

## ОТЗЫВ

Барабановой Елизаветы Александровны

на автореферат диссертации Кущазли Анны Ивановны на тему «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях», представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Диссертационная работа Кущазли А.И. посвящена актуальной задаче – математическому моделированию процессов миграции виртуальных машин и сервисов в граничных облачных вычислениях (Multi-Access Edge Computing, MEC). Сегодня при развертывании сетей 5G/6G и интерактивных сервисов (таких как дополненная и виртуальная реальность, облачный гейминг) ключевой проблемой становится обеспечение малых задержек передачи данных. Поскольку централизованные облака физически удалены от пользователей, возникает необходимость переносить вычислительную нагрузку на MEC-узлы, расположенные на границе сети. В связи с этим разработка математических моделей, позволяющих оценивать и оптимизировать стратегии миграции сервисов с учетом реального характера сетевого трафика, имеет важное теоретическое и практическое значение.

Автореферат демонстрирует последовательное и логичное изложение результатов исследования. В первой главе автор решает задачу классификации реального трафика сотового оператора Vodafone, используя методы машинного обучения, и проводит статистическую оценку его параметров с помощью EM-алгоритма. Вторая глава посвящена разработке и анализу модели миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре по критерию минимизации занимаемой полосы пропускания, где решения принимаются в моменты поступления новых задач. В третьей главе исследуются модели миграции пользовательских сервисов между граничным и облачным серверами для минимизации суммарной задержки, причем здесь

подробно рассмотрен случай коррелированного входного потока, описанного марковски-модулированным пуассоновским процессом (ММРР).

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что в работе предложена новая модель миграции виртуальных машин, в которой перенос задач между группами приборов жестко привязан к моментам появления новых требований, что отличается от известных пороговых стратегий; для модели миграции конкурирующих сервисов в МЕС-архитектуре аналитически найдено оптимальное распределение нагрузки и получено стационарное распределение вероятностей состояний в явном мультипликативном виде; а также разработана математическая модель системы миграции с коррелированным ММРР-потокком и предложена адаптивная политика миграции, меняющая частоту пересмотра решений в зависимости от интенсивности трафика.

Практическая ценность результатов подтверждается полученными 3 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Кущазли А.И. имеет высокий уровень научной квалификации. Основные результаты исследования опубликованы в 12 печатных работах, включая 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК и международных баз данных. Достоверность результатов подтверждается их обсуждением на крупных международных конференциях. Высокий статус исследователя также подчеркивается получением Стипендии Президента РФ для аспирантов (2024–2025 гг.) и успешным участием в выполнении научных грантов РУДН.

Вместе с тем в качестве замечаний и рекомендаций по дальнейшему развитию исследования можно отметить следующее. Из текста автореферата хотелось бы яснее увидеть, учитывались ли при оценке эффективности предложенной адаптивной политики миграции накладные расходы (вычислительные затраты и сигнальный трафик), возникающие при постоянном пересмотре решений в фазе высокой нагрузки.

Диссертационное исследование Кущазли Анны Ивановны является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пункту 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а ее автор, Кущазли Анна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Барабанова Елизавета Александровна, доктор технических наук (05.12.13 – Системы сети и устройства телекоммуникаций), доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией 49 инфраструктурных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, e-mail: barabanova@ipu.ru.



/Барабанова Елизавета Александровна/

«11» 06 2026 г.

Подпись  Е.А.  
Зав. Общ.   


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук  
Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 65  
Тел.: +7 495 334-89-10. Факс: +7 495 334-93-40, +7 499 234-64-26. E-mail: dan@ipu.ru  
Страница в интернете: <https://www.ipu.ru>

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Куцазли Анны Ивановны на тему:

**«Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях»**, представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Диссертационная работа Куцазли Анны Ивановны посвящена разработке моделей массового обслуживания для анализа эффективности миграции виртуальных машин и сервисов в граничных облачных вычислениях. Тема исследования является актуальной, поскольку современные распределенные вычислительные системы, в том числе архитектур периферийных, граничных вычислений с множественным доступом (Multi-Access Edge Computing, MEC), требуют строгого математического описания механизмов управления ресурсами при ограничениях на задержку, пропускную способность и качество обслуживания пользователей.

