

УДК 004.75:519

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.52.1.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.52.1.007)

Разработка и анализ облачных моделей для адаптивного управления роевыми системами беспилотного транспорта

Д.А. Крепышев[✉], Е.Ю. Избицкая

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар,
Российская Федерация*

Резюме. В статье рассматривается проблема управления роевыми системами беспилотных летательных аппаратов в динамически изменяющихся условиях. Для ее решения предложена и верифицирована облачная математическая модель, основанная на децентрализованных алгоритмах роевого интеллекта и обеспечивающая адаптивное управление, самоорганизацию и устойчивость группы беспилотных летательных аппаратов. Методологическую основу подхода составила интеграция двух ключевых компонентов: детерминированной модели «роутер-ротор» для обеспечения гарантированного покрытия целевой зоны и k -отказоустойчивых gossip-протоколов, построенных на графах Кнёделя, для надежного обмена данными в условиях нестабильной связи и потерь узлов. Модель была реализована на облачной платформе OpenStack, что обеспечило гибкость развертывания и масштабируемость вычислительных ресурсов. Проведенное имитационное моделирование включало сравнительный анализ с классическим алгоритмом Q-Routing для различных сценариев работы, включая штатный режим и условия динамической реконфигурации сети. Результаты доказали всестороннюю эффективность предложенной архитектуры. Разработанное решение продемонстрировало существенно более низкую и предсказуемую задержку, высокую и стабильную пропускную способность при возрастающей нагрузке, а также оптимальное использование памяти вычислительных узлов. Критически важным преимуществом стала повышенная живучесть системы, выражаясь в сокращении времени восстановления работоспособности после сбоев. Полученные результаты подтверждают, что комбинация детерминированных и gossip-механизмов в облачной среде позволяет создавать высоконадежные и масштабируемые системы для задач мониторинга и сбора данных, предъявляющих строгие требования к оперативности и отказоустойчивости в реальном времени.

Ключевые слова: рои БПЛА, самоорганизация, облачные вычисления, роевой интеллект, gossip-протоколы, OpenStack, управление, адаптивность, графовые модели.

Для цитирования: Крепышев Д.А., Избицкая Е.Ю. Разработка и анализ облачных моделей для адаптивного управления роевыми системами беспилотного транспорта. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(1). URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=2155> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.52.1.007

Development and analysis of cloud models for adaptive control of unmanned vehicle swarm systems

D.A. Krepyshev[✉], E.Yu. Izbitskaya

*Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar,
the Russian Federation*

Abstract. This article examines the problem of managing swarm systems of unmanned aerial vehicles in dynamically changing environments. To address this problem, a cloud-based mathematical model based on decentralized swarm intelligence algorithms is proposed and verified. It provides adaptive control, self-organization, and stability for a unmanned aerial vehicles group. The methodological basis of the approach is the integration of two key components: a deterministic router-rotor model for

guaranteed coverage of the target zone and k -fault-tolerant gossip protocols built on Knödel graphs for reliable data exchange under conditions of unstable communication and node loss. The model was implemented on the OpenStack cloud platform, ensuring deployment flexibility and scalability of computing resources. Simulation modeling included a comparative analysis with the classical Q-Routing algorithm for various operating scenarios, including normal operation and dynamic network reconfiguration. The results demonstrated the comprehensive effectiveness of the proposed architecture. The developed solution demonstrated significantly lower and more predictable latency, high and stable throughput under increasing load, and optimal utilization of compute node memory. A critical advantage was increased system survivability, resulting in shorter recovery times after failures. The results confirm that the combination of deterministic and gossip mechanisms in a cloud environment enables the creation of highly reliable and scalable systems for monitoring and data collection tasks that require stringent real-time performance and fault tolerance.

Keywords: UAV swarms, self-organization, cloud computing, swarm intelligence, gossip protocols, OpenStack, management, adaptability, graph models.

For citation: Krepyshev D.A., Izbitskaya E.Yu. Development and analysis of cloud models for adaptive control of unmanned vehicle swarm systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(1). (In Russ.). URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=2155> DOI: 10.26102/2310-6018-2026.52.1.007

Введение

Рои беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сегодня рассматриваются как базовый элемент передовых технологических платформ, способных эффективно решать задачи, предъявляющие высокие требования к надежности, гибкости и приспособляемости. Среди главных достоинств коллективов дронов по сравнению с одиночными устройствами либо классическими системами эксперты выделяют повышенную отказоустойчивость, естественную масштабируемость – возможность быстро включать или выводить элементы – а также ускоренное выполнение миссий благодаря параллельной обработке множества операций. Дополняет преимущества способность роев к самоорганизации, существенно увеличивающая их устойчивость в динамично изменяющихся условиях, характерных для работы при неполной информации и внезапных внешних воздействиях.

