

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. первого проректора -  
проректора по научной работе РУДН



П.А. Докукин

» *пертс* 20*26* г.

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) на основании решения, принятого на заседании кафедры теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

Диссертация «Модели массового обслуживания для анализа эффективности миграции сервисов в граничных облачных вычислениях» выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

Кушазли Анна Ивановна 1997 года рождения, гражданка Российской Федерации, в 2021 году окончила (с отличием) федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» по направлению 02.04.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии».

С 22.09.2021 по 21.09.2025 обучалась в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» (профиль обучения «Теоретические основы информатики»), соответствующему научной специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика», по которой подготовлена диссертация.

В период подготовки диссертации являлась ассистентом кафедры теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

В настоящее время работает ассистентом кафедры теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

Документ о сдаче кандидатских экзаменов выдан в 2026 году в РУДН.

Научный руководитель – Кочеткова Ирина Андреевна, доктор физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теории вероятностей и кибербезопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Научный руководитель и тема диссертационного исследования утверждены на заседании Ученого совета факультета физико-математических и естественных наук РУДН 26.10.2021, протокол № 0201-08/03.

Название темы диссертационного исследования в окончательной редакции было утверждено на заседании Ученого совета факультета физико-математических и естественных наук РУДН, 17.02.2026, протокол № 0200-УСП-8.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Оценка выполненной соискателем работы.** Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи разработки математических моделей и методов анализа производительности миграции виртуальных машин и сервисов в гибридных гранично-облачных средах на основе теории массового обслуживания. Полученные результаты имеют существенное значение для обеспечения качества обслуживания и снижения межконцевой задержки в телекоммуникационных сетях 5G/6G с граничными вычислениями.

**Личное участие соискателя в получении результатов.** Все результаты, изложенные в диссертации, получены соискателем лично или при его непосредственном и определяющем участии:

1. По первому результату – модель миграции виртуальных машин с обслуживаемыми задачами между облачными серверами – соискателем лично выполнена постановка задачи моделирования процесса миграции виртуальных машин в виде системы массового обслуживания с перемещением всех заявок класса между группами приборов; соискатель лично формализовал два алгоритма миграции, различающиеся моментом оценки занятости приборов (до и после принятия поступившей заявки) и направленные на минимизацию занятой пропускной способности серверов; самостоятельно выполнил вывод аналитических формул для расчета показателей эффективности миграции, включая вероятности миграции и среднюю высвобождаемую

- пропускную способность сервера, а также провел численный анализ моделей для сценариев обслуживания XR-приложений.
2. По второму результату – модель миграции пользователей сервисов между граничным и облачными серверами – соискателем лично поставлена задача моделирования миграции в виде системы массового обслуживания с перемещением заявок между общей группой приборов с эксклюзивным обслуживанием одного класса и индивидуальными приборами; соискатель самостоятельно формализовал политику миграции как задачу минимизации суммарной межконцевой задержки (E2E-delay) по всем пользователям при каждом изменении состояния системы; соискателем лично получено оптимальное распределение заявок между группами приборов в виде функции от числа заявок в системе и доказано, что стационарное распределение вероятностей состояний системы при оптимальной политике имеет мультипликативный вид; соискатель выполнил построение и реализацию алгоритма вычисления стационарного распределения и провел численное исследование зависимости характеристик от параметров системы.
  3. По третьему результату – модель миграции с коррелированным MMPP-поток в беспроводной гранично-облачной архитектуре – соискателем лично поставлена задача и построена модель системы массового обслуживания с входным потоком, моделируемым марковски-модулированным пуассоновским процессом MMPP; соискатель самостоятельно разработал политику миграции, дифференцированную по фазам MMPP-потока: в фазе высокой интенсивности решение о миграции пересматривается при каждом событии, а в фазе низкой интенсивности – только при поступлении новой заявки или смене фазы; соискателем лично представлена матрица интенсивностей переходов в блочно-трехдиагональном виде и разработан матричный алгоритм расчета стационарного распределения вероятностей состояний; соискатель самостоятельно провел оценку параметров MMPP-потока по реальному сетевому трафику методом максимального правдоподобия на основе EM-алгоритма с использованием пакета `marfit (R)` для различных типов сервисов.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований.**  
Достоверность полученных Куцазли А.И. результатов подтверждается корректным использованием апробированных методов теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и матрично-аналитических методов при выводе аналитических соотношений и доказательстве

утверждений; обоснованностью принятых допущений, базирующихся на анализе и обобщении передового опыта в области миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре и миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре; совпадением частных случаев разработанных моделей с известными результатами теории массового обслуживания; а также использованием параметров моделей, оценённых по реальным данным сетевого трафика.