Согласно автореферату, основное внимание в работе уделено построению математических моделей миграции как управляемого процесса в системах массового обслуживания. Важным представляется то, что автором формализованы не только сами объекты миграции – виртуальная машина или сервис, – но и критерии принятия решений, а также моменты, в которые эти решения допускается пересматривать. Такая постановка позволяет рассматривать миграцию не как эвристическую процедуру балансировки нагрузки, а как элемент марковской модели с явно заданными вероятностно-временными характеристиками.

К числу существенных результатов работы следует отнести модель миграции виртуальных машин между облачными серверами, в которой переносится весь класс заявок, соответствующий данной виртуальной машине. Для модели миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре автором получена аналитически задаваемая политика распределения пользователей между MEC-узлом и облачным сервером, минимизирующая суммарную межконцевую задержку. Значимым результатом является получение стационарного распределения в мультипликативном виде для модели с пуассоновским входным потоком. Отдельного внимания заслуживает рассмотрение коррелированного входного потока в виде ММРР и построение матричного рекуррентного алгоритма вычисления стационарного распределения на основе блочно-трехдиагональной структуры инфинитезимальной матрицы. Положительно следует отметить использование параметров, оцененных по данным реального мобильного оператора, что усиливает прикладную интерпретацию результатов.

Автореферат достаточно полно отражает структуру и содержание диссертационного исследования. Заявленные положения, выносимые на защиту, соответствуют изложенным в

автореферате результатам и подтверждаются построенными моделями и аналитическими соотношениями. Результаты работы опубликованы в достаточном объеме.

К тексту автореферата можно высказать следующие замечания.

1. В моделях глав 2 и 3 предполагается, что времена обслуживания заявок распределены экспоненциально. Хотя это стандартное допущение для марковских моделей, в реальных системах распределения могут быть более общими. Было бы интересно обсудить, насколько критично это ограничение.

2. В формулах (4), (11) и (15) политики миграции задаются через операции выбора экстремума:  $argmin$  или  $argmax$ . Было бы полезно явно указать правило разрешения неоднозначности в случае, когда минимум или максимум достигается на нескольких допустимых серверах, сервисах или действиях.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и носят преимущественно дискуссионный характер.

### Заключение

Считаю, что диссертационная работа Куцазли Анны Ивановны «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» является завершённым научным исследованием. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пункту 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН (протокол УС-1 от 22.01.2024), а ее автор, Куцазли Анна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика.

Кандидат технических наук (05.13.17 – Теоретические основы информатики), доцент кафедры Фундаментальной и прикладной математики Российского государственного гуманитарного университета, 125047, г. Москва, ул. Миусская пл., д. 6, E-mail: [anna.klimenko@mail.ru](mailto:anna.klimenko@mail.ru)

/ Климено Анна Борисовна

«15» июня 2026 г.

Подпись Клименко А.Б. ЗАВЕРЯЮ  
ДИРЕКТОР ДЕПАРТАМЕНТА  
ПО УПРАВЛЕНИЮ ПЕРСОНАЛОМ  
И СОЦИАЛЬНЫМ ВОПРОСАМ  
ВАЗА А.М.



Подпись Клименко А.Б. удостоверяю

«15» июня 2026 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гуманитарный университет» (РГГУ), Почтовый адрес: 125047, Москва, Миусская площадь, д. 6, стр. 6, тел.: +7 (495) 250-61-18

Страница в интернете: [www.rsuh.ru](http://www.rsuh.ru)

## ОТЗЫВ

Фархадова Маиса Паши оглы  
на автореферат диссертации Кущазли Анны Ивановны  
на тему «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции  
сервисов в граничных облачных вычислениях»,  
представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе  
Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы диссертации Кущазли А.И. обусловлена необходимостью развития математического аппарата для описания процессов миграции вычислительных ресурсов в гетерогенных облачных инфраструктурах. Исследование направлено на решение важной научно-практической задачи, связанной с оптимизацией распределения сервисов между граничными (МЕС) и центральными облачными узлами в сетях пятого и шестого поколений. Тема работы актуальна, так как существующие подходы не позволяют в полной мере учесть факторы коррелированного характера сетевого трафика, адаптивности политик миграции к фазам входного потока.