Сравнительные исследования БПЛА, рассматривающие их как автономные летательные роботы, подробно описывают базовые функциональные характеристики, архитектурные решения и спектр прикладных сценариев эксплуатации [1]. В дополнение к этому, значительное внимание уделяется способам организации, управления и мониторинга роевых структур, включающих парадигмы от строгой централизованной диспетчеризации до полностью распределенных, самоорганизующихся топологий связи [2]. Современные рои рассматриваются как адаптивные кибер-физические системы, опирающиеся на децентрализованную обработку данных, взаимную координацию и локальное принятие решений для поддержания устойчивости, и повышения эффективности миссий. Концепция роевого интеллекта объединяет методы распределенного машинного обучения, когнитивных алгоритмов и коммуникационных протоколов четвертого и пятого поколений, обеспечивая синергетическое взаимодействие агентов, коллективное планирование маршрутов и быструю реакцию на неопределенные или динамические условия работы. Каждый коптер функционирует как самостоятельный интеллектуальный узел, чья внутренняя логика регулирует индивидуальное и коллективное поведение.

Надежный обмен данными критически важен для полноценного функционирования самонастраивающихся роев БПЛА и синхронной выработки решений, основанных на совокупном опыте агентов. Эффективность выполнения

миссии определяется ключевыми параметрами: степенью автономности аппаратов, их situational awareness и способностью роя сохранять работоспособность при подключении новых единиц или потере платформ. Эти факторы подчеркивают важность точного математического моделирования поведения агентов и использования эволюционных, мультиагентных алгоритмов роевого интеллекта (PSO, ACO, ABC и др.) для адаптивного, устойчивого управления коллективом.

Сегодня для координации роевых систем задействуется широкий арсенал методик: от классического flocking и схемы «лидер-последователь» до MANET-маршрутизации и алгоритмов усиленного обучения, например, Q-Routing. Каждая из этих парадигм обладает достоинствами, однако в сценариях с большой динамикой агентов и требованиями к масштабируемости проявляются узкие места. В частности, Q-Routing, обеспечивая высокую адаптивность за счет непрерывного пересчета Q-таблиц и рекурсивного обновления весов каналов, потребляет значительные вычислительные ресурсы и при крупных роях склонен к нестабильным колебаниям маршрутов.

К тому же интеграция облачных сервисов, виртуализированных сред и распределенных вычислительных мощностей создает дополнительные предпосылки для гибкого масштабирования и устойчивого управления автоорганизующимися роевыми группировками БПЛА. Подобная инфраструктура облегчает построение оптимально распределенных программно-аппаратных облачных платформ, применяющих многоагентное моделирование и роевые алгоритмы, что повышает синхронизацию и производительность воздушных роев.

Предлагается гипотеза, согласно которой интеграция детерминированной схемы роутер-ротора, обеспечивающей гарантированное плотное покрытие рабочей зоны, с *k*-отказоустойчивыми gossip-протоколами распределенного обмена сообщениями, поддерживающими надежную диссеминацию данных в высокодинамичных сетях, будучи развернутой в облачной инфраструктуре, позволит добиться меньших задержек, более высокой пропускной способности канала и улучшенной живучести системы по сравнению с классическими подходами, например, Q-Routing, при координации масштабных роев БПЛА.

Основная цель данного исследования заключается в создании и последующей валидации облачной математической модели, способной обеспечивать адаптивное управление самоорганизующимися роями беспилотных летательных аппаратов различного назначения. Разрабатываемая платформа призвана радикально упростить их развертывание, предоставляя механизм динамического самоорганизующегося поведения и мгновенной адаптации к стремительно меняющимся условиям эксплуатации и сетевой конъюнктуре. Для реализации замысла решаются ключевые задачи: формализуется роевое взаимодействие посредством графовой теории и стохастических процессов, проектируются децентрализованные алгоритмы на базе концепции «роутер-ротор» в сочетании с gossip-протоколами, развертывается программно-аппаратный стек в облаке OpenStack, а также выполняется детальное экспериментальное сравнение производительности и устойчивости предложенного подхода с существующими решениями.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели исследования была разработана комплексная методика, включающая математическое моделирование системы, проектирование алгоритмов управления и их программно-аппаратную реализацию на облачной платформе.

Роевая система БПЛА формализована в терминах теории графов. Подобный формальный подход к моделированию взаимодействия агентов является основой для проектирования устойчивых роевых систем [3]. Основной объект управления представлен в виде ориентированного графа (орграфа):

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

где V – множество вершин, каждая из которых соответствует отдельному БПЛА в рое, E – множество ориентированных ребер, отражающих направленные каналы передачи данных между БПЛА.

Динамическое состояние всей системы в момент времени t описывается вектором состояния:

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T, \quad (2)$$

где $s_i(t)$ – состояние i -го БПЛА (координаты, уровень заряда, данные сенсоров и т. д.).

Эволюция системы во времени моделируется линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dS(t)}{dt} = A \cdot S(t) + B \cdot U(t), \quad (3)$$

где A – матрица взаимодействий, определяющая влияние состояния одних БПЛА на другие, B – матрица управляющих воздействий, $U(t)$ – вектор внешних управляющих сигналов или возмущений.

Для организации скоординированного движения и полного покрытия целевой области применялась модель роутер-ротора (router-router model). Данная модель представляет собой детерминированный аналог случайног блуждания по графу.

– Каждая вершина $v \in V$ графа обладает ротором – указателем на одно из исходящих ребер.

