13-го часа. К концу периода наблюдения происходит значительный рост до 58-60%.

Для улучшения производительности сети рекомендуется внедрить систему балансировки нагрузки между облачными и туманными узлами, что позволит более равномерно распределить нагрузку. Целесообразно увеличить вычислительные мощности туманных узлов, особенно в периоды низкой производительности около 13-го часа. Следует оптимизировать работу облачной инфраструктуры для снижения общей нагрузки, которая держится на достаточно высоком уровне. Важно внедрить предиктивную аналитику для прогнозирования пиковых нагрузок и автоматического перераспределения ресурсов. Рекомендуется также провести аудит сетевой инфраструктуры для выявления узких мест, особенно в моменты максимальной нагрузки около 5-го часа на облачных серверах и в периоды резких спадов на туманных узлах.

Отдельное внимание стоит уделить исследованию причин существенной разницы в загрузке между облачными и туманными узлами. Возможно, требуется пересмотреть политики маршрутизации и распределения задач между узлами. Внедрение автоматизированной системы мониторинга и оповещения поможет оперативно реагировать на критические изменения в загрузке сети.

Эти графики помогут понять распределение нагрузки на разные ресурсы для каждой архитектуры. Для анализа зависимости между объемом переданных данных и количеством пользователей или устройств рассмотрим полученные при моделировании данные.

Таблица 6

Проанализируем зависимости объема переданных данных от количества устройств

Количество пользователей	Объем данных (ГБ)
0	0
25	50
75-100	120
150	170
200	210

На основе полученных данных построим график (рис. 8).

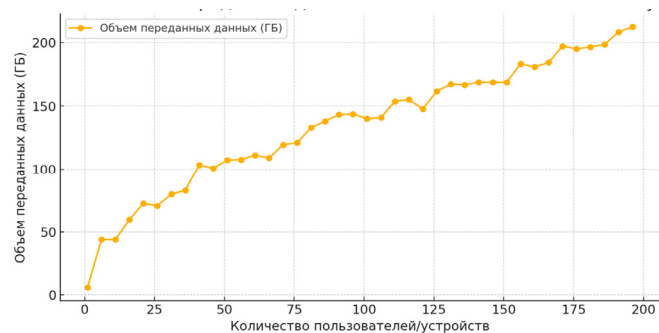


Рис. 8. График зависимости объема переданных данных от количества устройств

Объем переданных данных увеличивается с ростом числа пользователей или устройств, но имеет вариации из-за разной активности. Количество пользователей/устройств растет от нескольких единиц до сотен, чтобы отразить малую и большую нагрузку. График демонстрирует устойчивый рост объема передаваемых данных при увеличении количества пользователей или устройств в системе. Начальный участок графика, от 0 до примерно 25 пользователей, показывает самый резкий рост - от 0 до 50 ГБ, что говорит о высокой активности первых пользователей системы. Далее наблюдается более плавный, но стабильный рост объема данных. При достижении отметки в 75-100 пользователей график показывает небольшое замедление роста, что может свидетельствовать о достижении некоторого оптимального уровня использования системы.

В диапазоне от 100 до 150 пользователей наблюдается равномерный рост с небольшими колебаниями, а после 150 пользователей снова заметно увеличение скорости роста объема передаваемых данных. К моменту достижения 200 пользователей/устройств общий объем переданных данных достигает примерно 210 ГБ.

Для улучшения системы рекомендуется внедрить систему кэширования часто запрашиваемых данных, что позволит снизить нагрузку на каналы передачи данных. Также стоит рассмотреть возможность оптимизации форматов, передаваемых данных и внедрение алгоритмов сжатия для уменьшения общего объема трафика. Важно провести анализ характера передаваемых данных для выявления потенциально избыточной информации и оптимизации протоколов передачи.

Учитывая стабильный рост нагрузки, рекомендуется заранее планировать масштабирование инфраструктуры и увеличение пропускной способности каналов связи. Следует внедрить систему мониторинга и прогнозирования роста трафика для своевременного принятия мер по расширению технических возможностей системы. Также рекомендуется разработать политики управления трафиком и приоритезации данных для обеспечения оптимальной производительности при пиковых нагрузках.

Особое внимание стоит уделить оптимизации работы системы в диапазоне 75-100 пользователей, где наблюдается замедление роста, возможно, путем перераспределения нагрузки или оптимизации алгоритмов обработки данных. Также рекомендуется провести дополнительный анализ причин ускоренного роста трафика после отметки в 150 пользователей для предотвращения потенциальных проблем с производительностью в будущем. Влияние числа пользователей на надежность сведем в таблицу 5.

