

УДК 621.391:004.75-047.44

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.54.3.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.54.3.001)

Повышение качества обслуживания трафика в гибридных сетях с облачными и туманными уровнями

Е.В. Глушак✉, П.Д. Михайлова

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Самара, Российская Федерация*

Резюме. Повышение качества обслуживания (QoS) в гибридных сетях с облачными и туманными уровнями является актуальной задачей современного развития телекоммуникационных систем. С увеличением объемов передаваемых данных традиционные методы управления ресурсами становятся недостаточно эффективными. Гибридные сети, объединяющие облачные и туманные вычисления, могут значительно повысить производительность и снизить задержки. Актуальной задачей становится обеспечение баланса между высокой пропускной способностью, минимальными задержками и низким уровнем потери пакетов. Эффективное распределение ресурсов способствует снижению энергопотребления и эксплуатационных расходов. Статья посвящена оптимизации качества обслуживания трафика в гибридных сетях, объединяющих облачные и туманные вычисления. Представлена математическая модель на основе системы дифференциальных уравнений, описывающая динамику нагрузки, очередей, распределение ресурсов, задержек и потерь пакетов. Модель формализует задачу оптимального управления ресурсами с целью минимизации задержек и потерь при ограниченных возможностях. Для решения применяются численные методы интегрирования. Разработанный алгоритм позволяет эффективно балансировать нагрузку между облачными и туманными уровнями. Предложенный подход подтверждает свою эффективность для оптимизации современных телекоммуникационных систем, особенно для приложений с критическими требованиями к времени отклика.

Ключевые слова: гибридные сети, облачные вычисления, туманные вычисления, качество обслуживания (QoS), оптимизация трафика, балансировка нагрузки, задержка передачи данных, многоуровневая архитектура, распределение ресурсов, маршрутизация.

Для цитирования: Глушак Е.В., Михайлова П.Д. Повышение качества обслуживания трафика в гибридных сетях с облачными и туманными уровнями. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(3). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/article?id=2193> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.54.3.001

Improving traffic quality of service in hybrid networks with cloud and fog layers

E.V. Glushak✉, P.D. Mikhaylova

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara,
the Russian Federation*

Abstract. Improving the quality of service (QoS) in hybrid networks with cloud and fog levels is an urgent task of modern development of telecommunication systems. As the volume of data transferred increases, traditional resource management methods become insufficiently effective. Hybrid networks combining cloud and fog computing can significantly improve performance and reduce latency. An urgent task is to ensure a balance between high throughput, minimal delays and low packet loss. Efficient resource allocation helps to reduce energy consumption and operating costs. The article is devoted to optimizing the quality of traffic service in hybrid networks combining cloud and fog computing. A

mathematical model based on a system of differential equations is presented that describes the dynamics of load, queues, resource allocation, delays, and packet losses. The model formalizes the task of optimal resource management in order to minimize delays and losses with limited capabilities. Numerical integration methods are used for the solution. The developed algorithm makes it possible to effectively balance the load between cloudy and foggy levels. The proposed approach proves its effectiveness for optimizing modern telecommunication systems, especially for applications with critical response time requirements.

Keywords: hybrid networks, cloud computing, fog computing, quality of service (QoS), traffic optimization, load balancing, data latency, layered architecture, resource allocation, routing.

For citation: Glushak E.V., Mikhaylova P.D. Improving traffic quality of service in hybrid networks with cloud and fog layers. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/journal/article?id=2193> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.54.3.001