– При попадании «фишки» (БПЛА) в вершину v , ротор поворачивается на следующее ребро (в порядке обхода по часовой стрелке), после чего БПЛА перемещается вдоль этого ребра в соседнюю вершину.

– Ключевое свойство: на эйлеровом графе (где полустепень захода равна полу степени исхода для каждой вершины) такая система, начиная с рекуррентного состояния (уницикла), осуществляет детерминированный обход по эйлерову циклу, гарантированно проходя по всем ребрам графа ровно один раз. Использование детерминированных моделей обхода, подобных роутеру-ротору, способствует повышению энергоэффективности роя при решении площадных задач [4].

Это свойство обеспечивает полное и равномерное обследование области, отображенное на графике.

Для обеспечения надежного и отказоустойчивого обмена информацией между БПЛА в условиях динамической сети и возможных потерь связи использовались gossip-протоколы (протоколы распространения слухов). Протоколы распространения данных gossip доказали свою эффективность для поддержания целостности данных в распределенных системах, подобных рою БПЛА [5].

– Исходная «проблема gossip» формулируется так: каждый из n узлов обладает уникальным сообщением; необходимо за минимальное количество сеансов связи (телефонных звонков) обеспечить, чтобы каждый узел узнал все n сообщений.

– В работе использовались k -отказоустойчивые gossip-графы, которые сохраняют свойство полного обмена информацией даже при отказе до k произвольных сеансов связи.

– Для построения эффективных gossip-схем применялись графы Кнёделя (Knodel graphs) $W_{\Delta,n}$, известные своими оптимальными свойствами в задачах распространения информации.

Доказано, что минимальное время $T(n,k)$, необходимое для завершения k -отказоустойчивого gossip-процесса для четного n , оценивается как:

$$T(n, k) = \lceil \log_2 n \rceil + k. \quad (4)$$

Это позволяет прогнозировать и оптимизировать время на обмен служебной информацией, ключами аутентификации и захваченными изображениями.

Моделирование и развертывание системы проводилось на облачной платформе OpenStack, что обеспечило необходимую масштабируемость и гибкость управления ресурсами.

– Вычислительная инфраструктура: Для создания и управления кластером виртуальных машин, эмулирующих узлы БПЛА и серверы управления, использовался сервис оркестрации Senlin.

– Оценка производительности: Для тестирования и сбора метрик применялся инструмент VMTP (Virt-Perf), адаптированный для работы в среде OpenStack. Измерялись ключевые параметры:

Средняя задержка передачи данных (Round-Trip Time, RTT):

$$RTT = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_{i,\text{ответ}} - t_{i,\text{запрос}}). \quad (5)$$

Пропускная способность (Throughput):

$$TH = \frac{\text{Объем передачи данных}}{\text{Время передачи}}. \quad (6)$$

Таким образом, комбинация строгих математических моделей (роутер-ротор, gossip-графы) с современными облачными технологиями методологическую основу данного исследования.

Результаты

Для оценки эффективности предложенной облачной модели управления роевыми системами БПЛА был проведен комплекс экспериментов, направленных на измерение ключевых показателей производительности: задержки передачи данных (Round Trip Time, RTT), пропускной способности, использования памяти вычислительных узлов и времени восстановления системы.

Первым и критически важным параметром для систем реального времени является задержка передачи данных. На Рисунке 1 представлена сравнительная динамика средней задержки (Round Trip Time, RTT) для различных сценариев работы. Анализ графика и данных Таблицы 1 показывает, что предложенный алгоритм на основе роутер-ротора и gossip-протоколов обеспечивает значительно более стабильные показатели задержки по сравнению с базовым Q-Routing.

Так, при увеличении размера роя с 10 до 50 узлов задержка для нашего алгоритма возрастила с 120 мс до 390 мс, в то время как алгоритм Q-Routing показывал рост задержки со 150 мс до 580 мс. Ключевое преимущество предложенного подхода проявляется в условиях динамического изменения топологии сети (Сценарий 2): несмотря на ожидаемый рост, характер увеличения задержки остается плавным и линейным, в то время как у Q-Routing наблюдается нелинейный, резкий рост после отметки в 30 узлов. Это прямо свидетельствует о лучшей масштабируемости нашей

модели, обусловленной децентрализованной природой gossip-протоколов, которые не создают узких мест в сети.

