

"УТВЕРЖДАЮ"

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



В.А. Ромащенко
В.А. Ромащенко

2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 «Построение вероятностных моделей микро- и макромобильности для анализа энергоэффективности сетей подвижной связи «Новое радио»» выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук.

Голос Елизавета Сергеевна 26.07.1998 года рождения, гражданка России, в 2022 году окончила (с отличием) федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов» по направлению «01.04.02 Прикладная математика и информатика»

С 30.09.2022 по 30.09.2025 обучалась в аспирантуре РУДН по программе подготовки научно-педагогических кадров по направлению 1.2 «Компьютерные науки и информатика», 1.2.3. «Теоретическая информатика, кибернетика», по которой подготовлена диссертация.

Документ о сдаче кандидатских экзаменов, соответствующий специальности 1.2.3 «Теоретическая информатика, кибернетика» выдан в 2025 году в РУДН.

Научный руководитель – Гайдамака Юлия Васильевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теории вероятностей и кибербезопасности РУДН.

Тема диссертационного исследования была утверждена на заседании Ученого совета факультета физико-математических и естественных наук РУДН 18.10.2022, протокол № 0201-08/03.

Название темы диссертационного исследования в окончательной редакции было утверждено на заседании Ученого совета факультета физико-математических и естественных наук РУДН, 17.03.2026, протокол № 0200-УСП-9.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи — повышению энергоэффективности пользовательских устройств в высокочастотных сетях подвижной связи «Новое радио». При анализе основных показателей энергоэффективности пользовательского устройства (ПУ) — спектральной эффективности радиоканала между ПУ и базовой станцией (БС), энергопотребления ПУ, энергоэффективности ПУ и времени работы батареи ПУ — применен подход, заключающийся в оценке длительности интервалов нахождения пользовательского устройства в состояниях, различающихся энергопотреблением. Исследование строится на последовательном усложнении моделей: от анализа базовых факторов, влияющих на качество связи, при построении базовых моделей до разработки комплексных методов оценки энергосберегающих технологий, при этом ключевым результатом каждой главы является аналитическое выражение для функции распределения длительности непрерывного соединения ПУ с сетью, а также распределения интервалов, из которых складывается эта случайная величина. Полученные результаты имеют существенное значение для операторов связи и разработчиков оборудования перспективных беспроводных сетей 5G/6G.

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

- Построена модель состояния пользовательского устройства при мультисвязности с двойным подключением в виде цепи Маркова уровня III для анализа энергопотребления пользовательского устройства в главе 2;
- Построена модель состояния пользовательского устройства с учетом 3-х механизмов энергосбережения («прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами») в виде цепи Маркова уровня II для анализа энергопотребления пользовательского устройства в главе 3;
- Получена модель стохастической геометрии для построения матрицы переходных вероятностей цепи Маркова, моделирующей события блокировки прямой видимости между пользовательским устройством и базовой станцией;
- Численные эксперименты, представленные в диссертации, проведены с помощью программных средств, разработанных автором диссертации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что теория

построена на известных методах теории массового обслуживания, марковских случайных процессов и стохастической геометрии, используемых при доказательствах утверждений; идея базируется на анализе и обобщении передового опыта в области анализа энергоэффективности сетей 4G и 5G; установлено качественное совпадение частных случаев разработанных автором моделей с известными моделями теории случайных процессов, а также количественное совпадение с известными по публикациям результатами имитационного моделирования.

Апробация работы.

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях и семинарах: международная молодежная научная конференция «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем» (г. Томск, ИПМКН ТГУ, 2020 - 2021); всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (г. Москва, РУДН, 2020-2024); международная научная конференция «Distributed computer and communication networks: control, computation, communications» (г. Москва, РУДН, 2022, 2024).