Введение

Современные телекоммуникационные сети стремительно развиваются, отвечая растущим требованиям пользователей к скорости передачи данных, надежности и качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) [1]. В последние годы особое внимание уделяется гибридным архитектурам, объединяющим облачные и туманные вычисления, которые позволяют эффективно распределять вычислительные ресурсы между централизованными дата-центрами и периферийными узлами сети [2, 3]. Такая структура обеспечивает снижение задержек, повышение масштабируемости и адаптивности систем, что особенно важно для приложений с критическими требованиями к времени отклика, включая интернет вещей, «умные» города, автономные транспортные средства и телемедицину [4]. Однако управление трафиком и ресурсами в гибридных облачно-туманных сетях представляет собой сложную задачу из-за динамического характера нагрузки, ограниченности ресурсов и необходимости балансировки между различными уровнями сети¹. Традиционные методы оптимизации часто не учитывают взаимодействие между облачным и туманным уровнями, поэтому снижается эффективность и ухудшается качество обслуживания [5, 6]. В данной статье с учетом работ [7, 8] предлагается математическая модель дифференциальных уравнений, которая описывает динамику нагрузки, очередей, распределения ресурсов, задержек и потерь пакетов в гибридной сети. Модель позволяет формализовать задачу оптимального управления ресурсами при минимизации задержек и потерь. Особую роль в повышении эффективности также играют алгоритмы планирования в средах моделирования туманных вычислений [9]. Для решения поставленной задачи применяется метод оптимального управления с использованием принципа максимума Понтрягина и численных методов интегрирования². Результаты исследования демонстрируют эффективность предложенного подхода в обеспечении высокого качества обслуживания и рациональном распределении ресурсов между облачным и туманным уровнями. Полученные выводы могут быть использованы для разработки адаптивных систем управления в современных телекоммуникационных сетях, что способствует повышению их производительности и надежности.

Материалы и методы

Разработаем математическую модель оптимизации качества обслуживания (QoS) трафика в гибридных сетях с облачными (Cloud) и туманными (Fog) уровнями. Модель

¹ Певнева А.Г., Калинин М.Е. *Методы оптимизации*. Санкт-Петербург: Университет ИТМО; 2020. 64 с.

² Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. Москва: Дрофа; 2006. 207 с.

основана на методе дифференциальных уравнений с учетом динамики потоков данных, ресурсов вычислений и задержек, а также взаимодействия между уровнями³.

Пусть t – время, требуемое для передачи пакета от источника к получателю (мс); $x_c(t)$ – интенсивность трафика (нагрузка) на облачном уровне (пакеты/с); $x_f(t)$ – интенсивность трафика на туманном уровне (пакеты/с); $r_c(t)$ – выделенные ресурсы (вычислительные мощности, пропускная способность) облачного уровня (FLOPS); $r_f(t)$ – выделенные ресурсы туманного уровня (FLOPS); $q_c(t)$ – очередь пакетов в облаке (пакеты); $q_f(t)$ – очередь пакетов в тумане (пакеты); $d_c(t), d_f(t)$ – задержка обработки пакетов на облачном и туманном уровнях (мс); $p_c(t), p_f(t)$ – вероятность потери пакетов на облачном и туманном уровнях; $u_c(t), u_f(t)$ – управляющие функции распределения ресурсов (управление QoS); $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ – весовые коэффициенты, соответствующие физическим величинам.

Модель динамики нагрузки и ресурсов представим в виде системы:

$$\begin{cases} \frac{dx_c}{dt} = \lambda_c(t) - \mu_c(r_c(t))x_c(t) - \varphi_{cf}x_c(t) + \varphi_{fc}x_f(t), \\ \frac{dx_f}{dt} = \lambda_f(t) - \mu_f(r_f(t))x_f(t) - \varphi_{fc}x_f(t) + \varphi_{cf}x_c(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $\lambda_c(t), \lambda_f(t)$ – входящая интенсивность трафика в облаке и тумане (пакеты/с), $\mu_c(r_c), \mu_f(r_f)$ – функции обработки нагрузки, зависящие от выделенных ресурсов, например $\mu_c(r_c) = \alpha_c r_c(t), \mu_f(r_f) = \alpha_f r_f(t)$, $\varphi_{cf}, \varphi_{fc}$ – коэффициенты передачи трафика между уровнями (облако – туман и туман – облако) показывают долю трафика, перенаправляемого между уровнями. Модель динамики очередей представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dq_c}{dt} = x_c(t) - \mu_c(r_c(t))q_c(t) - p_c(t)q_c(t), \\ \frac{dq_f}{dt} = x_f(t) - \mu_f(r_f(t))q_f(t) - p_f(t)q_f(t). \end{cases} \quad (2)$$