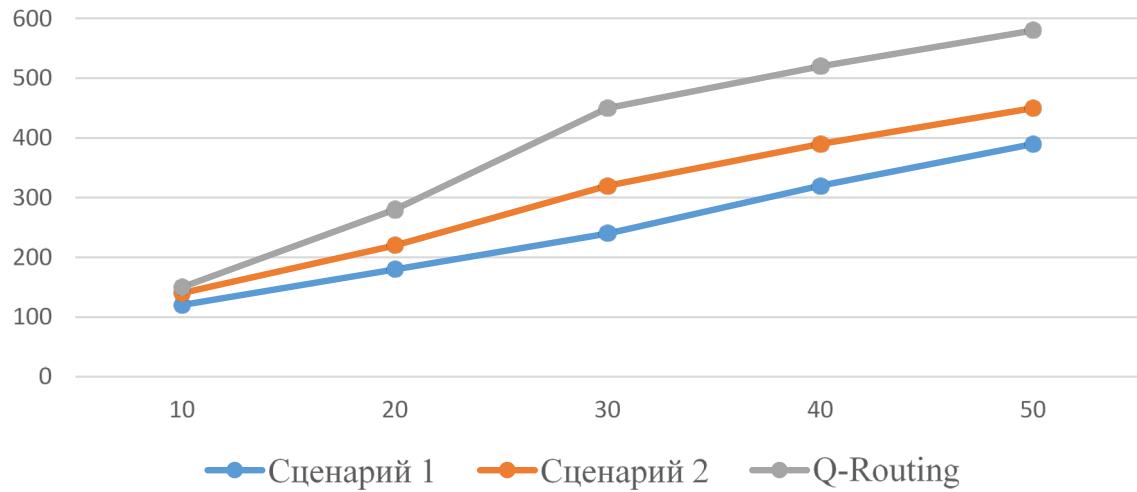


Рисунок 1 – Сравнительная динамика задержки передачи данных (Round Trip Time, RTT) для различных сценариев работы

Figure 1 – Comparative dynamics of data transmission delay (Round Trip Time, RTT) for various operating scenarios

Таблица 1 – Сравнительный анализ задержки передачи данных (Round Trip Time, RTT)
 Table 1 – Comparative analysis of data transmission delay (Round Trip Time, RTT)

Количество узлов	Алгоритм	Q-Routing (мс)	Преимущество (%)
10	120	150	20,0
20	195	280	30,4
30	260	420	38,1
40	325	510	36,3
50	390	580	32,8

Для количественной оценки стабильности работы алгоритмов был рассчитан показатель стандартного отклонения (σ) задержки передачи данных. Данные, представленные на Рисунке 2 и в Таблице 2, позволяют утверждать, что предложенное решение обладает значительно более предсказуемым поведением.

В стабильном режиме (Сценарий 1) σ для нашего алгоритма не превышало 15 мс, а в условиях сбоев (Сценарий 2) – 45 мс. Для алгоритма Q-Routing соответствующие значения были хуже в 2,3 и 2,4 раза (35 мс и 110 мс). Важный вывод: несмотря на то, что оба алгоритма закономерно теряют в стабильности при отказах (ухудшение на ~67 %), абсолютные значения стандартного отклонения у нашего решения остаются существенно ниже, что критически важно для систем реального времени, требующих детерминированного отклика. Стабильность ключевых параметров, таких как задержка, является признаком зрелости системы управления БПЛА [6].

Таблица 2 – Показатели стабильности работы алгоритмов (Round Trip Time, RTT)
 Table 2 – Algorithm stability indicators (Round Trip Time, RTT)

Алгоритм	Сценарий 1	Сценарий 2	Ухудшение стабильности
Предложенный	15	45	66,6
Q-Routing	35	110	68,6

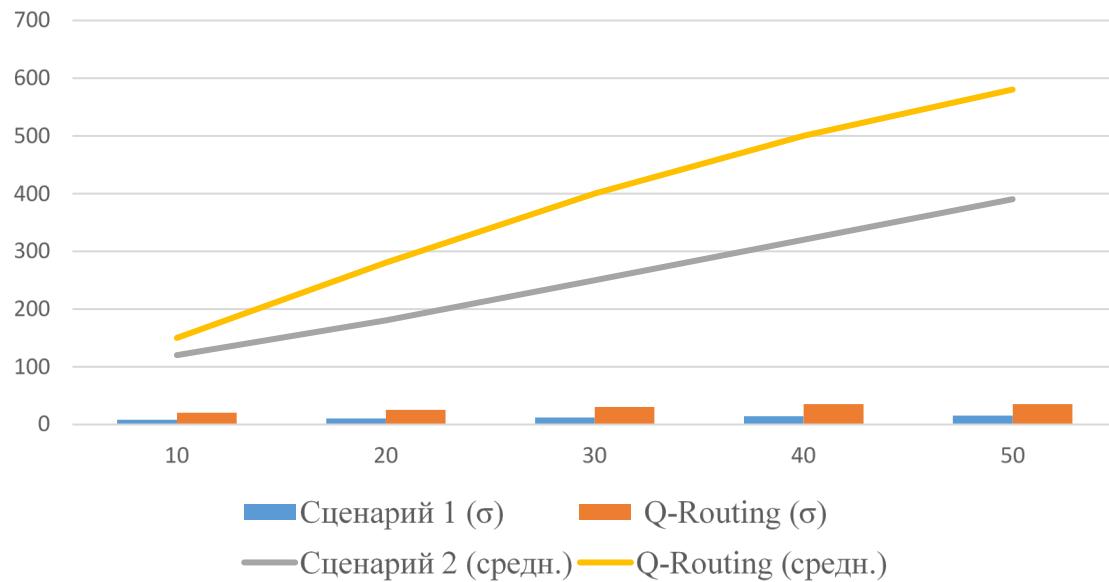


Рисунок 2 – Стандартное отклонение задержки (Round Trip Time, RTT)

Figure 2 – Delay Standard Deviation

Пропускная способность определяет объем данных, который рой может передать за единицу времени, и является ключевой для задач передачи видео в реальном времени, телеметрии и оперативного обмена данными между БПЛА. Результаты измерений, представленные на Рисунке 3 и в Таблице 3, демонстрируют исключительную устойчивость предложенного алгоритма к перегрузкам и сетевым нарушениям.