Таблица 5

Влияние числа пользователей на надежность

Количество пользователей	Надежность облачных узлов (%)	Надежность туманных узлов (%)
0-100	92	98
100-300	87	95
300-400	85	93
400-500	82	90

Представим в виде графика (рис. 9).

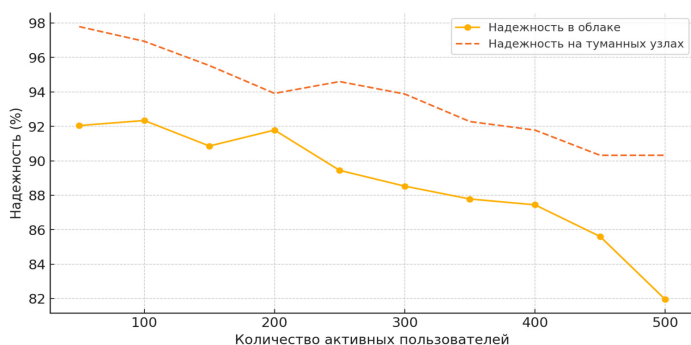


Рис. 9. Влияние числа активных устройств на надежность

С ростом числа пользователей надежность в облаке снижается более значительно по сравнению с туманными вычислениями, которые остаются более стабильными. На основе представленного графика можно сделать детальный анализ зависимости надежности системы от количества активных пользователей. При небольшом количестве пользователей (до 100) система показывает высокую надежность (около 98% для туманных узлов и 92% для облачной инфраструктуры). Однако с увеличением нагрузки наблюдается постепенное снижение показателей надежности обеих систем. Особенно заметное падение происходит при достижении отметки в 400-500 активных пользователей, где надежность облачной системы падает до 82%, а туманных узлов до 90%.

Для улучшения производительности системы рекомендуется внедрить несколько технических решений.

В первую очередь стоит реализовать динамическое масштабирование облачных ресурсов, которое будет автоматически адаптироваться под текущую нагрузку. Также важно оптимизировать распределение нагрузки между облачными и туманными узлами, отдавая предпочтение обработке данных на туманных узлах, так как они демонстрируют более высокую надежность при росте нагрузки.

Следует внедрить систему предварительного кэширования часто запрашиваемых данных на туманных узлах, что снизит нагрузку на облачную инфраструктуру. Необходимо также реализовать механизмы автоматического восстановления после сбоев и проактивного мониторинга состояния системы, что позволит предотвращать потенциальные проблемы до их возникновения.

Критическим порогом является нагрузка в 300-400 пользователей, после которой наблюдается значительное падение надежности. Поэтому рекомендуется установить автоматические триггеры для запуска дополнительных вычислительных ресурсов при приближении к этому порогу. Также стоит рассмотреть возможность географического распределения нагрузки между несколькими дата-центрами для повышения общей отказоустойчивости системы.

Для долгосрочного улучшения показателей рекомендуется провести углубленный анализ причин падения производительности при высоких нагрузках и разработать архитектурные решения, специально оптимизированные под работу с большим количеством одновременных пользователей. Это может включать пересмотр текущих алгоритмов балансировки нагрузки и оптимизацию процессов обработки данных.

Рекомендации по полученным результатам

На основе приведенного анализа имитационного моделирования можно дать рекомендации для улучшения производительности, надежности и эффективности использования ресурсов в туманных и облачных вычислениях.

1. Как оптимизировать и распределить задачи между туманными и облачными узлами? Поскольку график показывает, что туманные узлы обеспечивают более низкое время отклика, задачи, требующие минимальной задержки (например, IoT-устройства и приложения реального времени), стоит размещать именно на туманных узлах. Это становится особенно важно для приложений, где время отклика критично, например, в промышленном IoT или умных городах. Это позволяет снизить задержки при передаче данных.

Учитывая, что при высоких нагрузках облачные узлы показывают повышенное время отклика, можно настроить систему так, чтобы часть задач перераспределялась на туманные узлы для равномерного распределения нагрузки, что позволит разгрузить облако.

2. Как повысить энергоэффективность? Графики потребления энергии показывают, что туманные узлы потребляют меньше энергии, особенно при высоких нагрузках. Это значит, что можно отдавать предпочтение туманным узлам для выполнения задач с высоким энергопотреблением, что позволит сократить затраты на энергопотребление. Комбинирование облака и туманных узлов может обеспечить оптимальный баланс между производительностью и энергозатратами, особенно для приложений с меняющимися нагрузками.