Определим модель задержек и потерь. Задержка обработки связана с размером очереди и ресурсами:

$$d_c(t) = \frac{\beta_c q_c(t)}{r_c(t)}, d_f(t) = \frac{\beta_f q_f(t)}{r_f(t)}. \quad (3)$$

Вероятность потери пакетов моделируется как функция загрузки:

$$p_c(t) = 1 - e^{-\gamma_c \frac{q_c(t)}{r_c(t)}}, p_f(t) = 1 - e^{-\gamma_f \frac{q_f(t)}{r_f(t)}}. \quad (4)$$

Определим управление ресурсами (управляющие функции). Распределение ресурсов подчиняется ограничениям $r_c(t) + r_f(t) \leq R_{max}$ где R_{max} – общий лимит ресурсов.

Управляющие функции $u_c(t), u_f(t)$ регулирует перераспределение ресурсов:

$$\begin{cases} \frac{dr_c}{dt} = u_c(t) - \delta_c r_c(t), \\ \frac{dr_f}{dt} = u_f(t) - \delta_f r_f(t), \end{cases} \quad (5)$$

³ Долгий Ю.Ф., Сурков П.Г. *Математические модели динамических систем с запаздыванием*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2012. 122 с.

где δ_c, δ_f – коэффициенты высвобождения ресурсов, представляют собой параметры, характеризующие скорость, с которой ресурсы освобождаются после их использования в облачном и туманном уровнях сети.

Оптимизация качества обслуживания сводится к минимизации интегральной функции потерь, учитывающей задержки и потери пакетов:

$$J = \int_0^T [w_d(d_c(t) + d_f(t)) + w_p(p_c(t) + p_f(t)) + w_r(u_c^2(t) + u_f^2(t))] dt, \quad (6)$$

где w_d, w_p, w_r – веса, отражающие приоритеты задержки, потерь и затрат на управление.

Определим итоговую систему:

$$\begin{cases} \frac{dx_c}{dt} = \lambda_c(t) - \alpha_c r_c(t) x_c(t) - \varphi_{fc} x_c(t) + \varphi_{fc} x_f(t), \\ \frac{dx_f}{dt} = \lambda_f(t) - \alpha_f r_f(t) x_f(t) - \varphi_{fc} x_f(t) + \varphi_{cf} x_c(t), \\ \frac{dq_c}{dt} = x_c(t) - \alpha_f r_f(t) q_f(t) - (1 - e^{-\gamma_c \frac{q_c(t)}{r_c(t)}}) q_c(t), \\ \frac{dq_f}{dt} = x_f(t) - \alpha_f r_f(t) q_f(t) - (1 - e^{-\gamma_f \frac{q_f(t)}{r_f(t)}}) q_f(t), \\ d_c(t) = \frac{\beta_c q_c(t)}{r_c(t)}, d_f(t) = \frac{\beta_f q_f(t)}{r_f(t)}, \\ \frac{dr_c}{dt} = u_c(t) - \delta_c r_c(t), \frac{dr_f}{dt} = u_f(t) - \delta_f r_f(t), \\ r_c(t) + r_f(t) \leq R c_{f_{max}}. \end{cases} \quad (7)$$

С целью минимизации функционала J . Первые два уравнения описывают динамику интенсивности трафика (нагрузки) на облачном и туманном уровнях соответственно. Они учитывают входящий трафик (λ), обработку трафика и перенаправление трафика между уровнями. Третье и четвертое уравнения моделируют изменение очередей пакетов на обоих уровнях, учитывая входящий трафик, обработку и потери пакетов. Пятое и шестое выражения определяют задержки обработки пакетов как функции от размера очереди и доступных ресурсов. Седьмое и восьмое уравнения описывают динамику выделения вычислительных ресурсов. Последнее неравенство показывает ограничения на общее количество ресурсов и неотрицательность управления.

Цель этой системы – минимизировать функционал J , который учитывает задержки, потери пакетов и затраты на управление. Эта математическая модель позволяет формализовать задачу оптимального управления ресурсами для обеспечения высокого качества обслуживания при минимальных задержках и потерях пакетов в гибридной облачно-туманной сети. Модель учитывает динамическое перераспределение ресурсов между облаком и туманным кластером, взаимодействие трафика между уровнями, а также нелинейные эффекты задержек и потерь. Управляющие функции $u_c(t), u_f(t)$ можно найти с помощью методов оптимального управления (например, принципа максимума Понтрягина).