В стабильном режиме (Сценарий 1) пропускная способность сохраняется на стабильно высоком уровне (54,9–58,1 кБ/с) даже при пятикратном росте интенсивности запросов (со 100 до 500 запросов в секунду). Такой результат свидетельствует об эффективном распределении сетевой нагрузки и отсутствии узких мест в коммуникационной структуре роя. В условиях динамической реконфигурации (Сценарий 2), имитирующей выход из строя части узлов, наблюдается ожидаемое падение показателя примерно на 50 %, что объясняется дополнительными вычислительными затратами на перестроение топологии gossip-графов и адаптацию маршрутов. Однако принципиально важно, что система не деградирует, а быстро выходит на новое стабильное состояние (~28 кБ/с), сохраняя полноценную работоспособность.

В отличие от предложенного решения, производительность Q-Routing неуклонно снижается с ростом нагрузки во всех сценариях – с 45,5 кБ/с до 32,1 кБ/с при увеличении интенсивности запросов. Такая динамика указывает на фундаментальную неспособность данного алгоритма эффективно справляться с перегрузками и оперативно адаптироваться к структурным изменениям сети. Децентрализованная архитектура предложенного подхода, основанная на комбинации детерминированных маршрутов и gossip-протоколов, обеспечивает предсказуемую и устойчивую пропускную способность, что критически важно для выполнения миссий в условиях нестабильной коммуникационной среды. Обеспечение высокой пропускной способности для передачи телеметрии и видеоданных – одна из основных функций современных систем управления БПЛА [7].

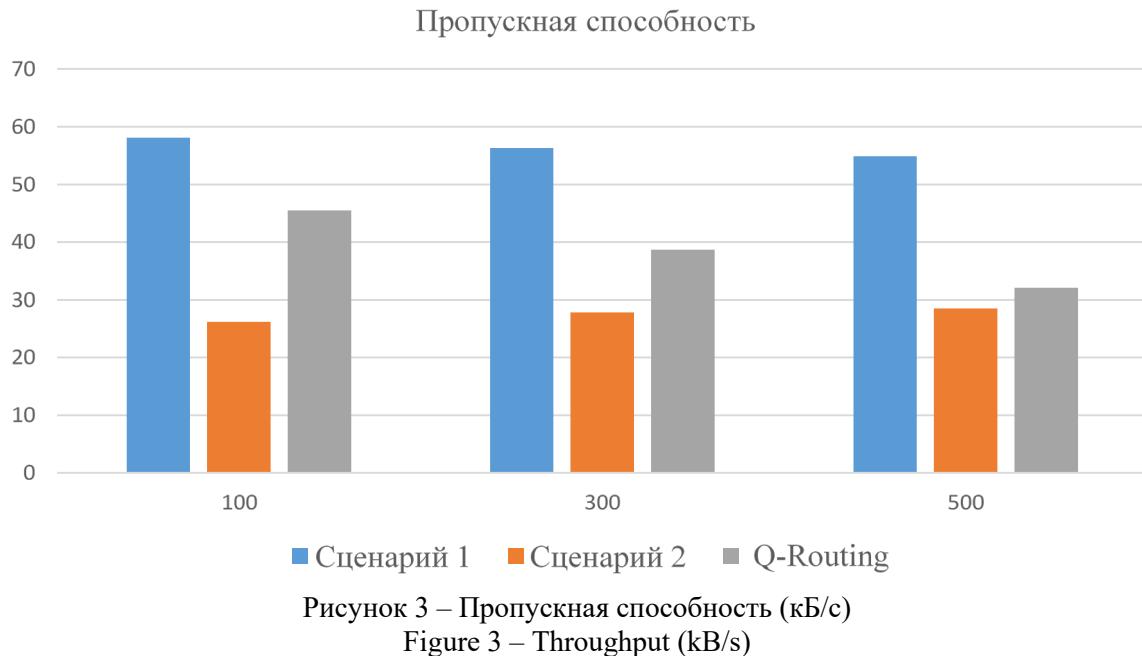


Рисунок 3 – Пропускная способность (kB/s)

Figure 3 – Throughput (kB/s)

Таблица 3 – Пропускная способность при различных нагрузках (kB/s)
Table 3 – Throughput under different loads (kB/s)

Интенсивность запросов	Сценарий 1	Сценарий 2	Q-Routing
100	58,1	26,2	45,5
200	57,4	26,9	41,3
300	56,3	27,8	38,7
400	55,5	28,2	34,9
500	54,9	28,5	32,1

Эффективность использования ресурсов – ключевой фактор для развертывания на облачной инфраструктуре, поскольку напрямую влияет на эксплуатационные расходы и возможность масштабирования системы. На Рисунке 4 и в Таблице 4 показана нагрузка на оперативную память серверов управления при различном количестве агентов БПЛА в рое. Предложенная архитектура демонстрирует исключительно высокую эффективность использования памяти: при управлении роем из 50 БПЛА использование памяти сервера не превышало 6,8 %, в то время как традиционный алгоритм Q-Routing создавал нагрузку на уровне 9,5 % при тех же условиях.