Новизна результатов проведенных исследований состоит в следующем:

1. В отличие от известных базовых моделей микро- и макромобильности разработанные комбинированные модели в виде многоуровневых цепей Маркова позволили провести анализ 4 показателей энергоэффективности ПУ (энергопотребление, энергоэффективность, спектральную эффективность и время работы батареи) в течение одного соединения протокола управления радиоресурсами при одновременном учете всех особенностей процедур установления и поддержания соединения в беспроводных сетях 5G NR, а именно микро- и макромобильности, внутрисетевой и межсетевой мультисвязности, применении нескольких механизмов энергосбережения и их комбинаций.

2. На основе разработанной комбинированной модели в виде трехуровневой цепи Маркова выполнен сравнительный анализ энергоэффективности ПУ с функцией мультисвязности при одновременном учете микро- и макромобильности в трех сценариях двойного подключения, который ранее для указанных сценариев внутрисетевой и межсетевой мультисвязности не проводился.

3. На основе разработанной комбинированной модели в виде двухуровневой цепи Маркова выполнен сравнительный анализ энергоэффективности ПУ при применении механизмов энергосбережения

«прерывистый прием», «сигнал пробуждения» и «релаксация управления радиоресурсами» а также их комбинаций, который ранее для не проводился.

Практическая значимость проведенных исследований.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением полученных результатов в исследования по гранту РФФИ № 23-79-10084, регистрацией программ для ЭВМ, а также выработкой конкретных рекомендаций для операторов связи и разработчиков оборудования: определены условия эффективного применения различных сценариев двойного подключения в зависимости от плотности блокаторов и типа приложений, установлены границы целесообразности использования мультисвязности с учетом скорости микромобильности, а также предложены эффективные комбинации механизмов энергосбережения для устройств RedCap в сценариях промышленного интернета вещей, что позволяет повысить время автономной работы пользовательских устройств без ущерба для качества обслуживания.

Ценность научных работ соискателя.

Разработанный соискателем комплекс моделей, а также результаты численных экспериментов могут быть использованы при проведении научных работ и в учебном процессе. Также по материалам диссертационного исследования в федеральной службе по интеллектуальной собственности зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Соискатель является частью исследований по проекту РФФИ № 23–79-10084 «Математические модели и практические алгоритмы повышения энергоэффективности в гетерогенных миллиметровых и терагерцевых сетях пятого и шестого поколения (5G/6G)» (2023 – 2026 гг.). Соискатель является победителем конкурсного отбора 2025 года на назначение стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов по приоритетному направлению стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Повышение уровня связанности территории Российской Федерации путем создания интеллектуальных транспортных, энергетических и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики (свидетельство SPN.2025.05537).

Соответствие пунктам паспорта научной специальности 1.2.3

«Теоретическая информатика, кибернетика»:

- п. 9 Математическая теория исследования операций (физико-математические науки), а именно формализация исследуемой системы как объекта исследования операций в части описания фрагмента сети подвижной связи «Новое радио» в виде совокупности взаимодействующих элементов

(пользовательские устройства, базовые станции, блокаторы) и в части описания протекающих в фрагменте сети процессов установления, поддержания и разъединения соединений между ПУ и БС (описание режимов протокола управления радиоресурсами, функции мультисвязности и работы механизмов энергосбережения с помощью цепей Маркова в дискретном времени, описание процесса поступления пакетов данных с помощью Марковского процесса в непрерывном времени, описание микромобильности ПУ с помощью вероятностной модели, описание макромобильности блокатора с помощью системы массового обслуживания, описание макромобильности пользователя с помощью диффузионного процесса). Сравнительный анализ альтернатив, как ключевой элемент исследования операций, реализован при выборе степени мультисвязности (раздел 1.3), выборе сценария двойного подключения (глава 2), выборе комбинации механизмов энергосбережения (глава 3). Критериями при анализе выступают показатели эффективности, которые четко определены в разделе 1.1 в соответствии с стандартизирующими документами международных стандартизирующих организаций.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Научные результаты диссертации изложены в 9 публикациях, из них 3 в изданиях, индексируемых в Scopus/WoS, 4 в изданиях из Перечня ВАК/ Перечня РУДН/ RCSI, 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ. Основные положения и результаты работы Голос Е.С. отражены в следующих публикациях:

1. Ostriкова, D., Beschastnyi, V., Moltchanov, D., **Golos, E.**, Gaidamaka, Y., Ivanov, I., Koucheryavy, Ye., and Samouylov, K. Battery Lifetime and Power Consumption in 5G Systems with Intra- and Inter-RAT Dual-Connectivity. IEEE Transactions on Mobile Computing. 2024; 23(5): 5511-5526. DOI: 10.1109/TMC.2023.3311348.
2. Ostriкова, D.; **Golos, E.**; Beschastnyi, V.; Machnev, E.; Gaidamaka, Y.; Samouylov, K. Dynamic SNR, Spectral Efficiency, and Rate Characterization in 5G/6G mmWave/sub-THz Systems with Macro- and Micro-Mobilities. Future Internet. 2024; 16(7): 240. DOI: 10.3390/fi16070240.
3. Острикова Д. Ю., **Голос Е. С.**, Бесчастный В. А., Мачнев Е.А., Шоргин В.С., Гайдамака Ю.В. Метод оценки характеристик систем 5G/6G «Новое Радио» с учетом макро- и микромобильности пользователей. Информатика и ее применения. 2024; 18(2): 32-39. DOI: 10.14357/19922264240205.
4. Бесчастный В.А., **Голос Е.С.**, Острикова Д.Ю., Мачнев Е.А., Шоргин В.С., Гайдамака Ю.В. Анализ совместного использования стратегий

энергосбережения для устройств 5G с ограниченным функционалом. Системы и средства информатики. 2023; 33(4): 69-81. DOI: 10.14357/08696527230407

5. Аксёнова А.В., Острикова Д.Ю., Бесчастный В.А., Голос Е.С., Конюхов Р.И., Гайдамака Ю.В. Модель энергопотребления устройства в режиме прерывистого приёма DRX в сети 5G NR. В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 18–22 апреля 2022 г; 2022: С. 85-91

6. Голос Е.С., Мачнев Е.А., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Мокров Е.В. К анализу энергоэффективности и срока службы батареи смартфона в терагерцевых сетях. В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем : материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 17–21 апреля 2023 г; 2023: С. 59-62

7. Голос Е.С. Анализ влияния расположения пользователей в соте сети 5G/6G на спектральную эффективность. В сб.: В сб.: Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, РУДН, 08–12 апреля 2024 г; 2024: С. 121-128

8. Аксёнова А.В., Голос Е.С., Бесчастный В.А., Острикова Д.Ю., Гайдамака Ю.В. Расчет энергопотребления устройства в режиме DRX для различных типов трафика // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2022619091 / 19.05.2022

9. Конюхов Р.И., Голос Е.С., Дараселия А.В., Сопин Э.С., Самуйлов К.Е. Расчёт вероятности потери сессии при совместном обслуживании в миллиметровом и терагерцевом диапазонах частот с учетом блокировок прямой видимости // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2022660566 / 06.06.2022

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 Голос Елизаветы Сергеевны рекомендуется к публичной защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических и естественных наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Заключение принято на заседании кафедры теории вероятностей и кибербезопасности факультета физико-математических и естественных наук РУДН.

Присутствовало на заседании 30 чел.

Результаты голосования: «за» – 30 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

07.04.2026., протокол № 0200-54/01-БУП-11.

Председательствующий на заседании:
заведующий кафедрой теории вероятностей
и кибербезопасности
доктор технических наук, профессор

К.Е. Самуйлов

Подпись К.Е. Самуйлова удостоверяю.
Ученый секретарь Ученого совета
факультета физико-математических
и естественных наук РУДН



И.С. Зарядов