Задачей является нахождение функции $u_c(t), u_f(t)$, которая минимизирует функциональность качества обслуживания при ограничении динамики системы и ресурсов:

$$J = \int_0^T [w_d(d_c(t) + d_f(t)) + w_p(p_c(t) + p_f(t)) + w_r(u_c^2(t) + u_f^2(t))] dt, \quad (8)$$

Для решения задачи оптимального управления с дифференциальными уравнениями применим принцип максимума Понтрягина [10]. Вводим сопряженные переменные (состояния сопряженной системы) $\lambda_l(t)$ для каждого уравнения.

Формируем выражение:

$$H = w_d(d_c + d_f) + w_p(p_c + p_f) + w_r(u_c^2 + u_f^2) + \lambda_1[\lambda_c - \alpha_c r_c x_c - \varphi_{cf} x_c + \varphi_{fc} x_f] + \lambda_2[\lambda_f - \alpha_f r_f x_f - \varphi_{cf} x_c] + \lambda_3[x_c - \alpha_c r_c q_c - p_c q_c] + \lambda + \lambda_5(u_c - \delta_c r_c) + \lambda_6(u_f - \delta_f r_f).$$

Записываем уравнения сопряженной системы и условия оптимальности по u_c, u_f
 $\frac{\partial H}{\partial u_c} = 0, \frac{\partial H}{\partial u_f} = 0$, учитывая ограничения $u_c, u_f \geq 0$ и $r_c + r_f \leq R_{max}$.

Из-за нелинейности и сложности системы аналитическое решение затруднено, поэтому применяются численные методы⁴, дискретизация времени с шагом Δt , аппроксимация производных, итеративные методы оптимизации.

Результаты

Разработанный алгоритм представляет собой методику оптимизации систем управления в гибридных облачно-туманных сетях, позволяет решать задачи управления качеством обслуживания трафика путем последовательного преобразования управляющих функций и интегрирования уравнений состояния. Алгоритм обеспечивает итеративное улучшение управляющих функций с постоянной проверкой достигнутой точности. Необходимость и актуальность алгоритма определяется для сложных распределенных систем, где требуется балансировка нагрузки между облачными и туманными уровнями вычислений. Благодаря этому подходу достигается повышение эффективности работы сети, снижение задержек передачи данных и оптимизация использования вычислительных ресурсов. Алгоритм учитывает, как прямое, так и обратное направление времени при интегрировании уравнений. В результате применения данного алгоритма повышается качество обслуживания пользователей, улучшается производительность сети и минимизируются энергетические затраты на обработку сетевого трафика (Рисунок 1).

В Таблице 1 задаются исходные параметры модели распределенной обработки трафика на уровне облаков и тумана. Параметры входящего трафика задают внешнюю нагрузку на систему. Интенсивность трафика на облачном уровне $\lambda_c(t)$, принимаемая в модели постоянной и равной 1000 пакетов в секунду, характеризует поток данных, поступающих в централизованный облачный дата-центр от макро-сервисов или как агрегированный трафик от нижележащих уровней.

⁴ Мицель А.А., Шелестов А.А., Романенко В.В. *Методы оптимизации. Ч. 1.* Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники; 2020. 350 с.