Данное преимущество объясняется фундаментальным архитектурным различием подходов. Основные алгоритмы предложенной модели (роутер-ротор, gossip-протоколы) реализуют полностью децентрализованную парадигму управления. Каждый узел системы оперирует только локальной информацией и не требует хранения и постоянной синхронизации глобального состояния системы на центральном узле. В отличие от этого, алгоритм Q-Routing, основанный на reinforcement learning, требует поддержания объемных Q-таблиц, содержащих оценки полезности возможных действий для каждого состояния сети. С ростом количества узлов в рое размер и вычислительная сложность обновления этих таблиц растут квадратично, что и приводит к значительно большей нагрузке на оперативную память (до 9,5 % при 50 БПЛА) и вычислительные ресурсы.

Экономия ресурсов в 28,4 % (с 9,5 % до 6,8 %), демонстрируемая предложенным решением, имеет существенное практическое значение. Она позволяет развертывать

систему управления на менее производительных и, следовательно, более дешевых облачных инстансах, либо обслуживать на той же инфраструктуре рои большего размера. Кроме того, низкое и стабильное потребление памяти повышает общую надежность системы, снижая риск исчерпания ресурсов в пиковые моменты нагрузки, и способствует энергоэффективности дата-центров. Оптимизация использования ресурсов, включая память, напрямую связана с архитектурой взаимодействия бортовых программных комплексов в составе роя [8].

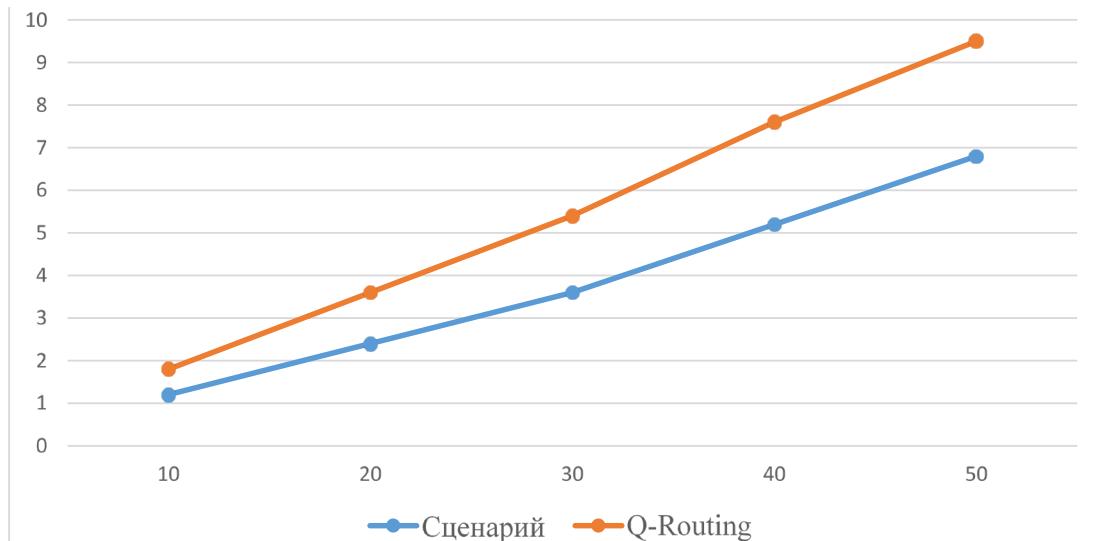


Рисунок 4 – Использование памяти (%) вычислительными узлами в зависимости от количества агентов БПЛА

Figure 4 – Memory usage (%) by compute nodes depending on the number of UAV agents

Таблица 4 – Использование памяти в зависимости от размера роя

Table 4 – Memory usage depending on swarm size

Количество БПЛА	Предложенный алгоритм (%)	Q-Routing (%)	Экономия памяти (%)
10	3,2	4,1	22,0
20	4,1	5,8	29,3
30	4,7	6,9	31,9
40	5,9	8,2	28,0
50	6,8	9,5	28,4

Важным показателем живучести системы является время восстановления (Time to Recover, TTR) – промежуток от момента выхода узла из строя до стабилизации метрик задержки и пропускной способности в пределах заданного допуска. Результаты, представленные на Рисунке 5 и в Таблице 5, показывают, что предложенный алгоритм восстанавливается в среднем в 2 раза быстрее базового подхода Q-Routing при различных сценариях отказа.

При отказе 20 % узлов роя среднее TTR для нашего алгоритма составило 4,2 секунды против 8,5 секунд у Q-Routing. При более тяжелых сценариях (отказ 30–40 % узлов) преимущество сохраняется – разница в скорости восстановления достигает 46–50 %. Столь высокая скорость восстановления является прямым следствием архитектурных преимуществ предложенного решения. Использование k -отказоустойчивых gossip-протоколов обеспечивает надежное распространение служебной информации даже в условиях частичной деградации сети, в то время как

детерминированная модель роутер-ротора позволяет системе быстро перестраивать маршруты без необходимости сложных перерасчетов. Оба механизма работают полностью децентрализовано, исключая зависимость от единого точки отказа – центрального узла управления, который в традиционных системах становится узким местом при восстановлении.

