

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт»)

На правах рукописи

САПОЖНИКОВ МАКСИМ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ
КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ С УЧЕТОМ АТМОСФЕРНОЙ
ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

Специальность 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
к.т.н., Миронов Ю.Б.

МОСКВА – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. СПУТНИКОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ: ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ	15
1.1. Расходимость оптического излучения.....	17
1.2. Поглощение атмосферы	21
1.3. Рассеяние атмосферы	23
1.3.1. Рэлеевское рассеяние	24
1.3.2. Ми рассеяние.....	25
1.4. Атмосферная турбулентность	28
1.4.1. Высотные зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы.....	31
1.4.2. Сцинтилляция	35
1.4.3. Блуждание луча.....	43
1.5. Атмосферная рефракция.....	49
1.6. Выводы к разделу 1	54
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ.....	56
2.1. Природа образования атмосферных вихрей	57
2.2. Методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча .	59
2.3. Методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке	67
2.4. Методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью	74
2.5. Выводы к разделу 2	76
РАЗДЕЛ 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ МЕЖДУ СПУТНИКОМ И НАЗЕМНОЙ ПРИЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ	78

3.1. Моделирование скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности.....	81
3.1.1. Существующая методика расчета энергетических потерь.....	81
3.1.2. Верификация разработанной методики оценки энергетических потерь	86
3.2. Выводы к разделу 3	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	93
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ.....	109

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современный этап развития информационно-коммуникационных технологий характеризуется значительным технологическим ростом, что сопровождается увеличением спроса на мультимедийные сервисы и высокоскоростную передачу данных. Вследствие этого к сетям связи предъявляются всё более высокие требования по пропускной способности для эффективной передачи больших объёмов данных в цифровой среде [1].

Интенсивное увеличение объёмов телекоммуникационного трафика привело к перегрузке доступных радиочастотных диапазонов, что делает актуальным переход к альтернативным способам передачи сигналов. Одним из таких решений является использование оптического диапазона волн [2]. В этом контексте особый интерес представляет спутниковая оптическая связь в свободном пространстве (ОССП), функционирующая на основе модулированного излучения в инфракрасной области спектра. Данная технология демонстрирует высокий потенциал для применения в различных областях [3, 4].

В отличие от традиционных радиочастотных систем связи, оптические системы ОССП характеризуются рядом принципиальных преимуществ [5]. Среди наиболее значимых можно выделить: высокую пропускную способность [5]; уменьшенные габариты и массу аппаратуры при сопоставимом коэффициенте усиления антенны/телескопа [6]; низкое энергопотребление, что повышает энергоэффективность систем [7]; не требуется лицензирование частот, что упрощает развёртывание и масштабирование систем [8]; повышенную степень конфиденциальности, перехват или даже детектирование факта передачи данных затруднён из-за узконаправленного характера луча [9].

Одним из определяющих преимуществ оптической связи в свободном пространстве является высокий уровень информационной безопасности, обеспечиваемый за счёт внедрения современных методов защиты [10, 11]. Эти

методы обладают устойчивостью к атакам, включая попытки перехвата со стороны злоумышленников, располагающих высокопроизводительными вычислительными системами, вплоть до квантовых компьютеров [12, 13]. В качестве перспективного решения, способного гарантировать защиту от несанкционированного доступа на физическом уровне, выступает технология квантового распределения ключей (КРК), принципы и реализация которой детально изложены в работах [10, 14, 15].

Примером практической реализации спутниковой квантовой связи стал китайский спутник *Micius* (*Mozi*, Мо-цзы), выведенный на орбиту Китайской Народной Республикой в 2016 году [16–19]. Этот проект стал первым в мире экспериментальным спутником, специально созданным для отработки технологии квантового распределения ключей.

Несмотря на значительный потенциал систем ОССП, их эффективность и устойчивость в значительной мере определяются влиянием атмосферных условий. Основными факторами, ограничивающими надёжность таких систем, являются: протяжённость трассы передачи сигнала, географическое положение наземных приемо-передающих терминалов, текущие погодные условия, явления поглощения и рассеяния оптического излучения в атмосфере [20, 21], а также флуктуации показателя преломления воздуха, вызванные перемешиванием воздушных масс (атмосферная турбулентность) [5]. Не менее важным является воздействие различных форм рефракции, включая регулярную, случайную и аномальную [22].

Эти факторы оказывают негативное влияние на качество канала связи, вызывая ослабление оптического сигнала, сокращение дальности передачи данных, а также возможные кратковременные или полные перерывы в соединении со спутником. Среди различных атмосферных явлений наибольшую угрозу для устойчивости оптической связи в свободном пространстве представляет атмосферная турбулентность, способная вызывать такие эффекты, как сцинтилляция (мерцание интенсивности сигнала) и пространственное блуждание луча [4, 5, 23].

Несмотря на достигнутые успехи в моделировании турбулентной атмосферы и её влияния на распространение оптических сигналов, существующие методы

оценки энергетических потерь, вызванных турбулентной атмосферой, имеют ряд существенных недостатков. Основные из них заключаются в следующем:

1. Многие современные подходы базируются на допущениях, не учитывающих пространственную неоднородность атмосферы. В реальных условиях параметры атмосферы могут существенно варьироваться как по высоте, так и во времени, что приводит к погрешностям при наведении оптической системы на спутник и поддержании устойчивой синхронизации канала связи;

2. Атмосферная турбулентность является нестационарным процессом, характеризующимся высокой динамичностью и значительной временной изменчивостью параметров, которые не учитываются в существующих методах;

3. Модели, разработанные на основе данных из определённого региона, могут давать значительные погрешности при использовании в других условиях, где атмосферные характеристики отличаются.

В связи с этим возникает необходимость в разработке более совершенных подходов по учету атмосферной турбулентности в ключе оптической связи в свободном пространстве, способных учитывать динамические процессы вихреобразования, обеспечивать высокую точность и обладать адаптивностью к меняющимся внешним условиям.

Степень разработанности темы. Вопросы распространения оптического излучения в условиях турбулентной атмосферы были исследованы в работах таких ученых, как В.Е. Зуев, А.М. Обухов, А.С. Гурвич, М.Е. Грачева, В.И. Татарский, А.М. Зотов, L.C. Andrews, R.L. Philips, R.E. Hufnagel, D.P. Greenwood и других. Эти исследования содержат как теоретические, так и экспериментальные аспекты влияния атмосферной турбулентности на оптическое излучение, а также методы оценки параметров турбулентности, основанные на флуктуациях лазерного излучения.

Анализ научных исследований, посвящённых распространению оптического излучения в турбулентной атмосфере, свидетельствует о том, что разработанные теоретические модели, описывающие физические процессы, возникающие при взаимодействии оптического излучения с неоднородной воздушной средой,

требуют верификации. Это обусловлено тем, что существующие подходы к оценке энергетических потерь неадаптивны (т.е. все параметры атмосферы являются среднестатистическими постоянными величинами за определённый период). Они не учитывают изменение основных параметров атмосферы, с учетом природы образования, динамики движения и существования атмосферных вихрей и их влияния на параметры оптического излучения. Таким образом, эти факторы подчеркивают **актуальность** предложенной методики для расчета энергетических потерь, влияющих на квантовое распределение ключей в условиях турбулентной атмосферы, учитывающей динамические процессы вихреобразования.

Целью диссертационной работы является исследование возможностей повышение точности оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в спутниковых системах квантовых коммуникаций.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**, взаимосвязь которых определила структуру диссертации:

- 1) Анализ существующих подходов по оценке основных факторов, ограничивающих использование квантового распределения ключей в спутниковых системах квантовых коммуникаций и выявление границ применимости этих подходов;
- 2) Разработка методики количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности;
- 3) Разработка методики определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке вследствие влияния атмосферной турбулентности;
- 4) Разработка методики оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферными процессами, в том числе турбулентностью, использующей сочетание предлагаемых методик количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и методики определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру;

5) Верификация методики оценки энергетических потерь, учитывающей атмосферную турбулентность, путем количественного и качественного сравнения полученных результатов с данными натурного эксперимента.

Объектом исследования является спутниковая система квантовых коммуникаций.

Предметом исследования является методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, в спутниковых системах квантовых коммуникаций.

Научная задача диссертационной работы:

Разработка 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.

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы применялись методы математического моделирования, включая метод конечных элементов, статистического анализа, теории вероятностей, а также методы сравнения, анализа и синтеза для комплексного решения сформулированных задач.

Научная новизна результатов исследования:

1. 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;

2. 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;

3. Разработана методика оценки обусловленных атмосферной турбулентностью энергетических потерь, использующая сочетание методик количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения

изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методики оценки энергетических потерь, путем учета атмосферной вихревой структуры турбулентной атмосферы.

Практическая значимость диссертационной работы:

Предложенная методика расчета энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, реализована в виде программных комплексов, применяемых для моделирования спутниковых оптических каналов связи с КРК, обеспечила повышение точности оценки показателей эффективности КРК не менее чем в 1,2 раза, по сравнению с существующими.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ представлены в Приложении Б.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча из-за влияния атмосферной вихревой структуры позволяет с учетом до 15 параметров приемо-передающего телескопа, атмосферы и вихревых структур характеризовать устойчивость оптической системы к атмосферным искажениям.

2. Предложенная методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке позволяет с учетом до 24 параметров приемо-передающего телескопа, атмосферы и вихревых структур учитывать влияние вихревой структуры атмосферы при определении значений интенсивности излучения на апертуре приемника.

3. Предложенная методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, учитывает ее вихревую структуру и обеспечивает повышение точности численных результатов показателей эффективности КРК не менее чем в 1,2 раза, по сравнению с существующими.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждаются их соответствием данным других исследователей, а

также согласованностью качественных и количественных характеристик с экспериментальными данными и результатами практического внедрения.

Апробация результатов работы. Основные и промежуточные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXXII международной конференции «Лазерно-информационные технологии» (Новороссийск, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024 г.); 23-ей международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2024 г.); XIV международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, НИЯУ МИФИ, 2025 г.); XXVIII международной конференции «Wave electronics and its application in information and telecommunication systems» (Санкт-Петербург, IEEE, 2025 г.).

Публикации по теме диссертации. В ходе проведения работы над диссертационным исследованием было выпущено 17 печатных работ. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 рецензируемых научных работах, входящих в список ВАК РФ.

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

I. 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.

II. 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.

III. 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.

IV. 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.

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень WoS, Scopus:

V. 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.

VI. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

VII. 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.

Другие публикации:

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

VIII. Сапожников, М.В. Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации / С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников, Д.Н. Терехин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – № 1. – С. 5-12. – DOI: 10.56304/S2079562924060162.

IX. Сапожников, М.В. Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации / С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, А.В. Бурдин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19. – № 1. – С. 21-30. – DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30.

X. Сапожников, М.В. Оценка доступности атмосферной оптической связи в различных субъектах Российской Федерации / С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, Б.М. Шабанов // Системы и средства информатики. – 2025. – Т. 35. – № 2. – С. 61-80. – DOI: 10.14357/08696527250205.

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень WoS, Scopus:

XI. Sapozhnikov, M.V. Development of Map of Applicability of Atmospheric Optical Communication at Nuclear Energy Facilities of the Russian Federation / S.Y. Kazantsev, M.V. Sapozhnikov, D.N. Terekhin // Phys. Atom. Nuclei. – 2024. – Vol. 87. – P. 1759-1765. – DOI: 10.1134/S106377882409014X.

Статьи в сборниках трудов международных научно-технических конференций и форумов:

XII. Сапожников, М.В. Программный комплекс расчета потерь на оптической трассе / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, С.Ю. Казанцев // В сборнике тезисов: 23-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». – Москва, 2024. – С. 158.

XIII. Сапожников, М.В. Влияние МДВ на энергетический бюджет линий связи в ближнем и среднем ИК диапазоне спектра / А.Н. Бахус, С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников // В сборнике: Лазерно-информационные технологии 2024, Труды XXXII международной научной конференции. – Новороссийск, 2024. – С. 86-87.

XIV. Сапожников, М.В. Оценка возможности применения атмосферной оптической связи на объектах использования атомной энергетики ЮАР / А.Н. Бахус, П.М. Бобков, Г.К. Даниэлс, С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников // В сборнике

научных трудов: XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике. – Москва, 2025. – С. 461.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

XV. Сапожников, М.В. Программный комплекс FSO / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, С.Ю. Казанцев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024618934, 17.04.2024. Заявка № 2024618141 от 17.04.2024.

XVI. Сапожников, М.В. Программа энергетического расчета линий "вниз" и "вверх" для спутниковой системы связи / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619362, 23.04.2024. Заявка № 2024617543 от 10.04.2024.

XVII. Сапожников, М.В. Программа расчета вертикальных атмосферных профилей / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, Д.Н. Терехин, Д.Н. Терехин // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619971, 02.05.2024. Заявка № 2024618714 от 22.04.2024.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационных исследований, посвящённые разработке методики оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, напрямую связаны с деятельностью компаний ООО «КуСпэйс Технологии», ООО «КуРэйт» и АО «Мостком», что подтверждено актами о внедрении результатов работы (Приложение А).

Результаты диссертационных исследований также связаны с научным направлением кафедры Направляющие телекоммуникационные среды (НТС) МТУСИ, что подтверждено актом о внедрении результатов работы (Приложение А).

Личный вклад. Представленные в диссертации результаты исследований были выполнены в 2023–2025 гг. Все изложенные в диссертации результаты были получены лично автором. Автор диссертации внесен решающий вклад при

анализе, описании и подготовке публикаций, на которых основан материал диссертационной работы.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» направления исследований, а именно:

пункт 1. Разработка, и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций;

пункт 3. Исследование процессов представления, передачи, хранения и отображения аналоговой, цифровой, видео-, аудио-, голографической и мультимедиа информации; разработка и совершенствование соответствующих алгоритмов и процедур;

пункт 18. Разработка научно-технических основ создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из трех разделов, включая введение, заключение, список литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 112 страниц, включая 28 рисунков и 2 таблицы. Список используемой литературы включает 111 наименований.