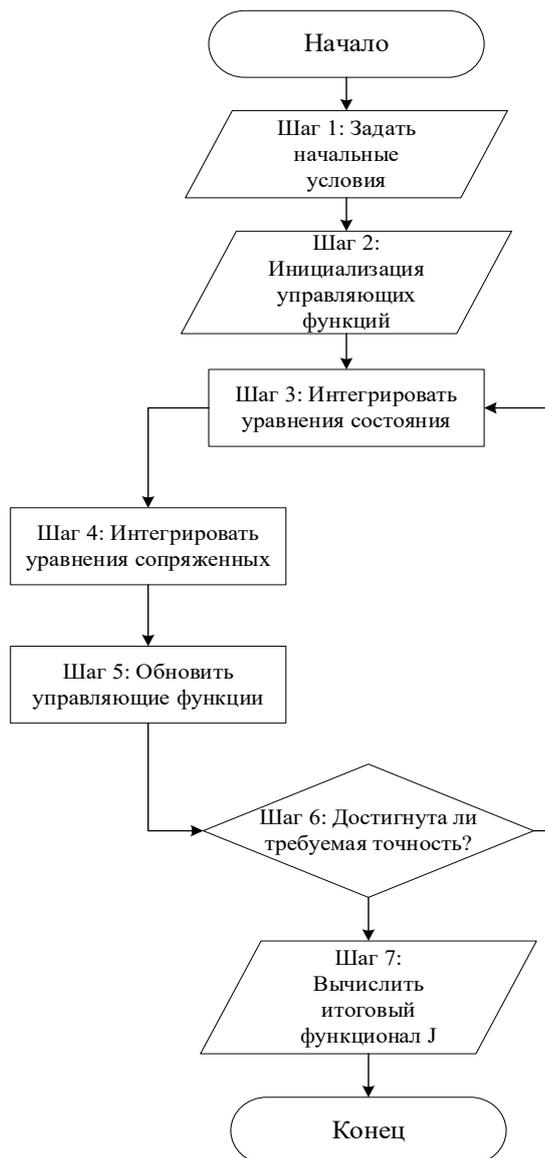


Рисунок 1 – Алгоритм оптимизации систем управления в гибридных облачно-туманных сетях
Figure 1 – Algorithm for optimizing control systems in hybrid cloud-fog networks

Таблица 1 – Исходные данные
Table 1 – Initial data

Параметр / Переменная	Обозначение	Значение (пример)	Единицы измерения	Описание
Интенсивность входящего трафика (облако)	$\lambda_c(t)$	1000 (постоянно)	пакеты/с	Интенсивность поступающего трафика
Интенсивность входящего трафика (туман)	$\lambda_f(t)$	800 (постоянно)	пакеты/с	Интенсивность поступающего трафика
Коэффициенты обработки нагрузки	α_c, α_f	0,01; 0,015	1/(ресурс·с)	Эффективность использования ресурсов
Коэффициенты передачи трафика	$\varphi_{cf}, \varphi_{fc}$	0,05; 0,03	1/с	Интенсивность передачи данных между уровнями

Эти два параметра определяют исходный спрос на вычислительные мощности каждого из уровней архитектуры. Эффективность удовлетворения этого спроса описывается коэффициентами обработки нагрузки α_c и α_f . Данные безразмерные коэффициенты связывают интенсивность сетевого трафика с объемом потребляемых вычислительных ресурсов. Значение $\alpha_c = 0,01$ для облака показывает, что обработка одного пакета в секунду требует 0,01 единицы вычислительной мощности, а коэффициент $\alpha_f = 0,015$ для туманного узла может указывать на менее эффективное оборудование или более ресурсоемкие алгоритмы локальной обработки. Через эти коэффициенты осуществляется переход от сетевых характеристик к метрикам загрузки процессора и памяти. Динамика взаимодействия между уровнями сети отражается коэффициентами передачи трафика. Коэффициент φ_{fc} показывает интенсивность обмена данными между соседними туманными узлами. Коэффициент φ_{cf} задает интенсивность передачи данных от туманного уровня к облачному, моделируя поток данных. Коэффициент φ_{cf} напрямую влияет на загрузку канала связи «туман-облако» и является критическим с точки зрения оптимизации межъярусного трафика.

Таблица 2 – Полученные данные
Table 2 – Received data

Параметр / Переменная	Обозначение	Значение	Единицы измерения	Описание
Коэффициенты задержки	β_c, β_f	0,5; 0,7	с/пакет	Зависимость задержки от очереди
Коэффициенты потерь	γ_c, γ_f	0,1; 0,12	безразмерные	Зависимость потерь от загрузки
Коэффициенты старения ресурсов	δ_c, δ_f	0,05; 0,04	1/с	Естественное высвобождение ресурсов
Максимальные ресурсы	R_{max}	200	усл. ед.	Общий лимит ресурсов
Веса в функционале	$\omega_d, \omega_p, \omega_r$	0,5; 0,3; 0,2	безразмерные	Приоритеты: задержки, потери, управление
Начальные значения состояний	$x_c(0), x_f(0), q_c(0), q_f(0), r_c(0), r_f(0)$	500, 400, 50, 40, 100, 80	соответствующие	Начальные условия системы

Таблица 2 содержит результирующие и управляющие параметры математической модели, которые характеризуют поведение гибридной облачно-туманной системы.