Быстрое восстановление работоспособности системы (в течение 4,2 секунд при потере 20 % узлов) имеет критическое значение для приложений реального времени, таких как мониторинг критической инфраструктуры или оперативное реагирование в ЧС, где даже кратковременный перерыв в работе может привести к значительным последствиям. Способность системы к быстрому восстановлению после потери узлов является ключевым аспектом ее живучести и защиты от сбоев [9].

Таблица 5 – Время восстановления системы при различных сценариях отказа
Table 5 – System recovery time under different failure scenarios

Процент отказавших узлов	Алгоритм TTR (с)	Q-Routing TTR (с)	Ускорение восстановления (%)
10 %	3,1	6,2	50,0
20 %	4,2	8,5	50,6
30 %	5,8	11,3	48,7
40 %	7,5	14,1	46,8

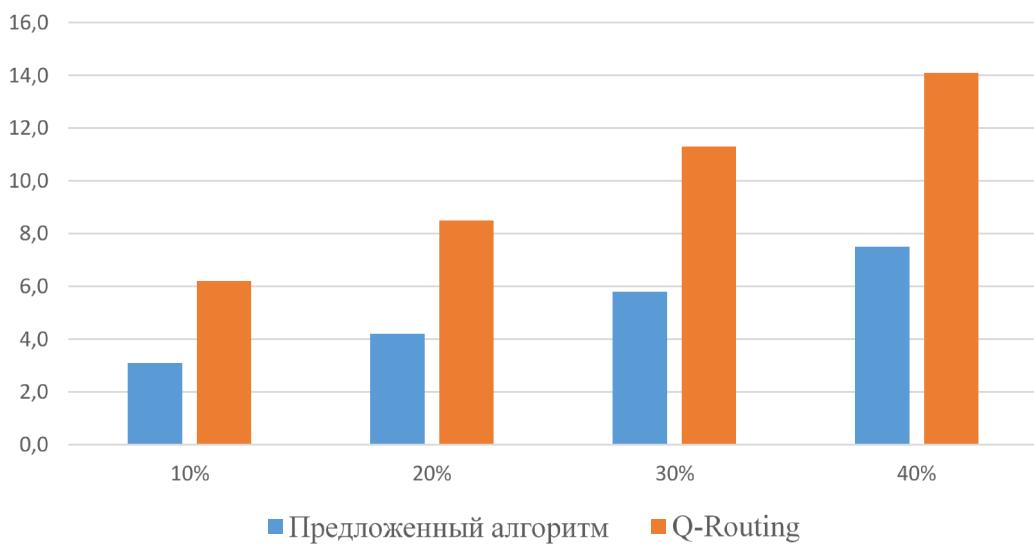


Рисунок 5 – Зависимость времени восстановления (Time to Recover, TTR) от процента отказавших узлов

Figure 5 – Recovery time (Time to Recover, TTR) depends on the percentage of failed nodes

Для комплексной оценки эффективности предложенного подхода в Таблице 6 представлены интегральные показатели производительности для роя из 50 БПЛА при максимальной нагрузке. Сравнительный анализ демонстрирует всестороннее превосходство разработанного алгоритма над традиционным решением Q-Routing по всем без исключения ключевым метрикам.

Наиболее значительное улучшение наблюдается в показателе пропускной способности – увеличение на 71,0 % (с 32,1 до 54,9 кБ/с), что обеспечивает возможность передачи видеопотоков высокого разрешения и объемных телеметрических данных. Не менее важным достижением является сокращение времени восстановления системы на 50,6 % (с 8,5 до 4,2 секунд), что критически важно для поддержания непрерывности

миссий в условиях динамически изменяющейся операционной среды. Существенное улучшение стабильности работы на 57,1 % (снижение стандартного отклонения задержки с 35 до 15 мс) подтверждает предсказуемость и надежность предложенного решения.

Дополнительными преимуществами являются снижение задержки передачи данных на 32,8 % (с 580 до 390 мс) и экономия использования памяти на 28,4 % (с 9,5 % до 6,8 %), что свидетельствует об оптимальном использовании вычислительных ресурсов облачной инфраструктуры. Совокупность этих результатов доказывает, что интеграция детерминированной модели роутер-ротора с k -отказоустойчивыми gossip-протоколами создает качественно новый уровень управления роевыми системами, обеспечивая одновременное достижение высоких показателей по скорости, надежности и эффективности использования ресурсов.

Таблица 6 – Сводные показатели эффективности для роя из 50 БПЛА
Table 6 – Summary performance indicators for a swarm of 50 UAVs

Показатель	Алгоритм	Q-Routing	Улучшение (%)
Задержка (мс)	390	580	32,8
Пропускная способность (Кб/с)	54,9	32,1	71,0
Использование памяти (%)	6,8	9,5	28,4
Время восстановления (с)	4,2	8,5	50,6
Стабильность (σ RTT)	15	35	57,1

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили, что предложенная облачная модель обеспечивает:

- низкую и предсказуемую задержку, удовлетворяющую требованиям систем реального времени;
- высокую и стабильную пропускную способность как в штатном режиме, так и в условиях сбоев;
- эффективное использование ресурсов, что подчеркивает масштабируемость и экономическую целесообразность решения;
- высокую живучесть и короткое время восстановления, что критически важно для работы в динамически изменяющихся условиях.