РАЗДЕЛ 1. СПУТНИКОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ: ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

Квантовое распределение ключей представляет собой одну из самых перспективных технологий для обеспечения безопасной передачи информации [10-15]. Однако, несмотря на свои преимущества, КРК сталкивается с рядом вызовов при реализации в условиях спутниковой оптической связи в свободном пространстве. Одним из критически важных факторов, влияющих на эффективность данной технологии, а именно, на скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и коэффициент квантовых ошибок на бит, являются атмосферные потери [24].

В атмосферном оптическом канале основными источниками энергетических потерь выступают процессы поглощения, рассеяния и турбулентные искажения [5, 20, 25]. Поглощение и рассеяние возникают вследствие взаимодействия лазерного излучения с молекулярными компонентами атмосферы и аэрозольными частицами [26, 27]. Параллельно этому, колебания температуры и давления вдоль трассы распространения оптического пучка вызывают локальные флуктуации плотности воздуха, что, в свою очередь, порождает случайные изменения показателя преломления - явление, известное как атмосферная турбулентность. В результате энергия оптического сигнала перераспределяется в поперечной плоскости, что проявляется в виде стохастических колебаний амплитуды и фазы принимаемого излучения [5, 23].

Из перечисленных факторов наибольшее влияние на общий уровень энергетических потерь в канале связи могут оказывать явления сцинтилляции и блуждания луча, вызванные атмосферной турбулентностью [4, 5]. При этом степень их воздействия зависит от направления излучения. В случае «восходящей» линии связи (Земля-спутник) источник искажений, связанный с турбулентностью атмосферы, расположен ближе к передающей аппаратуре, что приводит к

накоплению искажений на начальном участке распространения сигнала. Это обстоятельство вызывает более значительные потери по сравнению с «нисходящим» направлением передачи (спутник-Земля).

В условиях реальной эксплуатации спутниковых систем связи, особенно на расстояниях, при которых проявляются накопительные эффекты, атмосферные потери могут достигать значительных значений, что требует тщательного анализа и оптимизации систем передачи. При этом для обеспечения возможности работы квантовой связи на трассе Земля-спутник общее затухание должно быть менее 60 дБ, иначе такая связь становится нецелесообразной вследствие снижения скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности и превышения коэффициента квантовых ошибок на бит выше порогового значения [24].

При проектировании спутниковых систем оптической связи в свободном пространстве необходимо учитывать совокупное влияние атмосферных факторов на энергетические потери в канале с учётом динамики движения спутника, рабочей длины волны излучения и географического расположения наземного терминала. Эти параметры должны быть учтены в модели атмосферного канала, учитывая потенциальный регион расположения наземной станции.

Ввиду высокой динамичности параметров канала, особенно в условиях сеанса спутниковой связи, когда характеристики среды изменяются в реальном времени, анализ влияния этих факторов на эффективность квантового распределения ключей между спутником и наземной станцией целесообразно выполнять с помощью численного моделирования. Такого рода анализ энергетических потерь (атмосферных и геометрических) имеет несколько ключевых аспектов. Во-первых, понимание факторов, способствующих энергетическим потерям, позволяет разработать более эффективные методы компенсации, такие как использование адаптивных оптических систем или коррекции сигналов. Во-вторых, прогнозирование атмосферных условий и их влияние на передачу сигналов помогает в планировании и оптимизации работы спутниковых систем.

1.1. Расходимость оптического излучения

Потери, связанные с расходимостью оптического излучения, возникают вследствие пространственного распространения светового пучка при передаче сигнала в свободной среде от излучателя к приемному устройству. Основной причиной таких потерь является дифракционное расширение луча вблизи входной апертуры приемника, из-за которого часть энергии излучения не попадает на чувствительный элемент. Для эффективной передачи (обеспечения минимальных потерь оптического сигнала на пути распространения от передатчика к приёмнику при одновременном соблюдении требований к точности наведения и устойчивости связи) предпочтительно использовать источники с минимальной расходимостью излучения, однако необходимо обеспечить оптимальное (по критерию минимизации вероятности временной потери связи вследствие несоответствия геометрии пучка и положения приёмника) соотношение между узостью луча и его достаточной шириной, чтобы гарантировать высокую вероятность приёма оптического сигнала бортовым приемником спутника, находящегося на орбите [5].

Потери, вызванные расходимостью оптического пучка, количественно характеризуются коэффициентом η_{div} , равным отношению площади апертуры приемника к площади луча передатчика в приемнике [28, 29]. Как показано на рис. 1.1, данная величина аналитически выражается формулой (1.1).

$$\eta_{div} = \left(\frac{S_r}{S_t + S_s} \right), \quad (1.1)$$

где: S_r – площадь линзы приемного объектива, определяемая выражением:

$$S_r = \pi R_r^2 = \frac{\pi D_r^2}{4}, \quad \text{где } D_r \text{ – диаметр линзы приемного устройства;}$$

S_t – площадь линзы передающего объектива, определяемая выражением:

$$S_t = \pi R_t^2 = \frac{\pi D_t^2}{4}, \quad \text{где } D_t \text{ – диаметр линзы передающего устройства;}$$

S_s – площадь пятна излучения в месте расположения приемного устройства,

определяемая выражением: $S_s = \pi R_s^2 = \frac{\pi D_s^2}{4}$, где D_s – диаметр оптического пятна,

определяемый выражением: $D_s = L\theta$, где L – расстояние между излучателем и приемником, а θ – полный угол расхождения луча.

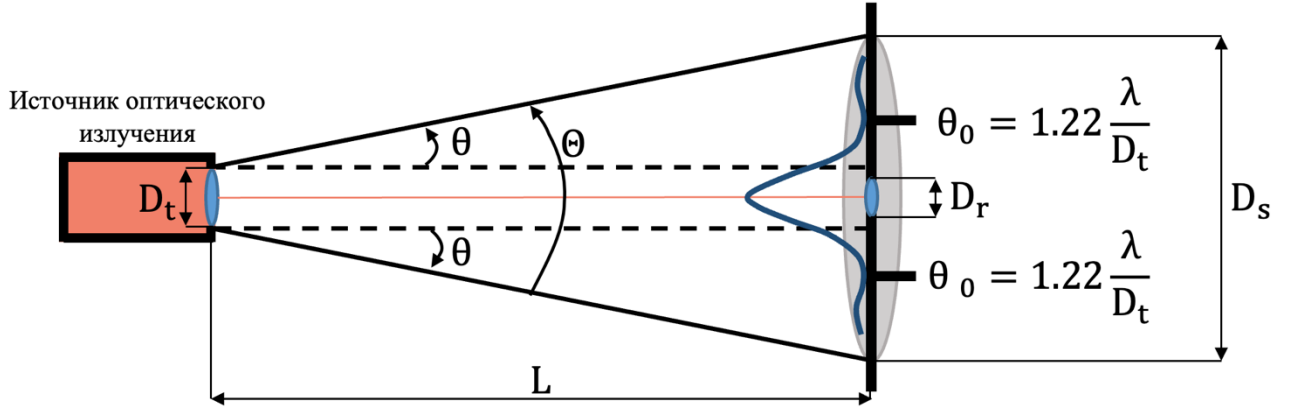


Рисунок 1.1 – Угловая расходимость оптического излучения

Таким образом, выражение (1.1) можно преобразовать (1.2):

$$\eta_{div} = \left(\frac{D_r^2}{(D_t + L\theta)^2} \right), \quad (1.2)$$

Распространение оптического излучения может быть описано с помощью различных моделей, имеющих некоторое отклонение от распространения реальных лучей. Наиболее предпочтительна модель Гаусса [30]. Как показано на рис. 1.2, Гауссовской профиль симметричен относительно центра, и уменьшается по мере увеличения расстояния от центра перпендикулярного направлению распространения. Это распределение описывается уравнением [4]:

$$I(r, z) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w(z)^2}\right) = \frac{2P}{\pi w(z)^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{w(z)^2}\right),$$

где: I_0 – пиковая интенсивность в центре пучка; r – радиальное расстояние от оси; $w(z)$ – радиус луча, где интенсивность равна $1/e^2$ от I_0 ; z – продольная координата, отсчитываемая вдоль направления распространения пучка от его перетяжки (места минимального поперечного сечения); P – полная мощность луча.

Из-за дифракции Гауссов пучок будет сходиться и расходиться из области, называемой перетяжкой пучка (w_0), где диаметр пучка достигает минимального значения. Пучок сходится и расходится одинаково по обе стороны перетяжки пучка на угол расхождения θ (угол дифракции основной моды в дальней зоне) (рис. 1.1),

определяемый, как $\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$. Первый минимум в дифракционной картине возникает при $\theta_0 = \frac{1,22\lambda}{D_t}$ [31], тогда полный угол можно определить, как $\theta = \tan\left(\frac{1,22\lambda}{D_t}\right)$.

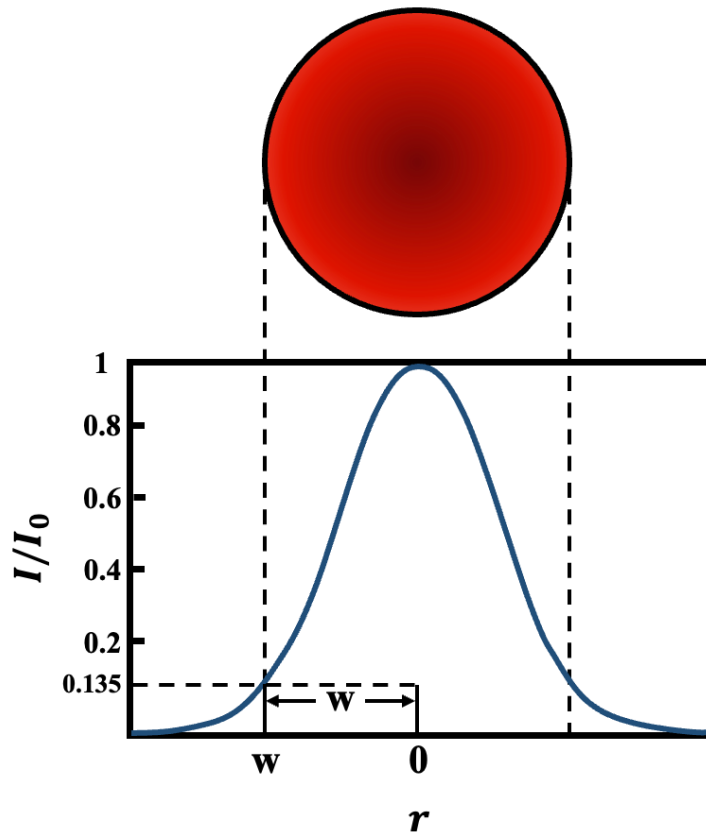


Рисунок 1.2 – Профиль интенсивности Гауссова пучка

С учетом того, что полный угол расхождения луча $\theta = 2\theta$, выражение (1.2) можно переписать в виде (1.3):

$$\eta_{div} = \frac{D_r^2}{\left(D_t + 2L \cdot \tan\left(\frac{1,22\lambda}{D_t}\right)\right)^2} \quad (1.3)$$

Полученное выше соотношение позволяет перейти к комплексной количественной оценке влияния на потери, обусловленные расходимостью оптического излучения $\eta_{link|div} = -10\log_{10}(\eta_{div})$, протяженности трассы, диаметров линз приемного и передающего объективов, а также рабочей длины волны (рис. 1.3–1.4) на трассе от 500 до 1200 км.

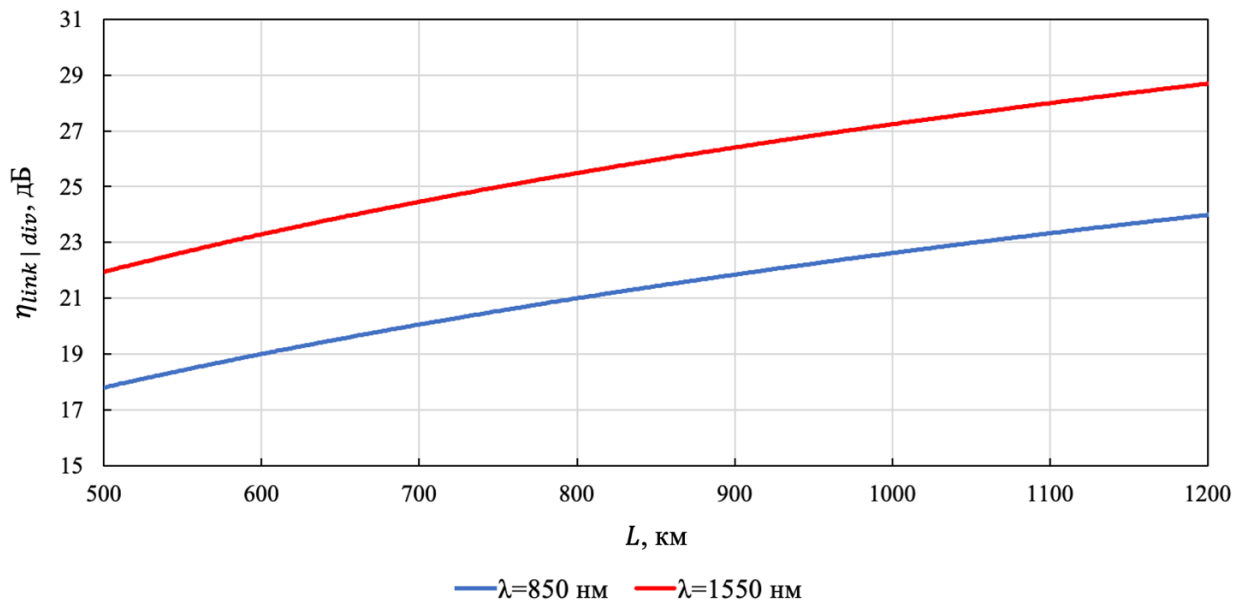


Рисунок 1.3 – Потери, обусловленные расходимостью оптического излучения, для различных значений рабочей длины волны (λ), в зависимости от протяженности трассы