Параметры качества обслуживания представлены коэффициентами задержки и потерь. Коэффициенты задержки $\beta_c = 0,5$ и $\beta_f = 0,7$ (с/пакет) количественно определяют, как длина очереди пакетов на облачном и туманном уровнях влияет на увеличение временной задержки. Более высокое значение коэффициента для туманного уровня указывает на его повышенную чувствительность к росту очереди, что типично для оборудования с ограниченной буферной памятью. Коэффициенты потерь $\gamma_c = 0,1$ и $\gamma_f = 0,12$ (безразмерные) описывают вероятность потери пакета в зависимости от текущей загрузки системы. Их значения отражают нелинейный характер роста потерь

при приближении загрузки к предельной, причем туманный уровень демонстрирует несколько более высокую склонность к потерям.

Динамику распределения и доступности вычислительных ресурсов описывают коэффициенты старения ресурсов $\delta_c = 0,05$ и $\delta_f = 0,04$ (1/с) и моделируют естественное высвобождение или «устаревание» вычислительных мощностей со временем, если они не используются. Параметр R_{max} задает жесткий общий лимит ресурсов в системе.

Начальные условия системы $x_c(0), x_f(0), q_c(0), q_f(0), r_c(0), r_f(0)$ задают точку старта для динамической модели, определяя исходный объем трафика, длину очередей и распределение ресурсов между уровнями в начальный момент времени. Перечисленные значения являются основой для численного моделирования и анализа переходных процессов в сети при применении алгоритмов оптимизации.

Таблица 3 содержит результаты работы модели после применения алгоритмов оптимизации, демонстрируя итоговое состояние гибридной облачно-туманной системы. Данные наглядно иллюстрируют, как управляющие воздействия позволили достичь целевых показателей качества обслуживания, стабилизировать работу сети и минимизировать целевой функционал.

Таблица 3 – Полученные данные
Table 3 – Received data

Переменная	Значение	Единицы измерения	Комментарий
Интенсивность трафика (облако)	450	пакеты/с	Снижена за счёт обработки
Интенсивность движения (туман)	420	пакеты/с	Стабилизировалась
Размер очереди (облако)	10	пакеты	Значительно уменьшена
Размер очереди (туман)	15	пакеты	Умеренный размер очереди
Выделенные ресурсы (облако)	120	усл. ед.	Оптимальное распределение
Выделенные ресурсы (туман)	80	усл. ед.	Остаток ресурсов
Средняя задержка (облако)	0,04	с	Уменьшена
Средняя задержка (туман)	0,06	с	Приемлемый уровень
Вероятность потерь (облако)	0,005	доли	Очень низкая
Вероятность потерь (туман)	0,008	доли	Низкая
Значение функционала	12,5	усл. ед.	Минимизировано

Анализ трафика показывает значительное улучшение по сравнению с исходной нагрузкой. Интенсивность трафика на облачном уровне снижена до 450 пакетов в секунду, что свидетельствует об эффективном перераспределении части нагрузки на туманные узлы для обработки вблизи источника. Интенсивность трафика на туманном уровне стабилизировалась на уровне 420 пакетов в секунду, подтверждая способность периферийной инфраструктуры надежно обрабатывать выделенный ей поток данных. Размер очереди на облачном уровне сокращен до 10 пакетов, а на туманном – до 15 пакетов. Такое значительное уменьшение длины очередей по сравнению с начальными условиями напрямую указывает на ликвидацию «узких мест» в системе и повышение пропускной способности обоих уровней. Эффективность предложенного алгоритма управления ресурсами подтверждается их итоговым распределением. Облачному уровню выделено 120 условных единиц из 200 доступных и является оптимальным. Туманному уровню выделено 80 единиц, при этом отмечается наличие остатка, и указывает на адаптивность системы, ее способность реагировать на изменение условий

