

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 55.2.002.01
НА БАЗЕ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ» (подведомственного Министерству цифрового
развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N _____

Решение диссертационного совета от «24» декабря 2025 г. N 141 о присуждении гражданину РФ Сапожникову Максиму Вячеславовичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности» по научной специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» принята к защите «23» октября 2025 г., протокол №135 диссертационным советом 55.2.002.01 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (далее МТУСИ), Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 244/нк от 03 марта 2016 г., изменения в составе утверждены Приказами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 37/нк от 30.01.2019, № 599/нк от 15.10.2020, №804/нк от 16.12.2020 г., № 331/нк от 12.04.2021г., № 679/нк от 24.06.2022г., № 1215/нк от 12.10.2022г., № 433/нк от 26.05.2025, №910/нк от 25.09.2025.

Соискатель Сапожников Максим Вячеславович «11» июня 1998 года рождения, в 2025 году был прикреплен в качестве соискателя ученой степени кандидата наук для подготовки диссертации к федеральному государственному бюджетному учреждению «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Кандидатские экзамены сданы в 2025 году (имеется справка о сдаче экзаменов). Проходит военную службу по контракту в в/ч 9935 в должности сотрудника.

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Научный руководитель – кандидат технических наук, Миронов Юрий Борисович, ведущий научный сотрудник отделения суперкомпьютерных систем и параллельных вычислений федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты:

1. Андреев Степан Николаевич, доктор физико-математических наук, директор научно-технического центра телекоммуникаций, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» («МФТИ»)

2. Хмелев Александр Валерьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ООО «КуСпэйс Технологии»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный исследовательский центр телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева» (далее ФГАУ НИЦ Телеком), г. Москва - в своем положительном заключении, подписанном Иванкович Марией Владимировной, кандидатом технических наук, заместителем директора Центра исследования перспективных беспроводных технологий связи

(ЦИПБТС) указала, что материалы диссертационной работы представляют интерес для организаций, занимающихся разработкой и развертыванием аппаратуры и систем беспроводной оптической связи.

Соискатель имеет 17 опубликованных работ по теме диссертации, из них 7 - работ, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, 3 работы, индексируемые в международной базе SCOPUS, 3 работы в изданиях, входящих в базу РИНЦ, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные публикации:

1. **Сапожников, М.В.** Анализ влияния атмосферной турбулентности на устойчивость квантового канала связи. Существующие подходы и методы / М.В. Сапожников // Электросвязь. – 2025. – № 4. – С. 37-46. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.66.4.005. (10 стр., личный вклад автора - 100%).
2. **Сапожников, М.В.** Алгоритм оценки влияния вихревой структуры атмосферы на устойчивость квантового канала связи / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов // Электросвязь. – 2025. – № 6. – С. 2-6. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.68.6.001. (5 стр., личный вклад автора - 70%).
3. **Сапожников, М.В.** Ослабление оптического излучения в атмосфере / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов // Электросвязь. – 2025. – № 7. – С. 2-7. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.69.7.001. (6 стр., личный вклад автора - 65%).
4. **Сапожников, М.В.** Методика оценки потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в квантовом канале связи с КРК / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, С.Ю. Казанцев // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 60-69. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007. (10 стр., личный вклад автора - 60%).
5. **Sapozhnikov, M.V.** Calculation parameters of satellite optical communication channel with quantum key distribution / M.V.

Sapozhnikov, D.N. Terekhin, S.Y. Kazantsev // 2025 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2025. – DOI: 10.1109/WECONF65186.2025.11017228. (6 стр., личный вклад автора - 50%).

6. **Sapozhnikov, M.V.** Software package for estimating the characteristics of wireless communication channel with quantum-key distribution in atmosphere / M.V. Sapozhnikov, S.Y. Kazantsev, E.M. Mavrin, P.V. Che, D.E. Praporshchikov, E.S. Zaitseva, A.V. Bourdine // Proc. SPIE 13738, Optical Technologies for Telecommunications 2024. – 2025. – Vol. 13738. – DOI: 10.1117/12.3067277. (7 стр., личный вклад автора - 70%).

7. **Сапожников, М.В.** Программа оценки бюджета вертикальной оптической линии связи / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, Д.Н. Терехин // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024660809, 13.05.2024. Заявка № 2024618693 от 22.04.2024. (Личный вклад автора - 60%).

Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступило 11 положительных отзывов от официальных оппонентов Андреева Степана Николаевича и Хмелева Александра Валерьевича, ведущей организации ФГАУ НИЦ Телеком, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ФГБУ науки ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (ФГАОУ ВО Самарский университет), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО

РУТ (МИИТ)), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (ФГАОУ ВО МИЭТ), Центр квантовых технологий Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Акционерное общество «Информационные технологии и коммуникационные системы» (АО «ИнфоТеКС»), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича» (ФГБОУ ВО СПбГУТ).

Были отмечены следующие недостатки:

1. В работе не указан конкретный протокол квантового распределения ключей, на основе которого проводилось моделирование скорости генерации просеянного квантового ключа. Между тем аналитические выражения для показателей эффективности КРК могут отличаться в зависимости от выбранного протокола (например, BB84, B92, BBM 92 и др.), а также от принятых допущений относительно модели квантового канала и параметров ошибок.
2. В численном моделировании скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности по предложенной в работе методике оценки энергетических потерь отсутствует указание исходных численных параметров, используемых в методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке.

3. Из текста диссертации неясно, какой именно язык программирования использовался при написании программного обеспечения, применяемого для численных экспериментов.
4. На рисунках 2.1-2.2 диссертации представлены плотности вероятности отклонения оптического излучения на апертуре приёмника, однако физический смысл оси абсцисс остаётся неясным. Не указано, относительно какого направления (например, геометрической линии визирования без учёта атмосферы или траектории с учётом регулярной рефракции) производится отсчёт координаты x . Также не объяснено, что представляет собой нулевая точка шкалы, является ли она проекцией геометрической оси луча в отсутствие атмосферы или положением, соответствующим среднему отклонению при учёте регулярной рефракции.
5. В третьем разделе диссертационной работы при сравнении смоделированной скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и экспериментальных данных не уточняется для какого типа трассы (горизонтального или вертикального) и типа канала (восходящего или нисходящего) проводится сравнение.
6. В третьем разделе говорится, что «эффективность системы квантового распределения ключей ... оценивается с использованием... скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности R_{sift} , и коэффициента квантовых ошибок на бит QBER». Однако анализ предлагаемой модели и эксперимента проводится только в рамках рассмотрения скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности. Было бы полезно проанализировать рассматриваемые модели и эксперимент с точки зрения уровня квантовых ошибок на бит для вспомогательных квантовых состояний или состояний «ловушек».

7. Помимо прочего, имеются некоторые замечания редакционного характера, касающиеся стилистического совершенствования текста и устранения мелких погрешностей.
8. При моделировании скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности использовались исключительно непараметрические модели вертикального профиля структурной постоянной показателя преломления. При этом не были учтены параметрические модели.
9. В работе утверждается, что применение предложенной методики оценки энергетических потерь повышает точность расчёта коэффициента квантовых ошибок на бит; однако, несмотря на наличие аналитического обоснования, отсутствует его экспериментальная верификация.
10. В работе не проведён анализ влияния параметров бортовых и наземных оптических терминалов, в первую очередь рабочей длины волны, апертуры приёмных и передающих телескопов на показатели эффективности КРК. Эти параметры в совокупности с атмосферной турбулентностью определяют скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и как следствие коэффициент квантовых ошибок на бит.
11. В автореферате, в разделе, посвящённом описанию методик количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, не указаны источники и методы получения начальных параметров атмосферы и вихревых структуры, необходимых для выполнения численных экспериментов.
12. В автореферате недостаточно очевиден выбор предлагаемого показателя эффективности сравнения результатов моделирования по предложенной методике оценки энергетических потерь с данными натурального эксперимента.

13. Исходя из текста автореферата непонятно проведен ли автором сравнительный анализ существующих моделей распространения оптического излучения в турбулентной атмосфере.
14. В автореферате не указано, были ли разработаны рекомендации по повышению показателей эффективности КРК для существующих и находящихся в эксплуатации наземных терминалов оптических связи.
15. В автореферате не указаны параметры приемо-передающих оптических терминалов, использованные при сопоставлении результатов численного моделирования с натурными экспериментальными данными. Между тем, как известно, атмосферные потери, включая рассеяние и поглощение, а также чувствительность к турбулентности, существенно зависят от этих параметров (например, рабочая длина волны, радиус луча, формируемый передатчиком и т.д.).
16. В автореферате не раскрыты вопросы выбора существующих моделей структурной постоянной показателя преломления атмосферы, применяемых при моделировании скорости генерации квантовой ключевой последовательности.
17. В автореферате отсутствует ряд иллюстраций, демонстрирующих результаты, получаемые предлагаемыми методиками количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, вследствие влияния атмосферной турбулентности.
18. В автореферате не освещен вопрос возможности применения предложенной методики для оценки энергетических потерь в восходящих оптических каналах связи. При этом сопоставление результатов моделирования с данными натурального эксперимента проведено исключительно для нисходящей трассы, что, однако, не отражено в явной форме в автореферате.