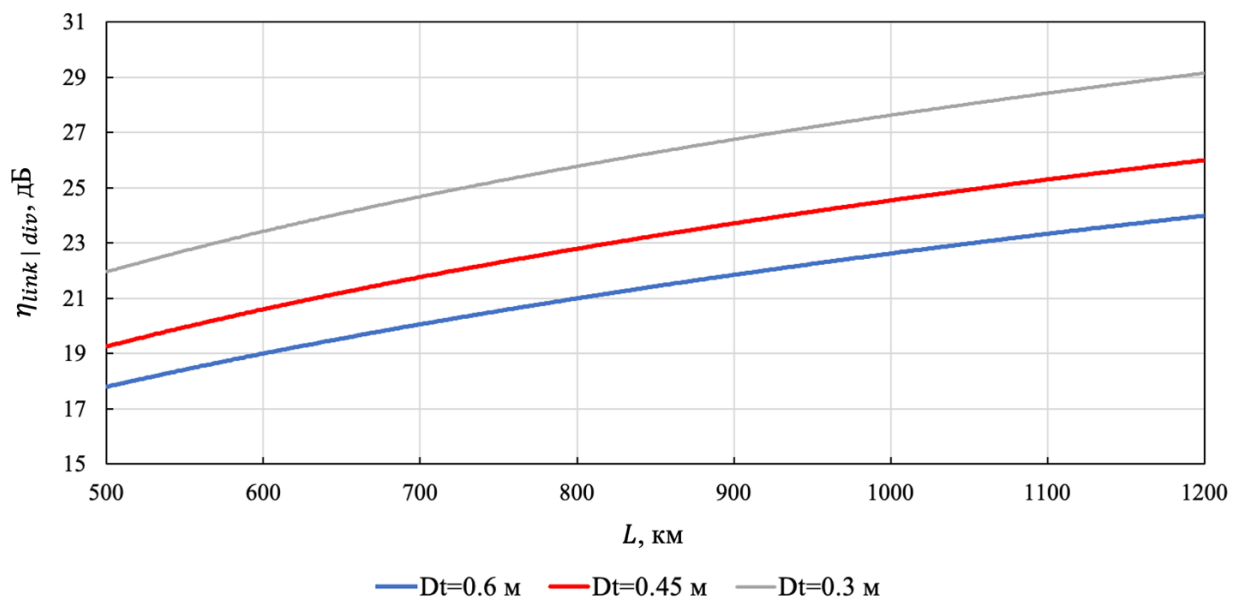


Рисунок 1.4 – Потери, обусловленные расходимостью оптического излучения, для различных значений диаметров линзы передающего устройства (D_t) при $\lambda=850$ нм и $D_r=0,3$ м, в зависимости от протяженности трассы

Исходя из рис. 1.3, видно, что использование в качестве рабочей волны $\lambda=850$ нм обеспечивает меньшие потери, обусловленные расходимостью оптического

излучения, по сравнению с $\lambda=1550$ нм. Количественно выигрыш составляет в среднем порядка 4,4 дБ на дистанции от 500 до 1200 км.

Таким образом, существенным недостатком более длинных волн является повышенное затухание из-за рассеивания луча, вызванное оптической дифракцией.

Основываясь на рис. 1.4, можно сделать вывод, что, чем больше диаметр линзы передающего устройства, тем меньше потери, обусловленные расходимостью оптического излучения. Количественно, выигрыш, при использовании линзы передающего устройства $D_t = 0,6$ м, по сравнению с $D_t = 0,3$ м, составляет в среднем порядка 4,6 дБ на дистанции от 500 до 1200 км.

1.2. Поглощение атмосферы

При распространении лазерного излучения в атмосфере оно подвергается взаимодействию с молекулярными составляющими воздуха и аэрозольными частицами [5]. В спектральных диапазонах видимого и ближнего инфракрасного излучения наибольший вклад в поглощение вносят молекулы водяного пара, углекислого газа и озона [32, 33]. Важно отметить, что степень поглощения существенно зависит от длины волны, проявляя выраженную спектральную избирательность [34]. В связи с этим, при проектировании систем оптической связи в свободном пространстве, в качестве рабочих выбираются длины волн, соответствующие областям минимального атмосферного поглощения.

В настоящее время существует значительное число специализированных баз данных, содержащих спектроскопические данные газов, рассчитанные для различных стандартных моделей атмосферы. Среди зарубежных наиболее известны такие базы, как HITRAN, LOWTRAN, FASCODE и MODTRAN, их описание и возможности подробно рассмотрены в работах [35, 36]. В отечественной научной практике широкое применение находит информационно-аналитическая система «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) [37],

которая в рамках настоящего исследования использовалась для моделирования спектральных характеристик поглощения при различных метеорологических и высотных условиях атмосферы.

Значения коэффициентов поглощения $\sigma_A(\lambda)$, представленные в работе [37], получены для ряда стандартных атмосферных моделей и различных географических широт. Однако в этих данных не учитывается изменение концентрации молекул с высотой $N(h)$. Между тем, для адекватного моделирования атмосферного ослабления оптического сигнала корректный учёт высотной зависимости $N(h)$ является обязательным. Данная величина вычисляется по формуле: $N(h) = \frac{P(h)}{kT(h)}$, где $P(h)$ и $T(h)$ – давление и температура на высоте h , а k – постоянная Больцмана [38].

При отсутствии надёжных локальных метеорологических данных для восстановления высотного профиля температуры и давления необходимо использовать параметры, соответствующие модели стандартной атмосферы [39].

Функция пропускания, с учетом только поглощения, основываясь на законе Бера [40], определяется по формуле (1.4):

$$\eta_{absorption} = \exp \left[-\sec(\xi) \int_{h_0}^H (\sigma_A(\lambda, h) h) dh \right], \quad (1.4)$$

где: $\sigma_A(\lambda, h)$ – коэффициенты поглощения на высоте h ; h_0 – высота расположения наземного терминала над уровнем моря; $\xi = 90 - \varphi$ – зенитный угол, где φ – угол места (угол возвышения над горизонтом); H – расстояние до спутника при $\varphi = 90^\circ$ (зенит).

На рис. 1.5 представлен пример коэффициента пропускания атмосферы, рассчитанного с учётом поглощения, полученного с использованием системы SPECTRA [37]. Расчёт выполнен для вертикальной трассы распространения оптического сигнала: начальная высота - уровень моря ($h_0 = 0$ м), протяжённость трассы $L = 500$ км, угол места $\varphi = 90^\circ$ (зенит). В качестве атмосферной модели использована летняя версия стандарта USA для средних географических широт. Исходя из рис. 1.5, очевиден выбор следующих длин волн при проектировании систем ОССП из-за наименьших значений поглощения: 850 нм, 1310 нм и 1550 нм.

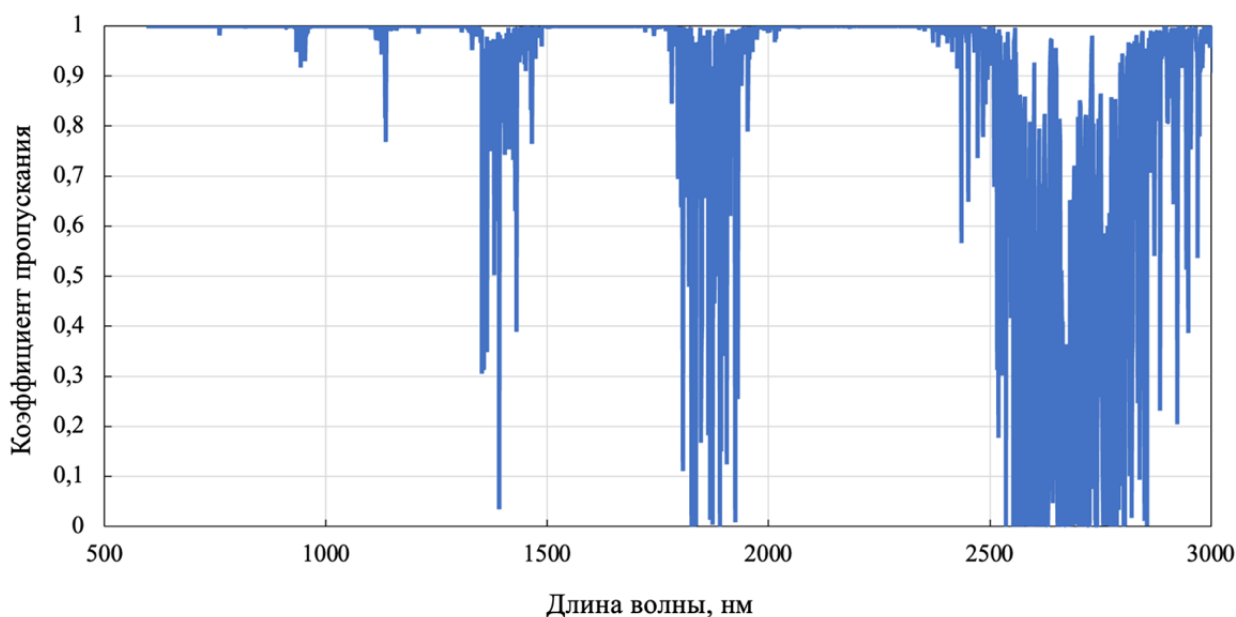


Рисунок 1.5 – Коэффициент пропускания атмосферы, с учетом поглощения атмосферы, в зависимости от длины волны

1.3. Рассеяние атмосферы

Подобно поглощению, рассеяние оптического излучения в атмосфере также демонстрирует выраженную спектральную зависимость. В случае, когда размеры атмосферных частиц значительно меньше оптической длины волны, наблюдается явление рэлеевского (молекулярного) рассеяния. Этот тип рассеяния оказывает наиболее заметное влияние на системы ОССП, особенно при использовании длин волн менее 0,8-1 мкм [5, 41]. Основными источниками рэлеевского рассеяния являются молекулы воздуха и мелкодисперсные частицы тумана [42].

Рассеяние Ми (или аэрозольное рассеяние) проявляется, когда размеры взвешенных частиц в атмосфере соизмеримы с длиной волны или превышают её [5]. Именно этот эффект вносит наибольший вклад в ослабление лазерного сигнала в типичных рабочих диапазонах оптических систем связи [24], поскольку в реальных условиях распространения, особенно при наличии тумана, дымки или

пыли, размеры аэрозольных частиц часто оказываются близкими к длине волны лазерного излучения, что усиливает эффект рассеяния [43].

1.3.1. Рэлеевское рассеяние

Согласно теории рэлеевского (молекулярного) рассеяния, коэффициент рассеяния σ_R может быть выражен аналитически и определяется выражением (1.5) [44]:

$$\sigma_R = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N\lambda^4} \frac{6+3\delta}{6-7\delta}, \quad (1.5)$$

где: n – показатель преломления воздуха; λ – длина волны; δ – фактор деполяризации молекул; N – число молекул в единице объёма.

С учётом рэлеевского рассеяния, функция пропускания $\eta_{scattering_R}$, рассчитывается на основе закона Бера и имеет ту же математическую форму, что и выражение (1.4), приведённое ранее. На рис. 1.6 демонстрируется коэффициент пропускания атмосферы, учитывающий совместное влияние поглощения и рэлеевского рассеяния. Расчёт выполнен с применением системы SPECTRA [37] для вертикальной трассы распространения сигнала: начальная высота - уровень моря ($h_0 = 0$ м), протяжённость трассы $L = 500$ км, угол места $\varphi = 90^\circ$ (зенит). В качестве атмосферной модели использована летняя версия стандарта USA для средних географических широт.

Из рис. 1.6 видно, что рэлеевское рассеяние коротковолнового излучения (до 1000 нм) происходит существенно более интенсивно, чем длинноволновое, что подтверждается выражением (1.5), поскольку коэффициент молекулярного рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны.

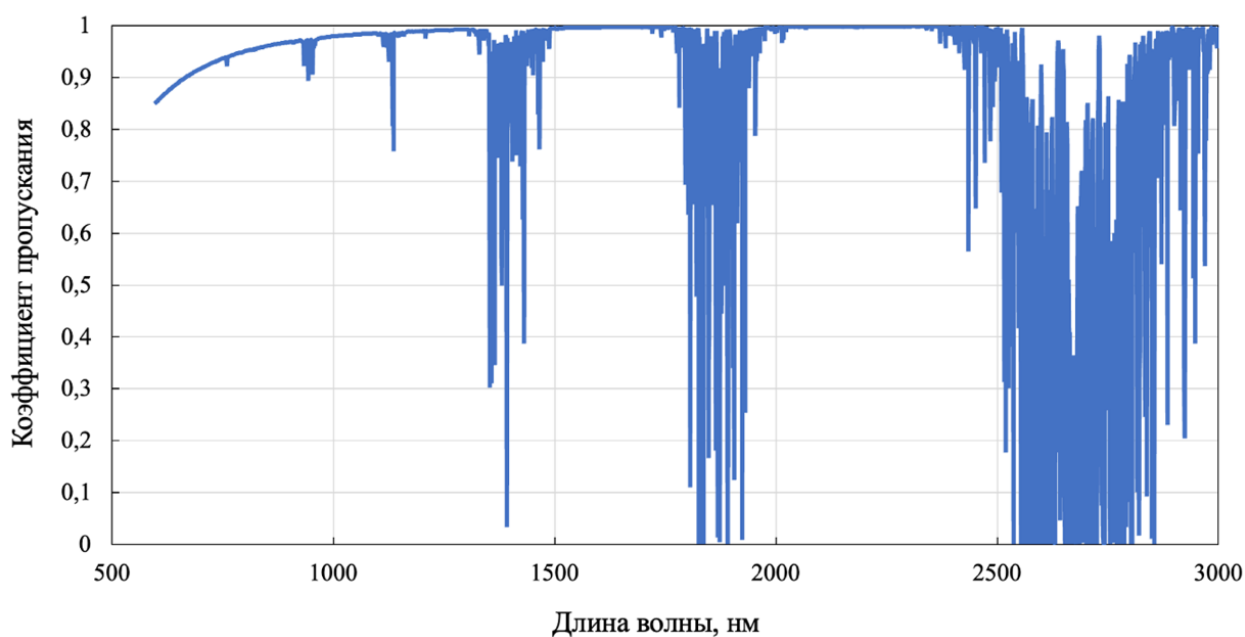


Рисунок 1.6 – Коэффициент пропускания атмосферы, с учетом поглощения и рэлеевского рассеяния, в зависимости от длины волны

1.3.2. Ми рассеяние

Для количественной оценки ослабления, вызванного рассеянием Ми, требуется информация о микроструктуре аэрозолей, в частности, размерном распределении частиц и их влагосодержания, особенно в условиях тумана. Однако на практике такие данные зачастую отсутствуют в точках развёртывания систем ОССП, что затрудняет моделирование [45].