3. Как вести учет условий эксплуатации (например, числа активных пользователей)? Можно увеличить количество туманных узлов в перегруженных зонах. С ростом числа пользователей графики показывают, что производительность облака снижается быстрее, чем у туманных узлов. Если предвидится высокая нагрузка, стоит увеличить количество туманных узлов в ключевых местах. Настройка механизмов балансировки нагрузки между узлами может помочь поддерживать более стабильное время отклика и надежность, особенно в условиях высокой активности пользователей.

4. Как влияет рассмотрение географического распределения узлов на снижение задержек? График зависимости задержки от расстояния показывает, что близость узлов к конечным устройствам значительно снижает задержку. Рекомендуется размещать туманные узлы в непосредственной близости к наиболее активным устройствам, чтобы минимизировать задержку. Если невозможно физически разместить узлы ближе, можно рассмотреть оптимизацию маршрутизации, чтобы выбирать узлы с наименьшей задержкой в пределах доступной сети.

5. Как осуществить планирование масштабируемости для поддержки растущего числа пользователей? Графики показывают, что с ростом числа пользователей время отклика и надежность могут ухудшаться. Можно рассмотреть автоматическое масштабирование инфраструктуры для поддержки пиковых нагрузок, добавляя дополнительные ресурсы только при необходимости. При настройке туманных и облачных узлов можно выделить приоритетные узлы для задач с высокими требованиями к QoS, чтобы гарантировать их стабильную работу даже при высокой нагрузке.

Эти рекомендации помогут улучшить производительность, минимизировать задержки, снизить энергопотребление и обеспечить надежность туманных и облачных вычислений, адаптируя их под изменяющиеся условия и рост числа пользователей.

Заключение

В области надежности системы туманные вычисления продемонстрировали более высокую устойчивость – при нагрузке в 400-500 активных пользователей надежность туманных узлов составила 90%, в то время как облачная инфраструктура показала снижение до 82%. При малых нагрузках (до 100 пользователей) разница менее существенна: 98% для туманных и 92% для облачных вычислений.

Анализ загрузки сети показал, что облачные системы работают при стабильно высокой нагрузке 65-75%, в то время как туманные узлы демонстрируют более низкие значения (40-60%) с большей волатильностью. Пиковые значения нагрузки для облачных систем достигают 75% около 5-го часа работы, а минимальные показатели туманных вычислений опускаются до 40% в районе 13-го часа.

В части объема передаваемых данных выявлена нелинейная зависимость от количества пользователей: наиболее интенсивный рост наблюдается в диапазоне до 25 пользователей (до 50 ГБ данных), после чего происходит замедление роста в диапазоне 75-100 пользователей. При достижении 200 пользователей общий объем переданных данных составляет около 210 ГБ.

Частота отказов системы показывает зависимость от нагрузки: при малой нагрузке фиксируется около 12 отказов, с увеличением нагрузки до 85-90% частота достигает максимума в 19 отказов, после чего наблюдается небольшое снижение до 18 отказов при максимальной нагрузке.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования гибридного подхода, комбинирующего преимущества обеих архитектур: туманные вычисления эффективны для задач, требующих минимальной задержки и высокой надежности, в то время как облачная инфраструктура лучше подходит для ресурсоемких операций с большими объемами данных. Следовательно, необходима разработка адаптивного алгоритма маршрутизации в зависимости от типа задач.