**Новизна результатов проведенных исследований** состоит в следующем:

1. Модель миграции виртуальных машин в облачной инфраструктуре реализует перемещение всех заявок класса между группами приборов по алгоритмам, минимизирующим занятую пропускную способность серверов, с оценкой занятости приборов до и после размещения поступившей заявки. Для предотвращения осцилляций решение о миграции принимается только в момент поступления новой заявки соответствующего класса. Ранее основным критерием являлась загрузка процессора и энергопотребление, а проблема осцилляций решалась без формализации ограничений на момент принятия решения в модели массового обслуживания – двойными порогами загрузки, задержками между миграциями, предсказанием нагрузки.
2. Модель миграции сервисов в гранично-облачной архитектуре реализует перемещение заявок между общей группой приборов с эксклюзивным обслуживанием одного класса и индивидуальными приборами по политике, минимизирующей суммарную межконцевую задержку. Оптимальное распределение заявок получено аналитически в виде функции от числа заявок в системе, а стационарное распределение вероятностей состояний имеет мультипликативный вид. Ранее задача миграции сервисов в МЕС-системах формулировалась для одного сервиса с пороговой политикой по числу пользователей или как марковский процесс принятия решений и решалась численно методом итерации без получения аналитического решения в мультипликативном виде.
3. Модель миграции сервиса в гранично-облачной архитектуре учитывает коррелированный характер входного потока заявок пользователей в виде ММРР и реализует адаптивную политику миграции, зависящую от фазы потока: в фазе высокой интенсивности решение пересматривается при каждом событии, в фазе низкой интенсивности – только при поступлении заявки или смене фазы. Ранее модели миграции сервисов

в МЕС-системах исследовались с пуассоновским входным потоком и без адаптации политики миграции к фазе потока.

#### **Практическая значимость проведенных исследований.**

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные модели, формулы и алгоритмы могут быть использованы операторами мобильной связи и провайдерами облачных и граничных сервисов при проектировании и эксплуатации гибридных облачно-граничных инфраструктур 5G/6G для выбора и настройки политик миграции виртуальных машин и сервисов с учетом требований к качеству обслуживания. Полученные результаты позволяют оценивать вероятность миграции, суммарную межконцевую задержку, учитывать коррелированный характер входного трафика и тем самым обосновывать решения по размещению сервисов и распределению ресурсов МЕС-узлов и облачных серверов при поддержке критичных по задержке приложений. Результаты диссертации использованы при выполнении научно-исследовательских работ в рамках грантовой поддержки РУДН по тематике сетей нового поколения 6G.

**Ценность научных работ соискателя.** Соискатель является победителем конкурсного отбора на назначение стипендии Президента РФ для аспирантов и адъюнктов, обучающихся по очной форме обучения в российских организациях, осуществляющих образовательную деятельность, и проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов НТР РФ, определенных в СНТР РФ (2024-2025), победителем конкурсного отбора программы РУДН «Аспирантура полного дня» (2022-2025), исполнителем грантов системы грантовой поддержки научных проектов РУДН «Разработка моделей и алгоритмов нарезки радиоресурсов и приоритетного доступа в беспроводной сети 6G» (2023-2024), «Модели математической теории телетрафика для анализа приоритетного обслуживания потокового и эластичного трафика в сетях новых поколений» (2025-2026).

**Соответствие пунктам паспорта научной специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика»:**

- п. 9 «Математическая теория исследования операций» в части моделей массового обслуживания для исследования политик управления миграцией виртуальных машин между облачными серверами и миграцией пользователей сервисов между граничным и облачными серверами (результаты 1, 2);
- п. 11 «Распределенные многопользовательские системы» в части моделирования многосерверной облачной системы выполнения задач пользователей на виртуальных машинах и системы предоставления

- сервисов пользователям в распределенной беспроводной гранично-облачной архитектуре (результаты 1, 2, 3);
- п. 12 «Модели информационных процессов и структур» в части моделирования процесса выполнения задач пользователей в облачной инфраструктуре и процесса передачи коррелированного трафика в виде MMPP-потока в гранично-облачной архитектуре (результаты 1, 3).