Это обстоятельство обусловило широкое применение эмпирических моделей, построенных на основе статистического анализа натурных измерений [46, 47]. В качестве ключевого параметра в таких моделях используются данные о «видимости». Соответствие диапазонов «видимости» и погодных условий представлены в табл. 1.1 [48].

Понятие «видимость» в контексте оценки потерь оптического излучения на аэрозольных частицах обычно ассоциирует с метеорологической дальностью видимости (МДВ) [49, 50].

Таблица 1.1 – Соответствие диапазонов «видимости» и погодных условий

Погодные условия	«Видимость», км
Густой туман	0,05-0,2
Умеренный туман	0,2-0,5
Легкий туман	0,5-2
Дымка	2-4
Легкая дымка	4-10
Ясно	10-50

Параметр МДВ характеризуется случайными колебаниями, обусловленными временными, географическими и погодными факторами, такими как туман, дымка, осадки, снег и другие атмосферные явления. Вместе с тем, при размещении систем ОССП в конкретной местности, анализ статистических данных МДВ за определённый период (например, с использованием информации с ближайшей метеостанции) позволяет выявить закономерности и установить характер изменений этого параметра в зависимости от условий окружающей среды.

Так, к примеру, обработанная статистика МДВ [51] в период с 2013 по 2023 год с Международного аэропорта Шереметьево (Россия, Московская область) [52], в зависимости от месяца в году и времени суток, представлена на рис. 1.7.

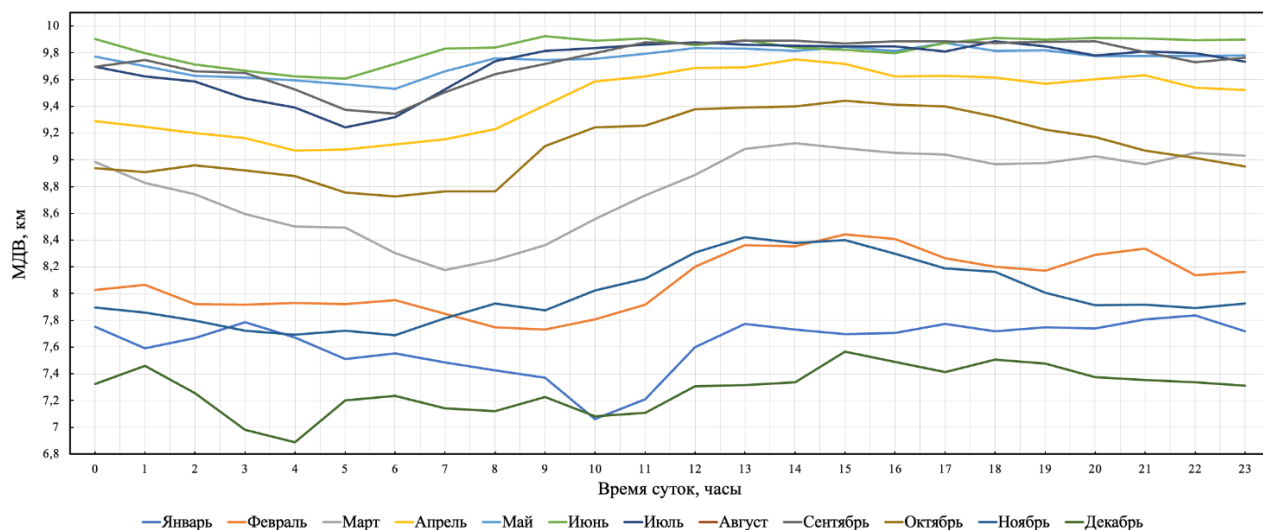


Рисунок 1.7 – МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток

Исходя из рис. 1.7 видно, что для конкретного исследуемого региона МДВ снижается в зимний период (ноябрь, декабрь, январь, февраль) в районе 9-11 часов

утра, снижается в летний период (май, июнь, июль, август) в районе 4 - 6 часов ночи, в летний период имеет большие значения, чем в зимние.

Применение обобщённых эмпирических моделей, построенных на основе статистических данных о метеорологической дальности видимости, позволяет оценить коэффициент рассеяния M_i . В частности, в рамках модели, предложенной Крузе [53], коэффициент рассеяния σ_{Mi} выражается аналитически через параметр МДВ и определяется формулой (1.6).

$$\sigma_{Mi} = \frac{3,91}{MDV} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q}, \quad (1.6)$$

где: MDV – МДВ; λ – длина волны; $\lambda_0 = 550$ нм – опорная длина волны; q – коэффициент, зависящий от размеров рассеивающих частиц. Он определен на основании данных экспериментов и имеет значения:

$$q = \begin{cases} 1,6 & , MDV > 50 \text{ км} \\ 1,3 & , 6 \text{ км} < MDV < 50 \text{ км} \\ 0,585 MDV^{1/3} & , MDV < 6 \text{ км} \end{cases}$$

Также коэффициент q , в соответствии с теорией Кима, может рассчитываться с учетом низкой «видимости» (менее 500 метров) как показано в [54].

Функция пропускания $\eta_{scattering_{MI}}$, с учетом МИ рассеяния, основываясь на законе Бера, определяется аналогично по приведенной ранее формуле (1.4).

На рис. 1.8 демонстрируется коэффициент пропускания атмосферы, учитывающий совместное влияние поглощения и МИ рассеяния. Расчёт выполнен с применением системы SPECTRA [37] для вертикальной трассы распространения сигнала: начальная высота - уровень моря ($h_0 = 0$ м), протяжённость трассы $L = 500$ км, угол места $\varphi = 90^\circ$ (зенит). В качестве атмосферной модели использована летняя версия стандарта USA для средних географических широт.

Из рис. 1.8 видно, что длина волны 1550 нм более устойчива с точки зрения затухания линии к туману, чем 850 нм, однако, уже при $MDV = 5$ км, затухание, обусловленное МИ рассеянием, может быть критично для систем ОССП. Для преодоления условий ограничения видимости предпочтительными являются более длинные волны до 2,05 мкм [55] и более [56].

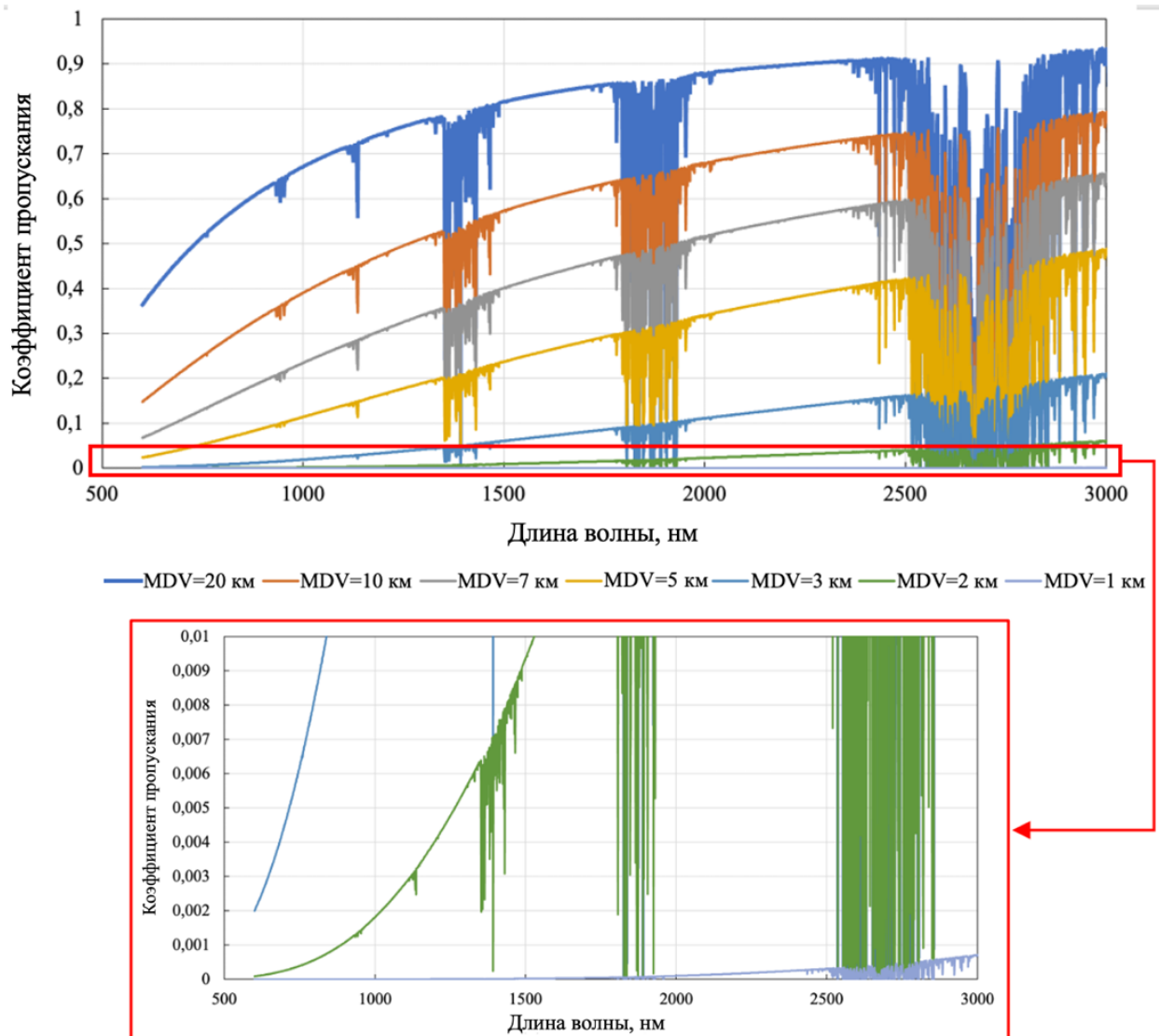


Рисунок 1.8 – Коэффициент пропускания атмосферы при поглощении и МИ рассеянии, в зависимости от длины волны и различных параметрах MDV

1.4. Атмосферная турбулентность

Колебания температуры, давления и влажности в атмосфере приводят к неоднородностям её физических параметров, что, в свою очередь, вызывает локальные изменения показателя преломления вдоль траектории распространения оптического излучения [3, 23]. В результате формируется иерархия турбулентных

структур, вихревых ячеек различных масштабов, каждая из которых характеризуется собственным значением показателя преломления.

Такие структуры действуют подобно совокупности оптических линз, вызывая искривление пути луча и приводя к явлению интерференции - как конструктивной, так и деструктивной - на приёмной стороне [45].

Физическое описание возникающих при этом геометрических искажений траектории луча может быть основано на применении модели турбулентности Колмогорова, которая широко используется для анализа случайных флуктуаций в атмосфере [4, 57] в терминах турбулентных ячеек большого (L_0) и малого (l_0) масштабов.

Характер влияния атмосферной турбулентности на распространение оптического излучения определяется соотношением между масштабами турбулентных вихрей в атмосфере и диаметром пучка, излучаемого передатчиком. При взаимодействии светового луча с мелкомасштабными турбулентными структурами (внутренняя турбулентность) наблюдается эффект сцинтилляции - неравномерное распределение интенсивности сигнала на приёмной стороне, проявляющееся в виде случайно изменяющихся световых пятен (рис. 1.9). Эти флуктуации амплитуды оптического сигнала являются основной причиной турбулентного затухания в канале связи [58]. С другой стороны, крупномасштабная (внешняя) турбулентность, формирующаяся на протяжённых участках трассы распространения, вызывает искажение траектории луча. В этом случае оптический пучок отклоняется от прямолинейного пути, его направление хаотически изменяется, что приводит к смещению положения пятна излучения относительно центра приёмной апертуры. Это явление называется блужданием луча и приводит к смещению его положения относительно приёмной апертуры [58].

Область, лежащая между двумя характерными масштабами (L_0 и l_0), называется инерционной областью или подобластью турбулентности. Эти характерные масштабы представляют собой размеры, на которых проявляются различные физические процессы в турбулентном потоке. Инерционная область

характеризуется тем, что в ней преобладают инерционные силы, и она играет ключевую роль в анализе и моделировании турбулентных потоков [5].

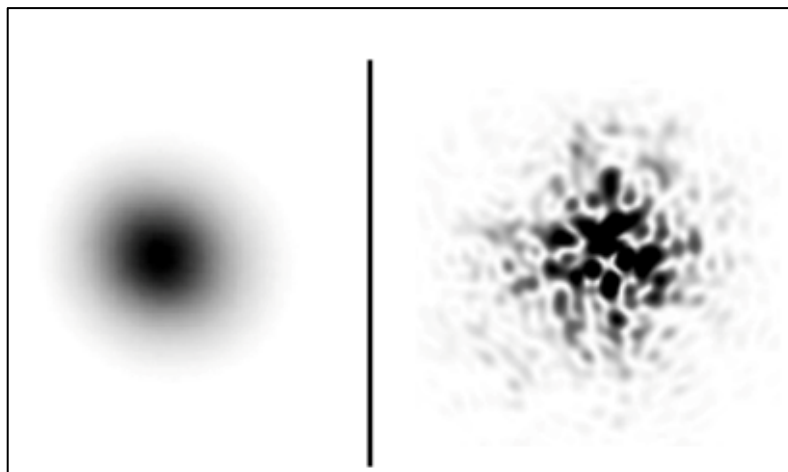


Рисунок 1.9 – Распространение лазерного луча через турбулентную атмосферу: сечение интенсивности передающего луча (слева), сечение интенсивности в плоскости приемника (справа)

Математическое описание эффекта турбулентности осуществляется с помощью статистических методов. Для статистически однородной среды структурная функция показателя преломления между двумя точками наблюдения (ρ_1 и ρ_2) в инерционном поддиапазоне $D_n(\rho_1, \rho_2) = \langle |n\rho_1 - n\rho_2|^2 \rangle$ характеризует флуктуацию показателя преломления $n(\rho)$, где $\langle \cdot \rangle$ – обозначение среднего статистического значения [23].

Гипотеза Колмогорова утверждает, что в пределах инерционного поддиапазона $l_0 < \rho < L_0$ точки обладают статистической однородностью и изотропностью. Следовательно, структурная функция показателя преломления зависит только от расстояния между точками $\rho = \rho_2 - \rho_1$, тогда $D_n(\rho_1, \rho_2) = D_n(\rho)$ [23].