Представленный комплекс моделей обладает несомненной научной новизной. Разработанные модели сочетают системы с перемещением заявок между группами приборов, эксклюзивное обслуживание на общих ресурсах, марковски-модулированный пуассоновский поток и адаптивные политики миграции. Они позволяют учитывать такие важные аспекты реальных систем, как коррелированный характер сетевого трафика, ограниченность ресурсов граничных узлов, конкуренцию нескольких сервисов за доступ к МЕС. Автор применяет методы анализа марковских случайных процессов и матрично-аналитические методы для задач распределения пользователей. Достоверность результатов подкрепляется корректным использованием фундаментального математического аппарата и использованием в численном анализе реальных данных мобильного оператора Vodafone.

Предложенные алгоритмы расчета – рекуррентные, матричные, алгоритмы оценки параметров входного потока методом максимального правдоподобия на основе EM-алгоритма – адекватны и эффективны для решения поставленных задач. Они работают на получение конкретных показателей эффективности, таких как вероятность миграции, средняя высвобождаемая пропускная способность сервера, средняя суммарная межконцевая задержка. Получение стационарного распределения в мультипликативном виде для модели с несколькими конкурирующими сервисами и явной политикой миграции в виде функции от числа заявок в системе представляет собой теоретический результат.

С научной точки зрения, работа вносит вклад в математическую теорию телетрафика и теорию массового обслуживания. С практической стороны, разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить целенаправленный выбор политик миграции в таких технологически сложных сценариях, как развертывание иммерсивных сервисов в сетях 5G/6G и проектирование облачной инфраструктуры с динамическим перераспределением виртуальных машин.

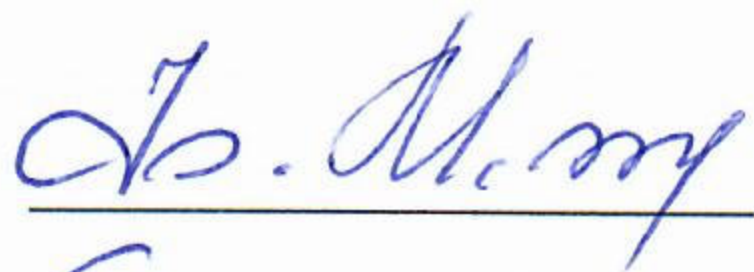
Публикации автора (включая статьи в журналах из перечня ВАК/RSCI, а также индексируемые в Scopus) в полной мере освещают полученные результаты.

В качестве замечаний, которые носят характер пожеланий для будущих исследований, отмечу следующее:

1. В автореферате недостаточно подробно описаны границы применимости предложенного матричного алгоритма при больших значениях параметра  $N$ .
2. Перспективным направлением может стать интеграция более методов машинного обучения, например, обучения с подкреплением, для адаптивного управления миграцией в условиях высокой динамики.

Диссертационное исследование Кущазли Анны Ивановны является законченной научно-квалификационной работой. Оно соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пункта 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а ее автор, Кущазли Анна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Фархадов Маис Паша оглы, доктор технических наук (05.13.15 – Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети), старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией 17 эргатических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, e-mail: mais@ipu.ru



Фархадов Маис Паша оглы

« 11 » июня 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

Адрес: 117342, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Коньково, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 2

Тел.: +7 495 334-89-10. Факс: +7 495 334-93-40, +7 499 234-64-26.