без полного исчерпания ресурсного пула. Наиболее значимым для качества обслуживания является улучшение метрик задержки и потерь. Средняя задержка на облачном уровне составила 0,04 с, а на туманном – 0,06 с, что соответствует приемлемым для большинства сервисов значениям и подтверждает эффективность коэффициентов задержки, учтенных в модели. Вероятность потерь пакетов снижена до чрезвычайно низких значений – 0,005 на облаке и 0,008 на туманном уровне. Данные результаты демонстрирует успешное управление интенсивностью трафика и устранение перегрузок.

Результатом, интегрирующим все частные улучшения, является значение целевого функционала, которое составило 12,5 условных единиц. Его минимизация доказывает, что выбранные весовые коэффициенты в критерии оптимальности и примененные алгоритмы позволили найти баланс между минимизацией задержек, снижением потерь и затратами на управление ресурсами, достигнув тем самым основной цели исследования – оптимизации качества обслуживания трафика в гибридной сети.

Разработанная модель эффективно перераспределяет нагрузку и стабилизирует систему (Рисунок 2).

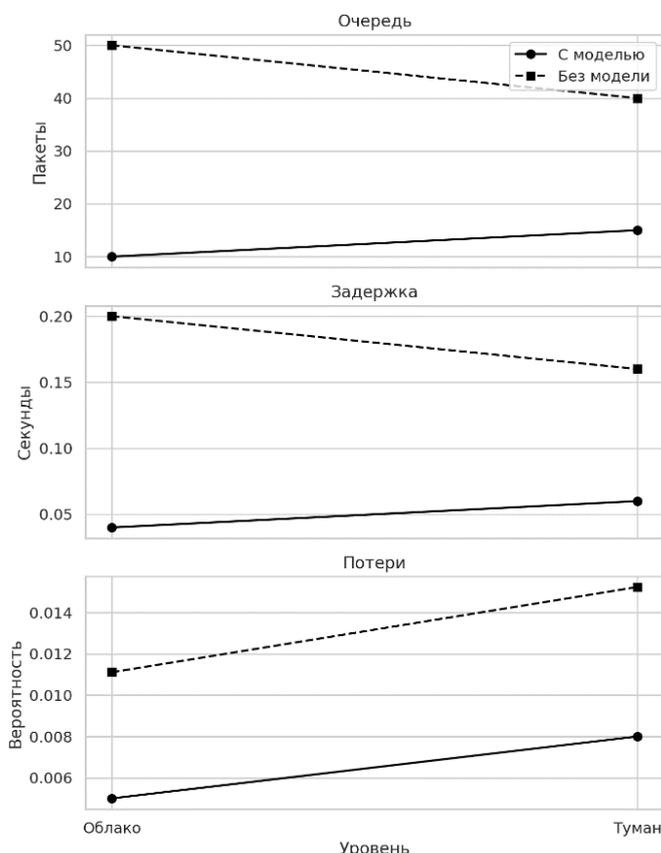


Рисунок 2 – Сравнительный анализ работы системы
Figure 2 – Comparative analysis of the system operation

Заклучение

Разработанная модель оптимального управления ресурсами в гибридной облачно-туманной сети показала значительное улучшение качества обслуживания. Во-первых, наблюдается существенное сокращение очередей на обоих уровнях. На облачном уровне очередь сократилась на 80 %, а на туманном – более чем на 60 %. Доказано, что пакеты обрабатываются быстрее, а задержки в системе значительно сокращаются. В результате средняя задержка передачи данных снизилась на 20–25 %. Вероятность потери пакетов