В соответствии с теорией Колмогорова, структурная функция показателя преломления в инерционном интервале определяется как $D_n(\rho) = C_n^2(h)\rho^{2/3}$

Тогда спектр Колмогорова, с учетом того, что внутренний масштаб (l_0) равен нулю, а внешний масштаб (L_0) равен бесконечности, определяется как (1.7) [23]:

$$\Phi_n(\kappa) = 0,0033C_n^2(h)\kappa^{-\frac{11}{3}}, \quad (1.7)$$

где: C_n^2 – структурная постоянная показателя преломления атмосферы, необходимая для количественного определения сущности турбулентности, т.е. для измерения уровня изменения показателя преломления в атмосфере [59]; k – пространственная частотная координата.

Существует более общая форма (1.7) - модифицированный спектр фон Кармана [58], учитывающий внутренние и внешние масштабы турбулентности.

1.4.1. Высотные зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы

Структурная постоянная показателя преломления турбулентной атмосферы играет важную роль для систем ОССП, поскольку трассой распространения излучения является атмосфера. Параметры таких систем и технические требования, предъявляемые к их компонентам, напрямую определяются уровнем интенсивности и характером распределения турбулентных возмущений вдоль траектории распространения оптического излучения. В связи с этим проектирование систем осуществляется с учётом специфических турбулентных условий атмосферы, присущих конкретной местности, где предполагается их эксплуатация [60].

Для горизонтальной атмосферной связи значение структурной постоянной показателя преломления C_n^2 постоянно. Численные значения C_n^2 разделяют для трех видов турбулентности [61]: при слабой $C_n^2 = 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$; при умеренной $C_n^2 = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$; при сильной $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. Также, при проектировании систем ОССП необходимо учитывать динамику температуры у приземного слоя в течение дня, а именно, что турбулентность будет сильнее около полудня. И наоборот, на закате и рассвете из-за формы теплового равновесия вдоль вертикального профиля атмосферы C_n^2 будет иметь более низкие значения [62-63].

В спутниковых системах оптической связи в свободном пространстве, где трасса распространения сигнала имеет вертикальную ориентацию, параметр структурной функции показателя преломления C_n^2 демонстрирует существенную зависимость от высоты. В связи с этим для корректного моделирования канала связи необходимо учитывать изменение C_n^2 по всей протяжённости пути (от высоты приёмной аппаратуры над уровнем моря до верхних слоёв атмосферы) [5].

На сегодняшний день разработано значительное число эмпирических моделей, описывающих высотной профиль $C_n^2(h)$. Обзор и сравнение таких моделей представлены в работах [5, 63, 64]. Их формирование основано на обширных экспериментальных данных, полученных в различных географических регионах и при разных метеорологических условиях, включая время суток, скорость ветра, тип подстилающей поверхности и другие факторы [64, 65].

Модели, описывающие вертикальный профиль структурной постоянной показателя преломления в турбулентной атмосфере, принято разделять на два основных класса: параметрические и непараметрические. Параметрические модели строятся на основе набора входных данных, таких как температура, влажность, скорость ветра и другие метеорологические и геофизические характеристики. Их ключевое преимущество - универсальность, позволяющая применять их в различных климатических зонах и условиях. Непараметрические же модели разрабатываются исключительно на основе измерений, выполненных в конкретной локации, и наиболее точны при использовании в схожих географических и атмосферных условиях.

Среди наиболее известных непараметрических моделей выделяют:

- феноменологическую модель Гурвича и Грачевой [66]. Данная модель была уточнена, благодаря получению большого количества экспериментальных данных. Она описывает профиль $C_n^2(h)$ с использованием различных аналитических выражений, соответствующих разным режимам атмосферной турбулентности: «слабому», «среднему» и «сильному»;

– модель Гринвуда [67] широко применяется для описания турбулентных характеристик атмосферы в горных районах. Её часто называют «ночной моделью», поскольку она основана на данных, собранных в течение трёх ночей с помощью оптической станции AMOS, расположенной на вершине вулкана Халеакала (высота 3052 м над уровнем моря) на острове Мауи (Гавайи);

– модель «Submarine Laser Communications Day» [63]. Эмпирическая модель, была разработана на основе усредненных данных, собранных в окрестностях обсерватории AMOS. Эта модель была создана путем объединения экспериментальных данных, полученных из измерений сцинтилляций, акустических зондов, самолетов и других источников. Однако она применима только в субтропических широтах;

– модель AFGL AMOS [62] представляет собой эмпирическую модель, построенную на основе усреднённых измерений, выполненных с помощью радиозондов, поднимавшихся на аэростатах в атмосферу вблизи оптической обсерватории AMOS. Она охватывает широкий диапазон метеорологических условий и активно используется для описания ночных режимов турбулентности, поэтому часто классифицируется как «ночная модель»;

– модель H-V Night [68]. Основана на данных экспериментов, проведенных оптической станцией, расположенной на острове Мауи. Как и предыдущие модели, она ориентирована на ночные условия и адаптирована для применения в субтропических регионах, что делает её полезной при анализе атмосферных характеристик в зонах с соответствующим климатом.

Среди всех параметрических моделей самой популярной [5, 45, 46] является модель Хафнагеля-Валли (Hufnagel-Valley, HV) [69]. Это обусловлено тем, что она является параметрической и позволяет учитывать степень турбулентности и скорость ветра в приземном слое.

Модель Хафнагеля-Валли описывается выражением [5, 69] (1.8).

$$C_n^2(h) = C_n^2(0)\exp(-h/100) + 5,94 \cdot 10^{-53}(v/27)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2,7 \cdot 10^{-16} \exp(-h/1500), \quad (1.8)$$

где: h – высота над уровнем моря в метрах; $C_n^2(0)$ – номинальное значение оптической турбулентности у поверхности Земли; v – псевдоскорость ветра, которая определяется как $v = \left[\frac{1}{15 \cdot 10^3} \int_{5 \cdot 10^3}^{20 \cdot 10^3} V_n^2(h) dh \right]^{1/2}$, где $V_n(h)$ – описывается моделью скорости ветра Бафтона [67]:

$$V_n^2(h) = v_g + 30 \exp \left(- \left[\frac{(h-9400)}{8400} \right]^2 \right),$$

где v_g – скорость ветра у земной поверхности.

В общем случае модель скорости ветра, при условии её представления в виде суммы постоянной составляющей, характерной для нижних слоёв атмосферы, и случайной компоненты, подчиняющейся нормальному (гауссову) распределению, в рамках модели Гринвуда описывается следующим образом:

$$V_{wind}^2(h) = \left[v_g + v_T \exp \left\{ - \left(\frac{h \sin(\xi) - H_T}{L_T} \right)^2 \right\} \right]^2,$$

где: h – высота в метрах; v_g – скорость ветра у земной поверхности; v_T – скорость ветра в тропопаузе; ξ – зенитный угол; H_T – высота тропопаузы; L_T – толщина тропопаузы.

Данные, использованные для построения модели скорости ветра Бафтона, были собраны в течение 20 лет на островах Кауаи и Хило (Гавайские острова), где высота тропопаузы составляет около 9400 м. В связи с этим модель Хафнагеля–Валли демонстрирует более точное соответствие экспериментальным данным, характерным для средних географических широт, предполагая более низкое положение тропопаузы [70]. Кроме того, эта модель показывает наилучшие результаты при описании скорости ветра на высотах от 3 до 24 км [63].

На рис. 1.10 показано изменение структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы ($C_n^2(h)$) от высоты (h) для модели Хафнагеля–Валли (1.8) с учетом различных значений $C_n^2(0)$ и v_g .

Исходя из рис. 1.10 видно, что значения параметра $C_n^2(h)$ у поверхности Земли выше, чем на больших высотах из-за более высокого состояния турбулентности по сравнению с большими высотами. Так, если номинальное значение оптической турбулентности у поверхности Земли выше, к примеру, днем,

то значение $C_n^2(h)$ тоже будет выше, примерно до 1000 м. Влияние скорости ветра в приземном слое вносит свой вклад только примерно от 3000 м, так, чем больше значение v_g , тем больше будет значение турбулентности после указанной отметки.

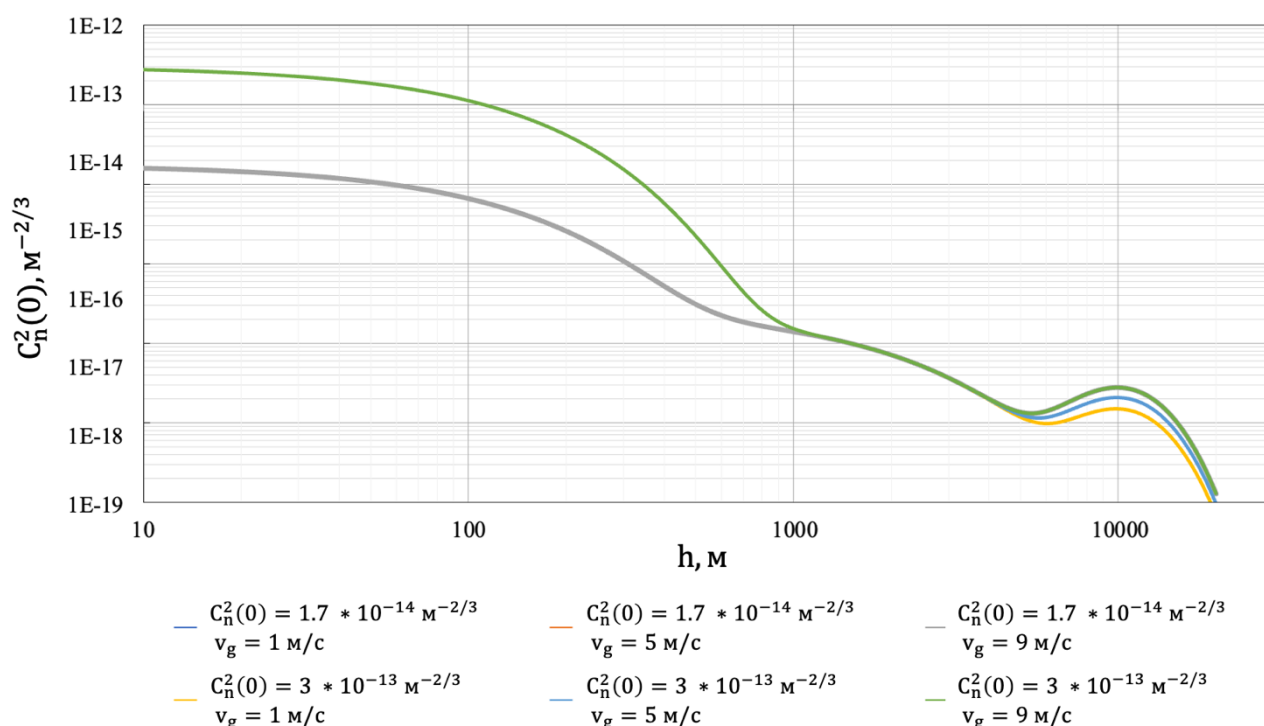


Рисунок 1.10 – Изменение структурной характеристики показателя преломления от высоты для модели Хафнагеля-Валли

Таким образом, меньшие значения номинального параметра оптической турбулентности и скорости ветра у поверхности Земли гарантируют меньшее влияние турбулентности на распространяющееся оптическое излучение сквозь атмосферу согласно [69].

1.4.2. Сцинтилляция

Сцинтилляция возникает вследствие быстрых и локальных флуктуаций показателя преломления атмосферы, через которую проходит оптический сигнал. Эти неоднородности вызывают случайные изменения как фазы, так и амплитуды

волны, что проявляется в виде резких, непредсказуемых колебаний интенсивности излучения на приёмной стороне [23, 24].

В случае, когда размер лазерного пучка сравним с масштабами турбулентных образований в атмосфере, такие вихревые структуры начинают влиять на распространение луча подобно малым оптическим элементам - они могут фокусировать или рассеивать свет. В результате происходит перераспределение энергии по фронту волны, что приводит к неоднородностям освещённости в плоскости приёмника. Эти явления известны как сцинтилляции, или атмосферные колебания интенсивности сигнала [71].

Несмотря на то, что усреднённая мощность передаваемого излучения при этом остаётся неизменной, мгновенные значения интенсивности подвержены значительным временным вариациям.

Индекс сцинтилляции (индекс мерцания) (scintillation index, SI) является количественной мерой для оценки величины сцинтилляции и определяется, как (1.9) [4, 72, 73]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \quad (1.9)$$

где I – интенсивность оптической волны, а $\langle \quad \rangle$ обозначает среднее по ансамблю, эквивалентное долговременному усреднению, если предполагается, что процесс является эргодическим.

Сцинтилляции количественно определяются через индекс сцинтилляции или индекс мерцания, который пропорционален дисперсии Рытова, определяемой как [4, 24, 74] (1.10):

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (1.10)$$

где: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; C_n^2 – структурная постоянная показателя преломления; L – расстояние между излучателем и приемником.

Исходя из численных значений σ_R^2 , выделяют следующие режимы флуктуаций, обусловленные атмосферной турбулентностью: слабый при $\sigma_R^2 < 1$; сильный при $\sigma_R^2 > 1$; насыщение соответствует асимптотическому пределу $\sigma_R^2 \rightarrow \infty$.

Выражение (1.10) справедливо в предположении, что параметр C_n^2 остаётся постоянным вдоль трассы, что соответствует условиям распространения сигнала по горизонтальным участкам. Однако при рассмотрении вертикальных каналов связи, как нисходящих («спутник-Земля»), так и восходящих («Земля-спутник»), необходимо учитывать зависимость C_n^2 от высоты, то есть использовать высотные профили $C_n^2(h)$.