E-mail: dan@ipu.ru

Страница в интернете: <https://www.ipu.ru>



## ОТЗЫВ

Цитовича Ивана Ивановича

на автореферат диссертации Кущазли Анны Ивановны на тему  
«Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов  
в граничных облачных вычислениях»,

представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе  
Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Представленное исследование Кущазли Анны Ивановны «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» посвящено решению задач, связанных с миграцией виртуальных машин и пользовательских сервисов в гранично-облачных архитектурах. В условиях перехода к сетям связи пятого и шестого поколений (5G/6G) жесткие требования к задержкам передачи данных и постоянный рост абонентской нагрузки определяют необходимость разработки математических моделей, которые учитывают коррелированный характер трафика и формализуют моменты принятия решений о миграции. Работа отвечает этим вызовам, предлагая три оригинальные модели массового обслуживания для детального анализа различных сценариев миграции вычислительной нагрузки.

Научная значимость работы заключается в развитии теории массового обслуживания в направлении моделей с перемещением заявок между группами приборов и фазозависимым управлением. Получено стационарное распределение в мультипликативном виде для задачи минимизации суммарной задержки. Разработан матричный рекуррентный алгоритм для системы с ММРР-потокком (Markov Modulated Poisson Process).

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные математические модели и алгоритмы могут быть непосредственно использованы операторами сотовой связи и провайдерами облачных сервисов для выбора оптимальной политики миграции, балансировки нагрузки и снижения межконцевой задержки.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, включая 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Материалы исследования прошли широкую апробацию и докладывались на авторитетных международных конференциях (NEW2AN, ITMM, ICST, DCCN, ITTMM) и всероссийском форуме «Ломоносов-2025». Публикационная активность соискателя полностью соответствует установленным требованиям.

В качестве замечаний, которые, впрочем, не умаляют общих достоинств работы, можно отметить следующее:

1. Для ММРР-потока в примере (формула 30) матрица  $D_1$  имеет почти равные диагональные элементы, что делает поток близким к пуассоновскому. В разделе 3.4 постулируется  $\lambda_1 > \lambda_0$ , но численный

- пример этого не иллюстрирует. Следовало бы выбрать сервис с более контрастными фазами.
2. Из текста автореферата не до конца ясно, чем обусловлен выбор именно ММРР-потока вместо более общего МАР-потока (Markovian Arrival Process) для описания коррелированного входного трафика.
  3. Разработанные аналитические модели не верифицированы с помощью имитационного моделирования.

Диссертационное исследование Куцазли Анны Ивановны является законченной научно-квалификационной работой. Оно соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно пункту 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН, протокол УС-1, 22.01.2024, а ее автор, Куцазли Анна Ивановна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

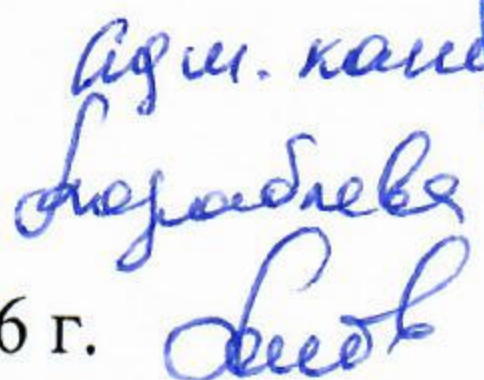
Цитович Иван Иванович, доктор физико-математических наук (05.13.17 – Теоретические основы информатики), доцент, профессор кафедры алгоритмов и технологий программирования физтех-школы прикладной математики и информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», e-mail: tsit@mail.ru.

  
\_\_\_\_\_

Цитович Иван Иванович

« 15 » июня 2026 г.

Подпись Цитовича И.И. заверяю

  
Адм. канц  
Людмила  
Лев

« 15 » 06 2026 г.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»  
Адрес: 117303 Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1  
Тел.: +7 (495) 408-45-54. Факс: +7 (495) 408-68-69. E-mail: info@mipt.ru  
Страница в интернете: <https://mipt.ru/>