Литература

1. Го А. Система управления дорожным движением на основе технологии Блокчейн и Интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 10. С. 28-35.
2. Глушаков Е.В. Облачные и туманные вычисления: архитектура, моделирование, применение. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 180 с.
3. Калашиников А.С., Гагарин Ю.Е. Облачно-туманные технологии // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 137-140.
4. Бакай Ю.О., Карташевский И.В. Исследование систем моделирования для туманных вычислений: особенности, преимущества и недостатки // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Т. 9, № 4(42). С. 37-43.
5. Gasimov V.A., Aliyeva Sh.Kh., Assanova Zh.S. Implementation of industrial internet of things technologies using Edge, Fog, and Cloud computing // Problems of Informatization and Management. 2023. Vol. 3, no. 75, pp. 16-20.
6. Volkov A.O. Evaluation of cloud computing cluster performance // T-Comm. 2020. Vol. 14, No. 12, pp. 72-79.
7. Saurabh, Dhanaraj R. K. A Review Paper on Fog Computing Paradigm to solve Problems and Challenges during Integration of Cloud with IoT // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2007, No. 1, pp. 1-11.
8. Quy Vu. Kh., Hau N. V., Anh D. V., Ngoc Le. A. Smart healthcare IoT applications based on fog computing: architecture, applications and challenges // Complex and Intelligent Systems. 2022. Vol. 8, No. 5, pp. 3805-3815.
9. Hu Zh., Xu X., Zhang Yu. et al. Cloud-edge cooperation for meteorological radar big data: a review of data quality control // Complex and Intelligent Systems. 2022. Vol. 8, No. 5, pp. 3789-3803.
10. Arora U., Singh N. IoT application modules placement in heterogeneous fog-cloud infrastructure // International Journal of Information Technology (Singapore). 2021. Vol. 13, No. 5, pp. 1975-1982.
11. Dabiri S., Azizi S., Abdollahpouri A. Optimizing deadline violation time and energy consumption of IoT jobs in fog-cloud computing // Neural Computing & Applications. 2022. Vol. 34, No. 23, pp. 21157-21173.
12. Khiat A., Haddadi M., Bahnes N. Genetic-Based Algorithm for Task Scheduling in Fog-Cloud Environment // Journal of Network and Systems Management. 2024. Vol. 32, No. 1. P. 3.
13. Alli A.A., Alam M.M. SecOFF-FCIoT: Machine learning based secure offloading in Fog-Cloud of things for smart city applications // Internet of Things (Netherlands). 2019. Vol. 7. P. 100070.
14. Yermakov S.G., Khalil M.M., Khomonenko A.D., Bukharova K.A. Evaluating the efficiency of fog computing on the internet of things using a Non-Markov model // T-Comm. 2022. Vol. 16, No. 12, pp. 46-52.

15. Гольшико А. IoT в облаках, за туманом и на границе // CONNECT № 9-10, 2024. С. 110-113.

16. Куприянов Д.О. Математическое моделирование потока заявок к облачному вычислительному кластеру // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 10. С. 39-44.

17. Черепенин В.А., Воробьев С.П. Интеграция и оптимизация систем облачных, туманных и граничных вычислений: моделирование, задержки и алгоритмы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2024. № 3. С. 19-25.

18. Кирсанова А.А., Радченко Г.И., Черных А.Н. Обзор технологий организации туманных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 3. С. 35-63.

19. Лоднева О.Н. Аналитический обзор методов построения туманных вычислений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16, № 2. С. 358-370.

20. Лоднева О.Н., Ромасевич Е.П. Анализ трафика устройств Интернета вещей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 1. С. 149-169.

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF TASKS IN THE CLOUD AND FOG COMPUTING SYSTEM

Elena V. Glushak, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, evglushak@yandex.ru

Dmitry S. Klyuev, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, klyuevd@yandex.ru

Vladimir I. Volovach, Povolzhskiy State University of Service, Tolyatti, Russia, volovach.vi@mail.ru

Abstract

This article presents a comparative analysis of the functioning of cloud and fog computing using the FogTorch software tool. The research focuses on modeling and evaluating the performance, reliability, and efficiency of distributed computing systems. The paper describes in detail the stages of modeling, including infrastructure definition, application requirements configuration, configuration of location and routing policies, as well as the process of collecting and analyzing the results. Based on experimental data, a detailed analysis of node failure rates, system availability, data processing time, and network resource utilization was performed depending on various load factors. The results of the study show that cloud computing demonstrates higher reliability with an increase in the number of users compared to cloud systems, although it has lower performance when processing resource-intensive tasks. Special attention is paid to the analysis of the dependence of the volume of transmitted data on the number of connected devices and the influence of the geographical distribution of nodes on delays in the system. Based on the results obtained, practical recommendations are proposed for optimizing the distribution of tasks between cloud and fog nodes, improving energy efficiency, and planning for system scalability, taking into account the growing number of users. The study also includes an analysis of system performance under various load scenarios and provides specific metrics for evaluating the effectiveness of distributed computing. The results obtained can be used in the design and optimization of hybrid cloud-fog architectures, especially in the context of the development of Internet of Things technologies and industrial automation systems. The study demonstrates the importance of an integrated approach to the design of hybrid cloud-fog systems and suggests specific strategies to improve their efficiency in the face of dynamically changing loads and requirements of modern applications.

Keywords: fog and cloud computing, performance, network load, FogTorch program, failure rate, data processing time, system reliability

References

- [1] A. Guo, "Traffic management system based on Blockchain technology and the Internet of Things", *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 10, pp. 28-35.
- [2] E.V. Glushak, "Cloud and fog computing: architecture, modeling, application", Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2025, 180 p.
- [3] A.S. Kalashnikov, and Yu.E. Gagarin, "Cloud-fog technologies, in High-Tech Technologies in Instrumentation and Mechanical Engineering and Development of Innovation Activities in Higher Education Institutions", *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference*, Moscow State Technical University of N.E. Bauman, 2024, pp. 137-140.