Для восходящего канала основные турбулентные возмущения сосредоточены в приземном слое вблизи передатчика, где оптический пучок ещё имеет небольшой диаметр. В этом случае фронт волны можно считать сферическим. В нисходящем канале, напротив, значительное влияние турбулентности проявляется вблизи приёмной станции, а к моменту достижения поверхности Земли фронт волны становится близким к плоскому. С учётом этих различий, в работах [4, 45] приведены выражения для расчётного значения σ_R^2 , соответствующие восходящему и нисходящему каналам, которые определяются формулами (1.11) и (1.12):

$$\sigma_{R_{downlink}}^2 = 2,25k^{\frac{7}{6}}(H - h_0)^{\frac{5}{6}}((\sec(\xi))^{\frac{11}{6}} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(\frac{h-h_0}{H-h_0}\right)^{\frac{5}{6}} dh, \quad (1.11)$$

$$\sigma_{R_{uplink}}^2 = 2,25k^{\frac{7}{6}}(H - h_0)^{\frac{5}{6}}((\sec(\xi))^{\frac{11}{6}} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(1 - \frac{h-h_0}{H-h_0}\right)^{\frac{5}{6}} \left(\frac{h-h_0}{H-h_0}\right)^{\frac{5}{6}} dh, \quad (1.12)$$

с учетом того, что $L = (H - h_0)\sec(\xi)$ – расстояния до спутника, где: h_0 – высота передающего терминала ОССП над уровнем моря; $\xi = 90 - \varphi$ – зенитный угол, а φ – угол места; H – расстояние до спутника при $\varphi = 90^\circ$ (зенит).

В исследовании [75], опираясь на классическую теорию Рытова, были получены аналитические выражения для SI гауссова пучка, применимые как в условиях слабой, так и в режиме сильной турбулентности.

В работе [4] воздействие атмосферной турбулентности на оптическое излучение формализуется через два независимых физических механизма: мелкомасштабные турбулентные структуры интерпретируются как дифракционные неоднородности, тогда как крупномасштабные вихри

рассматриваются в качестве рефракционных неоднородностей. Соответственно, нормированная интенсивность излучения моделируется как произведение двух статистически независимых случайных величин, что аналитически выражается формулой (1.13).

$$\hat{I} = \frac{I}{\langle I \rangle} = XY, \quad (1.13)$$

где X и Y – интенсивности, обусловленные крупномасштабными и мелкомасштабными турбулентными вихрями соответственно.

Интенсивность излучения (1.13) можно переписать с учетом того, что $I = A \exp(2\chi)$, где χ – логарифмическая амплитуда оптической волны. Когда χ имеет нормальное распределение, дисперсия логарифмической амплитуды связана с индексом мерцаний согласно выражению (1.14):

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1 = \exp(\sigma_{\ln(I)}^2) - 1, \quad (1.14)$$

где: σ_χ^2 – дисперсия интенсивности; $\sigma_{\ln(I)}^2$ – дисперсия логарифмической интенсивности, которая, в свою очередь, зависит от крупномасштабной ($\sigma_{\ln(X)}^2$) и мелкомасштабной ($\sigma_{\ln(Y)}^2$) логарифмических дисперсий соответствующих интенсивностей [76], в соответствии с выражением (1.15):

$$\sigma_{\ln(I)}^2 = 4\sigma_\chi^2 = \sigma_{\ln(X)}^2 + \sigma_{\ln(Y)}^2 \quad (1.15)$$

С учетом (1.15), SI может быть представлен выражением (1.16):

$$\sigma_I^2 = \exp(\sigma_{\ln(X)}^2 + \sigma_{\ln(Y)}^2) - 1 \quad (1.16)$$

Величины $\sigma_{\ln(X)}^2$ и $\sigma_{\ln(Y)}^2$, в зависимости от направления излучения (восходящее (uplink), когда оптическое излучение на приемнике соответствует модели плоской волной, или нисходящее (downlink), когда оптическое излучение на приемнике соответствует модели сферической волны), в соответствии с [4], определяются выражениями (1.17)–(1.20):

$$\sigma_{\ln(X)}^2_{downlink} = \frac{0,49\sigma_{Rdownlink}^2}{\left(1+1,11\sigma_{Rdownlink}^{12/5}\right)^{7/6}}, \quad (1.17)$$

$$\sigma_{\ln(Y)}^2_{downlink} = \frac{0,51\sigma_{Rdownlink}^2}{\left(1+0,69\sigma_{Rdownlink}^{12/5}\right)^{5/6}}, \quad (1.18)$$

$$\sigma_{\ln(X)_{uplink}}^2 = \frac{0,49\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,56\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{7/6}}, \quad (1.19)$$

$$\sigma_{\ln(Y)_{uplink}}^2 = \frac{0,51\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,69\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{5/6}}, \quad (1.20)$$

где $\sigma_{R_{uplink}}^2$ и $\sigma_{R_{downlink}}^2$ – соответствующие дисперсии Рытова для восходящего и нисходящего вертикальных каналов.

В соответствии с (1.17)–(1.20), SI для восходящего и нисходящего излучений определяется выражениями (1.21)–(1.22):

$$\sigma_{I_{uplink}}^2 = \exp\left(\frac{0,49\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,56\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{7/6}} + \frac{0,51\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,69\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{5/6}}\right) - 1 \quad (1.21)$$

$$\sigma_{I_{downlink}}^2 = \exp\left(\frac{0,49\sigma_{R_{downlink}}^2}{\left(1+1,11\sigma_{R_{downlink}}^{12/5}\right)^{7/6}} + \frac{0,51\sigma_{R_{downlink}}^2}{\left(1+0,69\sigma_{R_{downlink}}^{12/5}\right)^{5/6}}\right) - 1 \quad (1.22)$$

Модель канала при эффекте мерцания, обусловленного атмосферной турбулентностью.

В литературе было предложено множество статистических моделей для описания эффекта мерцания, сравнение которых представлены в [5, 61, 77-79]. Эти модели эффективны при определенных режимах турбулентности (от слабой до сильной). Так, логнормальная модель подходит для режима слабой турбулентности [80], гамма- гамма модель охватывает все режимы турбулентности [81], I-K распределение [4] и K-распределение [82], как и отрицательное экспоненциальное распределение [73], применимы для режима сильной турбулентности.

Наиболее распространенными являются логонормальное и гамма-гамма распределения [4], поскольку они многократно проверялись экспериментально [80, 83-87].

Функция плотности вероятности (probability density function, PDF) гамма-гамма распределения определяется следующим образом [79]:

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} B_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad I > 0,$$

где: α и β представляют собой эффективное количество крупно- и мелко масштабных ячеек турбулентности; $B_n(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя 2-го рода порядка n ; $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Эффективное количество ячеек турбулентности α и β определяются, как обратные величины σ_X^2 и σ_Y^2 соответственно (1.23)–(1.24) [4]:

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_X^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln(X)}^2) - 1}, \quad (1.23)$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma_Y^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln(Y)}^2) - 1}, \quad (1.24)$$

где $\sigma_{\ln(X)}^2$ и $\sigma_{\ln(Y)}^2$ – крупномасштабная и мелкомасштабная логарифмические дисперсии соответствующих интенсивностей, определяемые, в зависимости от направления излучения, выражениями (1.17)–(1.20).

Таким образом, параметры α и β определяются в соответствии с (1.25)–(1.28):

$$\alpha_{downlink} = \left(\exp \left(\frac{0,49\sigma_{R_{downlink}}^2}{(1+1,11\sigma_{R_{downlink}}^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.25)$$

$$\beta_{downlink} = \left(\exp \left(\frac{0,51\sigma_{R_{downlink}}^2}{(1+0,69\sigma_{R_{downlink}}^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.26)$$

$$\alpha_{uplink} = \left(\exp \left(\frac{0,49\sigma_{R_{uplink}}^2}{(1+0,56\sigma_{R_{uplink}}^{12/5})^{7/6}} \right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.27)$$

$$\beta_{uplink} = \left(\exp \left(\frac{0,51\sigma_{R_{uplink}}^2}{(1+0,69\sigma_{R_{uplink}}^{12/5})^{5/6}} \right) - 1 \right)^{-1} \quad (1.28)$$

Тогда SI для восходящего и нисходящего вертикальных каналов, при использовании гамма-гамма модели, определяется как (1.29)–(1.30):

$$\sigma_{I_{downlink}}^2 = \frac{1}{\alpha_{downlink}} + \frac{1}{\beta_{downlink}} + \frac{1}{\alpha_{downlink}\beta_{downlink}} \quad (1.29)$$

$$\sigma_{I_{uplink}}^2 = \frac{1}{\alpha_{uplink}} + \frac{1}{\beta_{uplink}} + \frac{1}{\alpha_{uplink}\beta_{uplink}} \quad (1.30)$$

Согласно [2, 24, 74, 88, 89], потери, обусловленные эффектом сцинтилляции вследствие атмосферной турбулентности, количественно определяются выражением (1.31):

$$\eta_{link|sci} = 4,343 * (\text{erf}^{-1}(2p_{thr} - 1)(2 \ln(\sigma_I^2 + 1))^{1/2} - 0,5 \ln(\sigma_I^2 + 1)), \quad (1.31)$$

где: σ_I^2 – индекс сцинтилляции; p_{thr} – вероятность того, что мощность на приемнике упадет ниже пороговой (минимальной принимаемой).

Коэффициент пропускания из-за эффекта сцинтилляции определяется, как $\eta_{sci} = 10^{\frac{\eta_{link|sci}}{10}}$.

Полученные выше соотношения позволяют перейти к комплексной количественной оценке влияния на потери, обусловленные эффектом сцинтилляции (мерцания), вызванные атмосферной турбулентностью, при использовании высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы Хафнагеля-Валли и гамма-гамма модели канала различных параметров. Полученные в ходе моделирования зависимости представлены на рис. 1.11–1.12. Выбор при моделировании $\lambda = 850, 1310, 1550$ нм связан с наименьшим поглощением на этих длинах волн, и соответствием окнам прозрачности, полученным при моделировании соответствующего процесса (рис. 1.5).

Исходя из рис. 1.11–1.12 видно, что потери, обусловленные эффектом сцинтилляции, принимают различные численные значения, в зависимости от следующих параметров: рабочей длины волны λ , направления излучения, номинального значения оптической турбулентности у поверхности Земли $C_n^2(0)$, угла места φ , однако:

1. Более длинные волны обеспечивают меньшие потери, обусловленные эффектом сцинтилляции, так потери при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$), в случае восходящей линии и $\lambda = 850$ нм, численно составили 5,4 дБ, когда при $\lambda = 1550$ нм и прочих равных условиях 3,45 дБ (рис. 1.11);

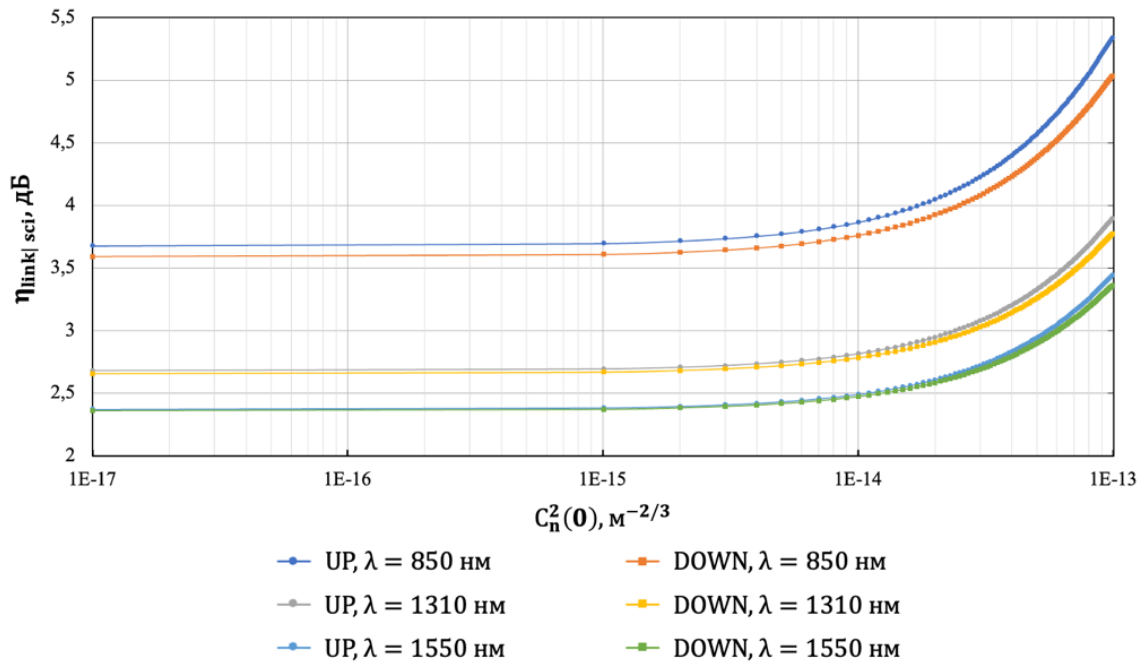


Рисунок 1.11 – Зависимости потерь, обусловленных эффектом сцинтилляции (мерцания), в зависимости от номинального значения оптической турбулентности у поверхности Земли, рабочей длины волны и направления излучения, при высоте орбиты спутника $H = 500 \text{ км}$ и угле места $\varphi = 45^\circ$

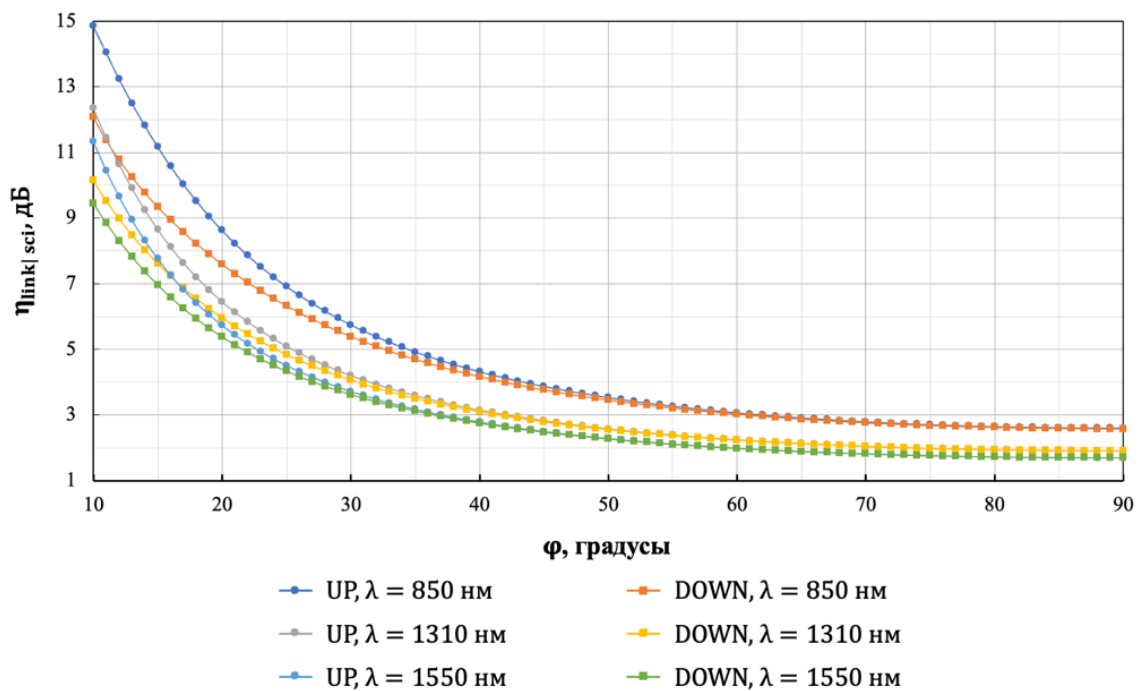


Рисунок 1.12 – Зависимости потерь, обусловленных эффектом сцинтилляции, в зависимости от угла места, рабочей длины волны и направления излучения, при высоте орбиты спутника $H = 500 \text{ км}$ и номинальном значении оптической турбулентности у поверхности Земли $C_n^2(0) = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$