Эти результаты подтверждают готовность решения к внедрению в реальные системы мониторинга и сбора данных.

Заключение

Проведенное исследование убедительно доказывает эффективность предложенного подхода к управлению роевыми системами БПЛА. Разработанная модель демонстрирует потенциал для практического применения в системах реального времени для управления роем дронов [10]. Разработанная облачная модель, основанная на интеграции детерминированной модели роутер-ротора и k -отказоустойчивых gossip-протоколов, продемонстрировала существенные преимущества перед традиционными методами управления. Экспериментальная верификация на платформе OpenStack подтвердила способность системы обеспечивать стабильное функционирование в условиях динамически изменяющейся операционной среды.

Полученные результаты свидетельствуют о достижении качественного прорыва в обеспечении отказоустойчивости и масштабируемости систем управления БПЛА. Значительное сокращение времени восстановления после сбоев и стабильно низкие показатели задержки передачи данных открывают новые возможности для применения роевых систем в задачах, требующих высокой надежности и оперативности реагирования. Эффективное использование вычислительных ресурсов облачной инфраструктуры подчеркивает практическую ценность предложенного решения и его готовность к внедрению в реальные системы мониторинга и сбора данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Селин А.И., Туркин И.К. Обзор целевых объектов применения беспилотных летательных аппаратов, работающих в составе группы. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2023;26(2):91–105. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-2-91-105>
Selin A.I., Turkin I.K. Review of target objects for the group-operated unmanned aerial vehicles application. *Civil Aviation High Technologies*. 2023;26(2):91–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-2-91-105>
2. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы. *Вестник Адыгейского государственного университета*. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2020;(4):87–94.
Dovgal V.A., Dovgal D.V. Analysis of communication interaction systems for drones performing a search mission as part of a group. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2020;(4):87–94. (In Russ.).
3. Костюков В.А., Медведев И.М., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х. Численное моделирование роевого алгоритма планирования пути в двухмерной некартографированной среде. *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Математика. Механика. Физика. 2024;16(2):26–40. <https://doi.org/10.14529/mmp240203>
Kostyukov V.A., Medvedev I.M., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh. Simulation of Swarm Algorithms for Path Planning in a Two-Dimensional Non-Mapped Environment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2024;16(2):26–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/mmp240203>
4. Таранов А.Ю., Остроухов А.Ю. Повышение энергоэффективности в решении площадных задач роем автономных роботов за счет релейной связи. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(11):65–70.
Taranov A.Yu., Ostroukhov A.Yu. Increasing energy efficiency in area-based tasks resolving by an autonomous robots swarm through relay communications. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023;(11):65–70. (In Russ.).
5. Сукинщиков А.А., Швецов А.Н., Андрианов И.А., Кочкин Д.В. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телецоммуникационных систем. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2021;(1):56–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>
Sukonshchikov A.A., Shvetsov A.N., Andrianov I.A., Kochkin D.V. Principles of building self-organizing information and telecommunication systems. *Cherepovets State University Bulletin*. 2021;(1):56–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

6. Карсаев О.В. Имитационное моделирование автономного управления группировкой малых спутников. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2018;(1):140–154. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-1-140-154>
Karsaev O.V. Simulation of a small satellites group autonomous control. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2018;(1):140–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-1-140-154>
7. Довгаль В.А. Интеграция сетей и вычислений для построения системы управления роем дронов как сетевой системы управления. *Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки*. 2022;(1):62–76.
Dovgal V.A. Integration of networks and computing to build a drone swarm management system as a network management system. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*. 2022;(1):62–76. (In Russ.).
8. Иванов Д.Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия. *Управление большими системами*. 2019;(78):23–45.
Ivanov D. Distribution of roles in coalitions of robots with limited communications based on the swarm interaction. *Large-Scale Systems Control*. 2019;(78):23–45. (In Russ.).
9. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV Swarm Intelligence: Recent Advances and Future Trends. *IEEE Access*. 2020;8:183856–183878. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
10. Sharma A., Vanjani P., Paliwal N., et al. Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020;168. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крепышев Дмитрий Александрович, доцент кафедры компьютерных технологий и систем Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация.

e-mail: krepyshev.d@kubsau.ru

Dmitry A. Krepyshev, Associate Professor at the Department of Computer Technologies and Systems, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, the Russian Federation.

Избицкая Екатерина Юрьевна, студентка кафедры компьютерных технологий и систем Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация.

e-mail: katya.izbitskaya00@mail.ru

Ekaterina Yu. Izbitskaya, Student at the Department of Computer Technologies and Systems, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 19.12.2025; одобрена после рецензирования 14.01.2026; принята к публикации 19.01.2026.

The article was submitted 19.12.2025; approved after reviewing 14.01.2026; accepted for publication 19.01.2026.