19. В автореферате не приводится перечень используемых параметров использованных при численном эксперименте (рис.1 и рис.2).
20. К недостаткам оформления автореферата следует отнести отсутствие нумерации формул.
21. В тексте автореферата отсутствует описание технических характеристик и функциональных возможностей спутника, предложенного к рассмотрению при сопоставлении результатов численного моделирования с натурными экспериментальными данными.
22. Из автореферата неясно возможно ли расширение методики по учёту дополнительных параметров (например, фоновой засветки, поляризационных искажений, влияния космической радиации).
23. В тексте автореферата не приведена оценка требуемых вычислительных ресурсов для проведения численных экспериментов по расчету эффективности КРК.
24. В автореферате не указаны потенциально возможные ограничения предложенной методики, например, при каких уровнях турбулентности (слабая, умеренная или сильная), углах возвышения и длинах волны модель сохраняет адекватность без введения эмпирических поправок.
25. В начале автореферата указано наличие 4-х публикаций в журналах, входящих в список ВАК РФ, однако в конце в списке публикаций перечислено уже 7 научных работ, что странно. Возможно, надо явно указывать журналы из списка ВАК РФ по профильной научной специальности.
26. В тексте автореферата на рис. 2 приведено сравнение скоростей генерации смоделированной (с учётом описанной методики) и реальной (полученной во время эксперимента) просеянной квантовой ключевой последовательности. На графике имеется заметное расхождение между экспериментальными данными и

расчетом. В экспериментальных данных наблюдается выраженный провал скорости генерации ключа в диапазоне 80-100 с, который отсутствует на рассчитанной зависимости. Это расхождение никак не прокомментировано в автореферате.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и представители ведущей организации имеют значительное количество публикаций, близких к теме диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **Разработана** методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности, отличающаяся от существующих тем, что учитывает как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

- **Разработана** методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, обусловленная влиянием атмосферной турбулентности, отличающаяся от существующих тем, что учитывает как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

- **Разработана** методика оценки энергетических потерь, обусловленных вопросами, связанными с атмосферной турбулентностью, и обеспечивающая повышение точности численных результатов показателей эффективности КРК не менее чем в 1,2 раза по сравнению с существующими.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработанная методика оценки энергетических потерь расширяет возможности применения существующих, тем, что учитывает ряд параметров, связанных с вопросами влияния атмосферной вихревой структуры на показатели эффективности КРК.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что основные результаты диссертации внедрены в компаниях ООО «КуСпэйс Технологии», ООО «КуРэйт» и АО

«Мостком» и учебный процесс ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», что подтверждается актами о внедрении.

Достоверность результатов исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, обеспечивается тем, что установлено качественное и количественное совпадение результатов численного моделирования по предлагаемой автором методике оценки энергетических потерь с результатами натурного эксперимента по спутниковому КРК.

Личный вклад соискателя состоит в: апробации результатов исследования в научно-исследовательских и педагогических процессах; самостоятельной разработке, апробации и верификации предлагаемых методик в диссертационном исследовании; разработке программного комплекса для расчёта параметров атмосферных и спутниковых оптических каналов с квантовым распределением ключей; самостоятельном проведении ряда численных экспериментов и оценке достоверности их результатов.

Диссертация Сапожникова Максима Вячеславовича является законченной научной квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержащей решение актуальной научной задачи – разработке методики расчёта энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, учитывающую природу образования, динамику движения и существования атмосферных вихрей, а также их влияние на оптическое излучение, обеспечивающую повышение точности оценки показателей эффективности КРК.

По новизне, уровню научной проработки и практической значимости полученных результатов работа отвечает требованиям п.9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842, а ее автор Сапожников Максим Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

На заседании «24» декабря 2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Сапожникову Максиму Вячеславовичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 13, против 1, недействительных бюллетеней 2.

Председатель

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



 А.С. Аджемов

 М.В. Терешонок

Заключение совета составлено «24» декабря 2025 г.