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.** Научные результаты диссертации изложены в 12 публикаций, в том числе 3 опубликованы в рецензируемых научных изданиях Перечня ВАК РФ (К-1, К-2) / Перечня РУДН / МБЦ WoS, Scopus, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Основные положения и результаты работы Куцазли А.И. отражены в следующих публикациях:

1. **Kushchazli A.**, Leonteva K., Gaidamaka E., Kochetkova I. A delay-aware queuing model for performance analysis of service migration in MEC-Cloud environments // Lecture Notes in Computer Science. – 2026. – Vol. 16461. – P. 1–16.
2. **Kushchazli A.**, Leonteva K., Kochetkova I., Khakimov A. Evaluating QoS in dynamic virtual machine migration: A multi-class queuing model for edge-cloud systems // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2025. – Vol. 14, No. 3. – Art. No. 47.
3. **Kushchazli A.**, Safargalieva A., Kochetkova I., Gorshenin A. Queuing model with customer class movement across server groups for analyzing virtual machine migration in cloud computing // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 3. – Art. No. 468.
4. Kochetkova I., **Kushchazli A.**, Burtseva S., Gorshenin A. Short-term mobile network traffic forecasting using seasonal ARIMA and Holt-Winters models // Future Internet. – 2023. – Vol. 15, No. 9. – Art. No. 290.
5. **Куцазли А.И.**, Леонтьева К.А., Кочеткова И.А. Расчет показателей эффективности модели миграции виртуальных машин между серверами облачной инфраструктуры с выбором наименее загруженного сервера // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025681795 РФ : заявл. 04.07.2025 : опубл. 18.08.2025.
6. Ермолаев А.М., **Куцазли А.И.**, Кочеткова И.А. Классификация пакетов передачи данных по типам услуг методом двухэтапного анализа метаданных для инструментов захвата сетевого трафика //

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685024 РФ : заявл. 18.08.2025 : опубл. 19.09.2025.
7. Сафаргалиева А.И., **Кущазли А.И.**, Нохуров М., Кочеткова И.А. Расчет характеристик модели выполнения задач в среде облачных вычислений с миграцией виртуальных машин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663762 РФ : № 2023662447 : заявл. 15.06.2023 : опубл. 28.06.2023.
  8. **Кущазли А.И.** Система массового обслуживания с перемещением классов заявок по группам приборов для анализа миграции сервисов в облачной инфраструктуре // Ломоносов-2025 : материалы Международного молодежного научного форума, Москва, 11–25 апреля 2025 г. – М.: МАКС Пресс, 2025. – С. 216–217.
  9. Ермолаев А.М., **Кущазли А.И.**, Хакимов А.А., Кочеткова И.А. Разработка модели трафика в задаче миграции сервисов между граничными МЕС-узлами и облаком // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 07–11 апреля 2025 г. – М.: РУДН, 2025. – С. 144–148.
  10. **Кущазли А.И.**, Власкина А.С., Кочеткова И.А. Система массового обслуживания с перемещением классов заявок между группами приборов для анализа миграции виртуальных машин в облачных вычислениях // Информационные технологии и технические средства управления (ИССТ-2024): материалы VIII Международной научной конференции, Владикавказ, 01–05 октября 2024 г. – М. : ИПУ РАН, 2024. – С. 404–405.
  11. **Кущазли А.И.**, Сафаргалиева А.И., Кочеткова И.А. Система массового обслуживания с перемещением классов заявок между группами приборов для анализа миграции виртуальных машин // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 08–12 апреля 2024 г. – М.: РУДН, 2024. – С. 69–72.
  12. Силкина М.А., **Кущазли А.И.**, Кочеткова И.А., Горшенин А.К. К статистическому анализу профиля трафика мобильного оператора // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 18–22 апреля 2022 г. – М.: РУДН, 2022. – С. 152–155.

Текст диссертации был проверен на использование заимствованного материала без ссылки на авторов и источники заимствования. После исключения всех корректных совпадений иных заимствований не обнаружено.

Диссертационная работа Куцазли Анны Ивановны рекомендуется к публичной защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3 Теоретическая информатика, кибернетика.

Заключение принято на заседании кафедры теории вероятностей и кибербезопасности РУДН.

Присутствовало на заседании кафедры теории вероятностей и кибербезопасности 31 чел.

Результаты голосования: «за» – 31 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

04.03.2026, протокол № 0200-54/01-БУП-8.

Председательствующий на заседании:

Заведующий кафедрой  
теории вероятностей и кибербезопасности,  
доктор технических наук,  
профессор



подпись

К.Е. Самуйлов  
ФИО

Подпись Самуйлова К.Е. удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета  
факультета ФМиЕН РУДН



И.С. Зарядов  
ФИО