2. Потери, обусловленные эффектом сцинтилляции при восходящей линии больше, чем при нисходящей, при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$), в случае восходящей линии и $\lambda = 850 \text{ нм}$, численно составили 5,34 дБ, когда при нисходящей и прочих равных условиях 5 дБ (рис. 1.11);

3. Потери, обусловленные эффектом сцинтилляции, сильно возрастают при увеличении турбулентности в приземном слое от умеренной до сильной, так потери при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$), в случае восходящей линии и $\lambda = 850 \text{ нм}$, численно составили 5,34 дБ, когда при умеренной ($C_n^2(0) = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$) и прочих равных условиях 3,86 дБ, с учетом того, что при слабой ($C_n^2(0) = 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$), составляли 3,7 дБ (рис. 1.11);

4. Более высокие углы места обеспечивают меньшие потери, обусловленные эффектом сцинтилляции, потери при угле места $\varphi = 10^\circ$, в случае восходящей линии и $\lambda = 850 \text{ нм}$, численно составили 14,85 дБ, когда при $\varphi = 90^\circ$ и прочих равных условиях 2,59 дБ (рис. 1.12).

1.4.3. Блуждание луча

Блуждание луча - случайное отклонение траектории оптического пучка, возникающее при его прохождении через крупномасштабные турбулентные структуры атмосферы (L_0). Данный эффект проявляется в тех случаях, когда диаметр лазерного луча меньше размеров таких турбулентных образований [23, 90].

Для нисходящих каналов связи («спутник–Земля») влияние блуждания луча обычно незначительно. Это объясняется тем, что к моменту входа в атмосферу пучок уже сильно расширяется из-за дифракции, и его поперечный размер становится значительно больше масштабов крупных турбулентных вихрей. В таких условиях эффект отклонения луча оказывается слабо выраженным. Однако в

восходящих каналах («Земля–спутник»), когда передатчик расположен на поверхности, а турбулентный слой сосредоточен вблизи источника излучения, диаметр луча на начальном участке может быть меньше L_0 . В этом случае крупные турбулентные ячейки вызывают существенные искажения гауссова профиля интенсивности.

В результате центр пятна излучения, точка с максимальной освещённостью, иначе называемая «горячей точкой», случайным образом смещается по плоскости приёмника. Это приводит к уширению осевой части луча и к визуальному «сплющиванию» или «выравниванию» вершины интенсивности (рис. 1.13). На рисунке показан результирующий усреднённый профиль луча (сплошная линия), искажённый вследствие блуждания, по сравнению с классическим гауссовым распределением (пунктирная линия). Также изображён долгосрочный размер пятна (W_{LT}) - большой круг, охватывающий все возможные положения мгновенных пятен (серые круги), формируемых за длительное время.

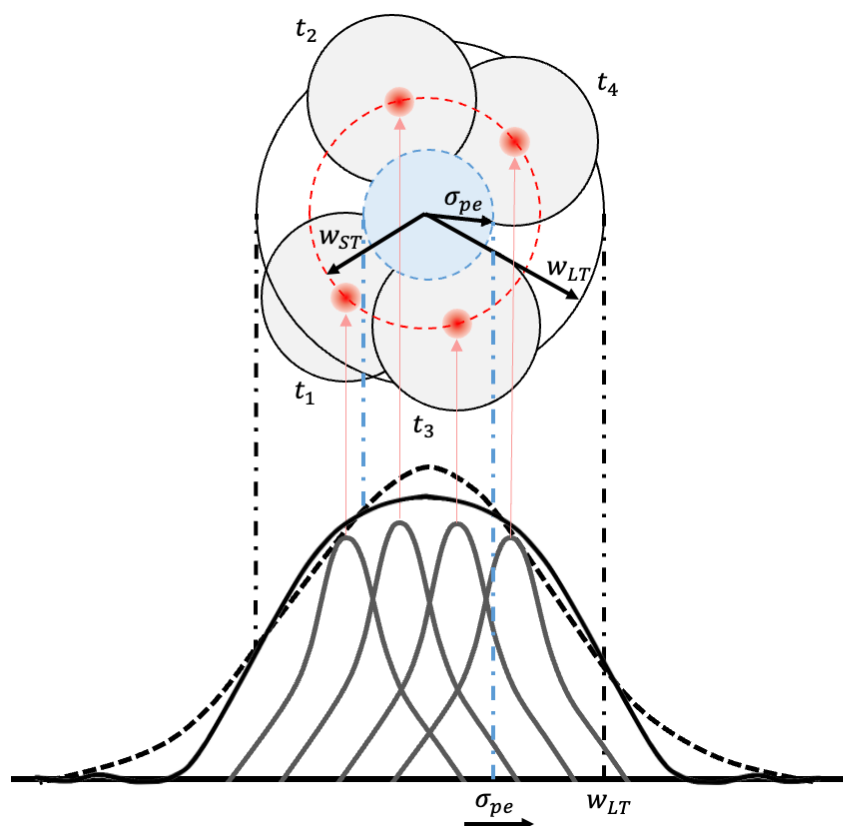


Рисунок 1.13 – Смещение оптического пучка, обусловленное эффектом блуждания луча

Эффект блуждания можно моделировать как результат случайных угловых отклонений луча в плоскости передатчика. Такие флуктуации направления вызывают хаотическое перемещение «горячей точки» на приёмнике, и в совокупности за длительный интервал времени формируют усреднённое световое пятно, известное как долгосрочный размер пятна (W_{LT}). Условно на рисунке изображено четыре положения «горячих точек», образующих кольцообразную структуру (красная пунктирная линия), однако в реальности их количество значительно больше и распределено непрерывно.

Таким образом, формирование долгосрочного пятна на приёмной апертуре представляет собой результат наложения множества мгновенных реализаций оптического пучка, поступающих в разные моменты времени. Его итоговый размер определяется совокупным влиянием трёх факторов: пространственного блуждания луча, дифракционного расширения в свободном пространстве и дополнительного искажения, вызванного мелкомасштабной турбулентностью, размеры ячеек которой меньше диаметра лазерного пучка [90].

Степень отклонения центра принятого сигнала от оси визирования количественно оценивается через среднеквадратичное смещение, обусловленное блужданием луча, обозначаемое как $\langle r_c^2 \rangle$. Для гауссова коллимированного пучка при условии бесконечно большого внешнего масштаба турбулентности данная величина может быть рассчитана с использованием выражения (1.32), приведённого в [90]:

$$\langle r_c^2 \rangle = 0,54(H - h_0)^2 (\sec(\xi))^2 \left(\frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (1.32)$$

где: ξ – зенитный угол; W_0 – радиус луча, формируемый передатчиком; H и h_0 – высота спутника и передатчика соответственно. Для наземного передатчика $h_0 = 0$; r_0 – диаметр когерентности атмосферы (параметр Фрида [91]).

В случае восходящего излучения, r_0 определяется, как (1.33) [5]:

$$r_{0_{uplink}} = \left(0,423k^2 \sec(\xi) \int_0^H C_n^2(h) \left(\frac{H-h}{H} \right)^{5/3} dh \right)^{-3/5} \quad (1.33)$$

Из (1.32) видно, что дисперсия блуждания луча включает в себя угол дифракции в свободном пространстве ($\lambda/(2W_0)$) и флуктуации фазы наклона, усредненные по апертуре передатчика $((2W_0)/r_0)^{5/3}$.

Эффект блуждания луча приведет к угловой ошибке наведения луча $\alpha_{pe} = \sigma_{pe}/L$, где σ_{pe} – дисперсия ошибки наведения (рис. 1.13, рис. 1.14) [4], определяемая, как (1.34):

$$\sigma_{pe}^2 = \langle r_c^2 \rangle \left[1 - \left(\frac{C_r^2 W_0^2 / r_0^2}{1 + C_r^2 W_0^2 / r_0^2} \right)^{1/6} \right], \quad (1.34)$$

где C_r – коэффициент масштабирования, находящийся в пределах $[1; 2\pi]$ [24], но, обычно, $C_r \sim 2\pi$ [4].

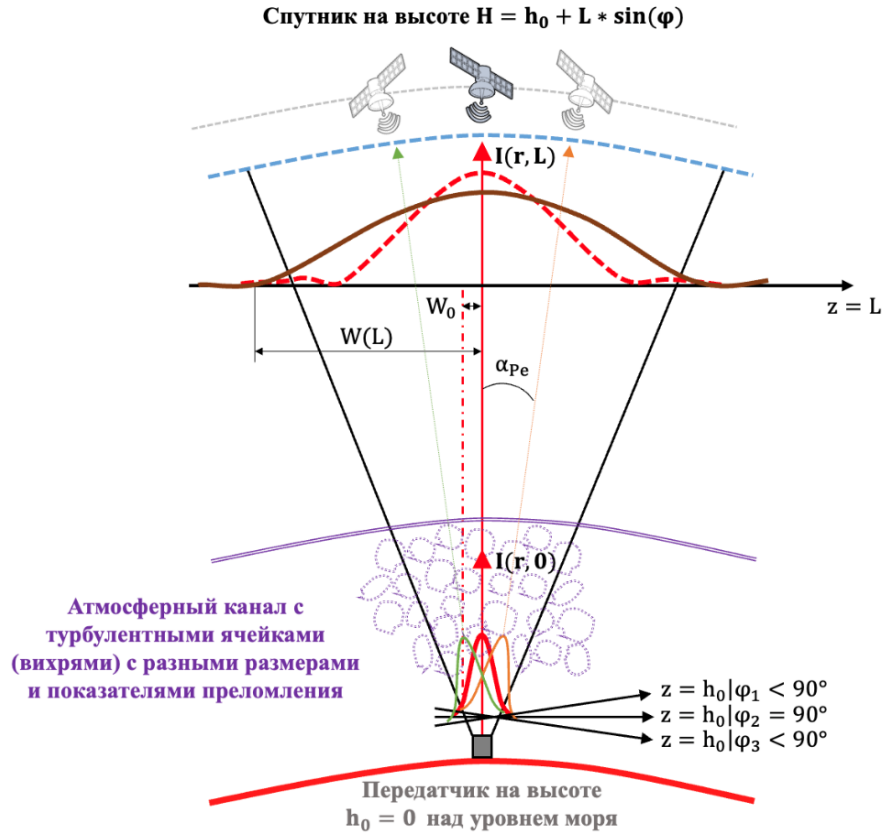


Рисунок 1.14 – Модель распространения излучения для восходящей линии связи

Согласно теории Рытова первого порядка, индекс сцинтилляции σ_I^2 выражается, как сумма продольной $\sigma_{I,l}^2(L)$ и радиальной $\sigma_{I,r}^2(r, L)$ компонент [92]. При рассмотрении эффекта блуждания луча следует учитывать увеличение $\sigma_{I,l}^2(L)$. Таким образом, в случае восходящего излучения индекс продольной сцинтилляции состоит из двух компонентов, а именно, сцинтилляции, вызванной эффектом

блуждания луча, и сцинтилляции, вызванной продольным смещением (из-за колебаний интенсивности луча, не подверженного эффекту блуждания луча), и выражается, как (1.35) [4, 93]:

$$\sigma_{I,l}^2(L) = 5,95(H - h_0)^2(\sec(\xi))^2 \left(\frac{2W_0}{r_0}\right)^{5/3} \left(\frac{\alpha_{pe}}{W}\right)^2 + \exp\left(\frac{0,49\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,56\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{7/6}} + \frac{0,51\sigma_{R_{uplink}}^2}{\left(1+0,69\sigma_{R_{uplink}}^{12/5}\right)^{5/6}}\right) - 1 \quad (1.35)$$

Согласно [24, 74], потери, обусловленные эффектом блуждания луча, вследствие атмосферной турбулентности, количественно определяются выражением (1.36):

$$\eta_{link|bw} \approx (3,3 - 5,77(-\ln(p_{thr}))^{1/2}) * (\sigma_{I,l}^2(L))^{0,4}, \quad (1.36)$$

Коэффициент пропускания из-за эффекта блуждания луча определяется выражением (1.37):

$$\eta_{bw} = 10^{\frac{\eta_{link|bw}}{10}} \quad (1.37)$$

Полученные выше соотношения позволяют перейти к комплексной количественной оценке влияния на потери, обусловленные эффектом блуждания луча, вызванные атмосферной турбулентностью, при использовании высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы Хафнагеля-Валли и гамма-гамма модели канала в случае восходящего излучения различных параметров. Полученные в ходе моделирования зависимости представлены на рис. 1.15–1.16. Выбор, при моделировании, $\lambda = 850, 1310, 1550$ нм, как и ранее, связан с наименьшим поглощением на этих длинах волн и соответствием окнам прозрачности, полученным при моделировании соответствующего процесса (рис. 1.5).