- [4] Yu.O. Bakay, I.V. Kartashevsky, "Modeling systems for fog computing: features, advantages, and disadvantages", *International Journal of Information Technologies and Energy Efficiency*, vol. 9, no. 4(42), 2024, pp. 37-43.
- [5] V.A. Gasimov, Sh.Kh. Aliyeva, and Zh.S. Assanova, "Implementation of industrial internet of things technologies using Edge, Fog, and Cloud computing", *Problems of Informatization and Management*, vol. 3, no. 75, 2023, pp. 16-20.
- [6] A.O. Volkov, "Evaluation of cloud computing cluster performance", *T-Comm*. 2020. Vol. 14, No. 12, pp. 72-79.
- [7] Saurabh, Dhanaraj, R.K., "A Review Paper on Fog Computing Paradigm to Solve Problems and Challenges During Integration of Cloud with IoT", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2007, no. 1, 2021, pp. 1-11.
- [8] Vu Kh. Quy, N.V. Hau, D.V. Anh, Le A. Ngoc, "Smart healthcare IoT applications based on fog computing: architecture, applications, and challenges", *Complex and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 5, 2022, pp. 3805-3815.
- [9] Zh. Hu, X. Xu, Yu. Zhang, et al., "Cloud-edge cooperation for meteorological radar big data: a review of data quality control", *Complex and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 5, 2022, pp. 3789-3803.
- [10] U. Arora, N. Singh, "IoT application modules placement in heterogeneous fog-cloud infrastructure", *International Journal of Information Technology (Singapore)*, vol. 13, no. 5, 2021, pp. 1975-1982.
- [11] S. Dabiri, S. Azizi, A. Abdollahpouri, "Optimizing deadline violation time and energy consumption of IoT jobs in fog-cloud computing", *Neural Computing & Applications*, vol. 34, no. 23, 2022, pp. 21157-21173.
- [12] A. Khiat, M. Haddadi, N. Bahnes, "Genetic-Based Algorithm for Task Scheduling in Fog-Cloud Environment", *Journal of Network and Systems Management*, vol. 32, no. 1, 2024, p. 3.
- [13] A.A. Alli, and M.M. Alam, "SecOFF-FCIoT: Machine learning based secure offloading in Fog-Cloud of things for smart city applications", *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 7, 2019, p. 100070.
- [14] S.G. Yermakov, M.M. Khalil, A.D. Khomonenko, and K.A. Bukharova, "Evaluating the efficiency of fog computing on the internet of things using a Non-Markov model", *T-Comm*, vol. 16, no. 12, 2022, pp. 46-52.
- [15] A. Golysko, "IoT in clouds, beyond the fog, and at the edge", *CONNECT*, no. 9-10, 2024, pp. 110-113.
- [16] D.O. Kupriyanov, "Mathematical modeling of the flow of applications to a cloud computing cluster", *T-Comm*, 2020, vol. 14, No. 10, pp. 39-44.
- [17] V.A. Cherepennin, S.P. Vorobyov, "Integration and optimization of cloud, fog, and edge computing systems: modeling, delays, and algorithms", *Izv. Vuzov. Severo-Kavk. Region. Techn. Sci.*, no. 3, 2024, pp. 19-25.
- [18] A.A. Kirsanova, G.I. Radchenko, A.N. Chernykh, "Review of fog computing organization technologies", *Bulletin of South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*, vol. 9, no. 3, 2020, pp. 35-63.
- [19] O.N. Lodneva, "Analytical review of fog computing construction methods", *Modern Information Technologies and IT Education*, vol. 16, no. 2, 2020, pp. 358-370.
- [20] O.N. Lodneva, E.P. Romasovich, "Analysis of Internet of Things device traffic", *Modern Information Technologies and IT Education*, vol. 14, no. 1, 2018, pp. 149-169.

Information about authors:

Elena V. Glushak, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Associate Professor, PhD, Associate Professor of the Department of Networks and Communication Systems, Samara, Russia, ORCID 0009-0000-5494-9746

Dmitry S. Klyuev, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Professor, Ph.D., Head of the Department of Radioelectronic Systems, Samara, Russia, ORCID 0000-0002-9125-7076

Vladimir I. Volovach, Povolzhskiy State University of Service, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Acting Director of the Higher School of Advanced Production Technologies, Tolyatti, Russia, ORCID 0000-0002-0201-2545