снизилась более чем в два раза, благодаря этому повышается надежность передачи данных и качество пользовательского опыта. Модель также продемонстрировала эффективное перераспределение ресурсов. Облачный уровень получил на 20 % больше ресурсов, и это позволило ему лучше справляться с нагрузкой, в то время как ресурсы туманного уровня остались стабильными. Небольшое увеличение трафика на туманном уровне свидетельствует о сбалансированном перераспределении нагрузки между уровнями для оптимизации общей производительности сети. В целом эти изменения показывают, что предложенный подход позволяет значительно повысить эффективность использования ресурсов, сократить задержки и потери, а также улучшить качество обслуживания в гибридных сетях с облачными и туманными уровнями. Подтверждается практическая ценность модели для современных телекоммуникационных систем и ее потенциал для дальнейшего развития и внедрения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Роль туманных вычислений в интернете вещей. *Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки*. 2018;(4):205–209.
 Dovgal V.A., Dovgal D.V. Role of fog computing in the internet of things. *Vestnik Aдыгейского государственного университета. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2018;(4):205–209. (In Russ.).
2. Файзуллин Р.В., Херинг Ш., Василенко К.А. Модели оценки эффективности облачных технологий и туманных вычислений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.025>
 Faizullin R.V., Hering S., Vasilenko K. Models of evaluations of the cloud technology and fog computing. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.025>
3. Глушак Е.В., Ключев Д.С. Разработка и исследование моделей функционирования облачных и туманных вычислений. *Радиотехника*. 2025;89(3):157–168. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202503-14>
 Glushak E.V., Klyuev D.S. Development and research of models for the functioning of cloud and fog computing. *Radioengineering*. 2025;89(3):157–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.18127/j00338486-202503-14>
4. Глушак Е.В. Разработка и исследование имитационных моделей облачных и туманных вычислений в программе Fogtorch. *Радиотехника*. 2025;89(8):96–104. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202508-12>
 Glushak E.V. Development and research of simulation models of cloud and fog computing in the Fogtorch program. *Radioengineering*. 2025;89(8):96–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.18127/j00338486-202508-12>
5. Черепенин В.А., Воробьев С.П. Интеграция и оптимизация систем облачных, туманных и граничных вычислений: моделирование, задержки и алгоритмы. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2024;(3):19–25. <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2024-3-19-25>
 Cherepenin V.A., Vorobyov S.P. Integration and optimization of cloud, fog, and edge computing systems: modeling, delays and algorithms. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2024;(3):19–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2024-3-19-25>

6. Клименко А.Б. Метод ресурсосберегающего планирования распределенных вычислений в туманной вычислительной среде. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.019>
Klivenko A.B. A resource-saving method of distributed computation planning in fog-computing environment. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.38.3.019>
7. Воробьев С.П. Математическая модель оптимизации сетевой инфраструктуры распределенной корпоративной системы на базе облачных, туманных и граничных технологий. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.003>
Vorobyov S.P. Mathematical model of optimization of the network infrastructure of a distributed enterprise system on a cloud, misty and edge technologies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.003>
8. Бакай Ю.О., Карташевский И.В. Исследование систем моделирования для туманных вычислений: особенности, преимущества и недостатки. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2024;9(4):37–43.
Bakai Yu.O., Kartashevsky I.V. Research of modeling systems for foggy computing: features, advantages and disadvantages. *Mezhdunarodnyi zhurnal informatsionnykh tekhnologii i energoeffektivnosti*. 2024;9(4):37–43. (In Russ.).
9. Бакай Ю.О., Никульников Н.В. Алгоритмы планирования в системах моделирования туманных вычислений. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2024;9(1):75–80.
Bakai Yu.O., Nikulnikov N.V. Scheduling algorithms in fog computing modeling systems. *Mezhdunarodnyi zhurnal informatsionnykh tekhnologii i energoeffektivnosti*. 2024;9(1):75–80. (In Russ.).
10. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. *Математическая теория оптимальных процессов*. Москва: Наука; 1969. 384 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глушак Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Самара, Российская Федерация.
e-mail: evglushak@yandex.ru
ORCID: [0009-0000-5494-9746](https://orcid.org/0009-0000-5494-9746)

Elena V. Glushak, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, the Russian Federation.

Михайлова Полина Денисовна, аспирант кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Самара, Российская Федерация.
e-mail: polin2002@mail.ru

Polina D. Mikhailova, Postgraduate at the Department of Networks and Communication Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 06.03.2026.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 26.02.2026; accepted for publication 06.03.2026.