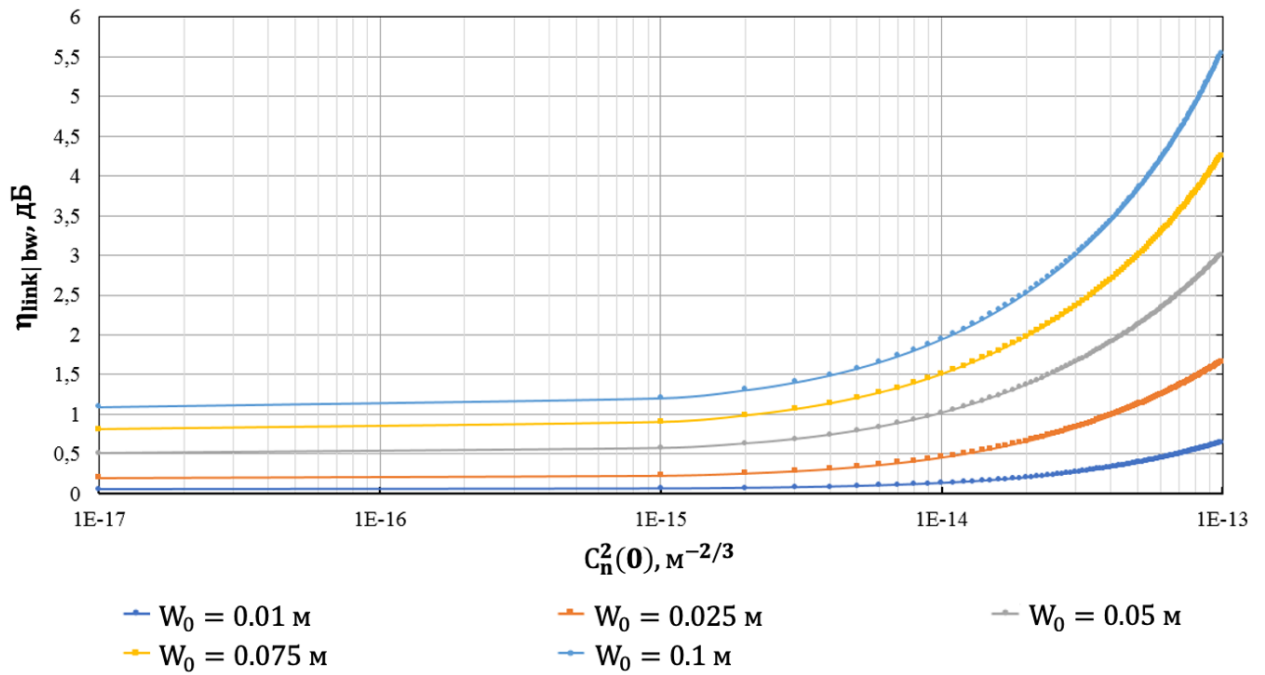


Рисунок 1.15 – Зависимости потерь, обусловленных эффектом блуждания луча, в зависимости от номинального значения оптической турбулентности у поверхности Земли и радиуса луча передатчика, при длине волны $\lambda = 1550$ нм, высоте орбиты спутника $H = 500$ и угле места $\varphi = 45^\circ$

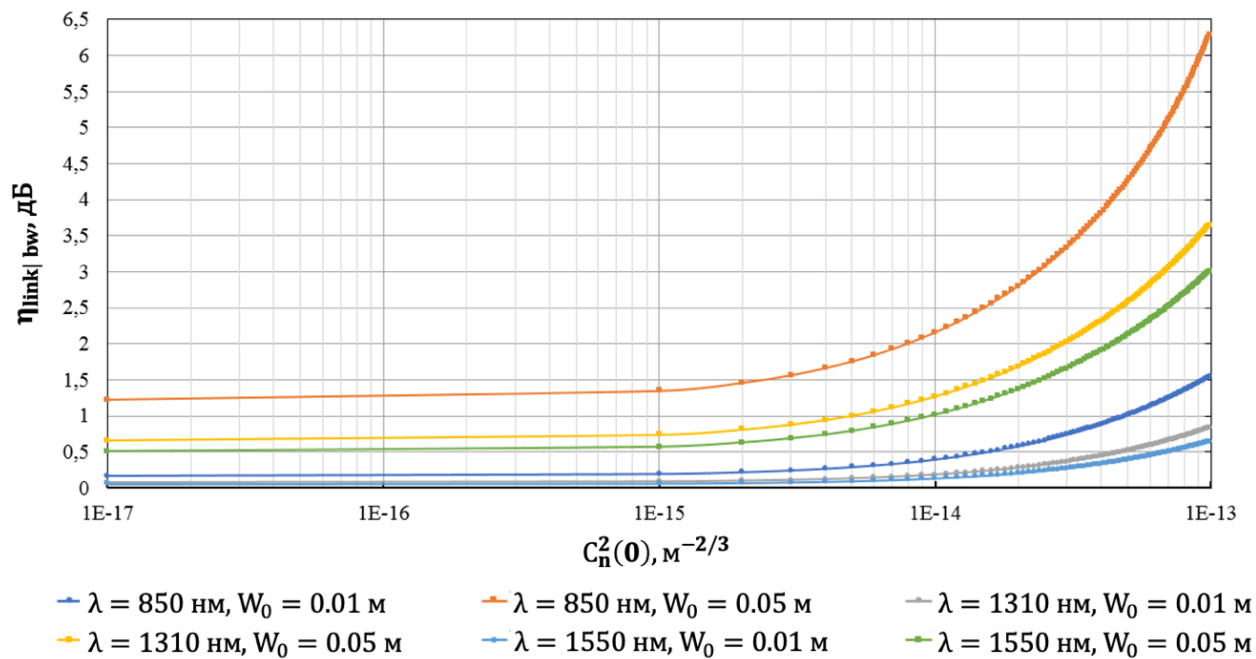


Рисунок 1.16 – Зависимости потерь, обусловленных эффектом блуждания луча, в зависимости от номинального значения оптической турбулентности у поверхности Земли, длины волны и радиуса луча передатчика, при высоте орбиты спутника $H = 500$ км и угле места $\varphi = 45^\circ$

Исходя из рис. 1.15–1.16, можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение радиуса луча передатчика приводит к большим потерям, обусловленным эффектом блуждания луча, так потери при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$) и $W_0 = 0,1 \text{ м}$ численно составили 5,5 дБ, когда при $W_0 = 0,01 \text{ м}$ и прочих равных условиях 0,6 дБ (рис. 1.15);
2. Более длинные волны обеспечивают меньшие потери, обусловленные эффектом блуждания луча, так потери при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$), $W_0 = 0,05 \text{ м}$ и $\lambda = 850 \text{ нм}$ численно составили 6,3 дБ, когда при $\lambda = 1550 \text{ нм}$ и прочих равных условиях 3 дБ (рис. 1.16);
3. Потери, обусловленные эффектом блуждания луча, сильно возрастают при увеличении турбулентности в приземном слое от умеренной до сильной, так потери при сильной турбулентности в приземном слое ($C_n^2(0) = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$) и $W_0 = 0,1 \text{ м}$ численно составили 5,5 дБ, когда при умеренной ($C_n^2(0) = 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$) и прочих равных условиях 1,9 дБ, с учетом того, что при слабой ($C_n^2(0) = 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$) составляли 1,1 дБ (рис. 1.15).

1.5. Атмосферная рефракция

Атмосферная рефракция – это искривление траектории луча в неоднородной атмосфере. Неоднородность атмосферы, как отмечалось ранее, обусловлена состоянием атмосферы, а именно, ее профилем, зависящим от изменения высоты, температуры и давления. Таким образом, изменение коэффициентов преломления слоев атмосферы приводит к отклонениям в прямолинейном распространении оптического излучения, а вследствие к смещению пучка на приемнике и изменению первоначального угла направления на спутник, из-за чего изменяется расстояние, пройденное лучом в толще атмосферы, что может повлечь за собой дополнительное затухание сигнала, а также уменьшить длительность «удержания»

спутника лазерным лучом, поэтому информационный обмен может не состояться или существенно сократиться (по времени).

Различают следующие виды рефракции: регулярная (нормальная) - обусловлена плавным изменением параметров атмосферы, а, вследствие, плавным изменением коэффициента преломления, зависящим главным образом от температуры и давления; случайная – обусловлена наличием турбулентных вихрей различных размеров, что, к примеру, может привести к явлению мерцания; аномальная – обусловлена достаточно длительным отклонением показателя преломления от его среднего значения.

Возможные отклонения лазерного луча от прямолинейного пути распространения под воздействием регулярной рефракции можно оценить, в случае попадания луча на границу раздела плоскопараллельных сред, в соответствии с законом Снеллиуса (1.38):

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi'_1, \quad (1.38)$$

где, в соответствии с рис. 1.17, n_1 и n_2 – показатели преломления сред, из которой луч падет на границу раздела и в которую попадает после раздела соответственно; φ_1 и φ'_1 – угол падения и отражения соответственно.

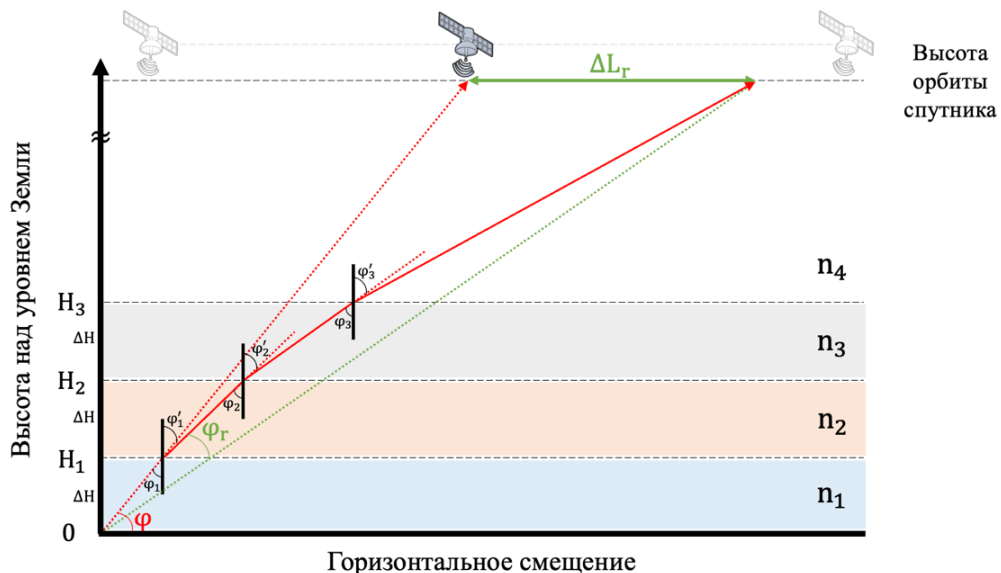


Рисунок 1.17 – Распространение излучения от источника, находящегося на Земле, в случае плоскопараллельных сред (φ – угол места, φ_r – угол рефракции, ΔL_r – смещение пучка на приемнике, φ_z – углы падения между z и $z + 1$ слоями, φ'_z – углы отражения между z и $z + 1$ слоями)

На рис. 1.17 изображено распространение излучения от источника, находящегося на Земле, в случае плоскопараллельных сред, разбиение атмосферы на три слоя с шагом ΔH проиллюстрировано условно, в действительности, слои должны быть достаточно тонкие, настолько, чтобы можно было считать их однородными с постоянным показателем преломления.

Показатель преломления n , в соответствии с [94], определяется по полуэмпирической формуле (1.39):

$$n(h) = 1 + \left[\frac{77,6(1+7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2})P(h)}{T(h)} \cdot 10^{-6} \right], \quad (1.39)$$

где: λ – рабочая длина волны; $P(h)$ – давление на высоте h ; $T(h)$ – температура на высоте h .

Однако, выражения (1.38) применимо только в случае плоскопараллельных сред, реальная же атмосфера сферична, как это показано на рис. 1.18.

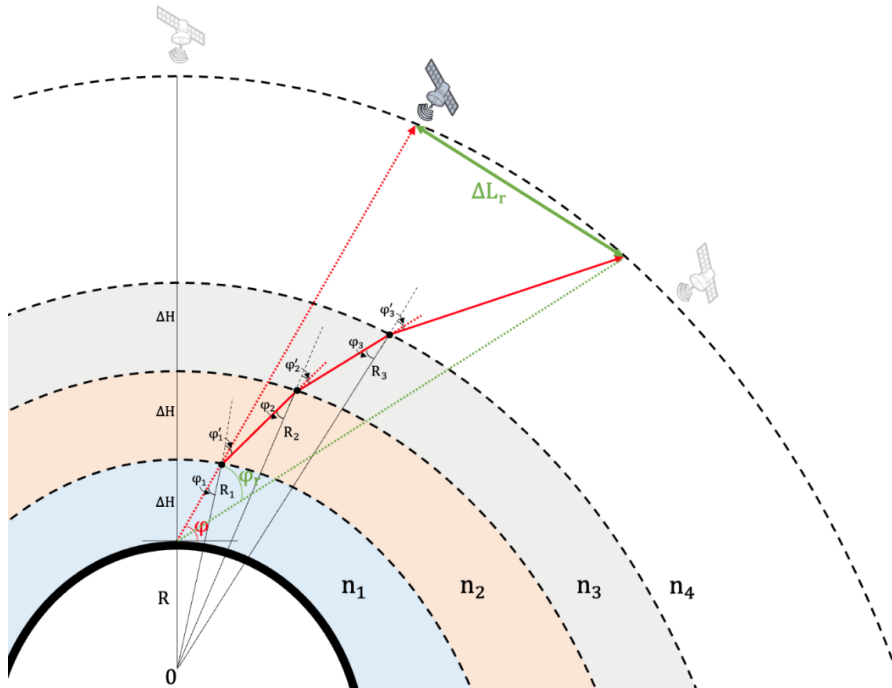


Рисунок 1.18 – Распространение излучения от источника, находящегося на Земле, в случае сферической атмосферы Земли

Исходя из рис. 1.18, основываясь на теореме синусов, очевидно равенство (1.40):

$$\frac{R_1}{\sin \varphi_2} = \frac{R_2}{\sin(180^\circ - \varphi'_1)} = \frac{R_2}{\sin(180^\circ) \cos \varphi'_1 - \cos(180^\circ) \sin \varphi'_1} = \frac{R_2}{\sin \varphi'_1} \quad (1.40)$$

С учетом (1.38) и (1.40), можно получить (1.41):

$$n_1 R_1 \sin \varphi_1 = n_2 R_2 \sin \varphi_2 \quad (1.41)$$

Основываясь на (1.39) и (1.41), получены зависимости угла места φ и длины волны λ от угла рефракции φ_r и расстояния, пройденного сигналом L при рефракции, в случае сферической атмосферы Земли без учета конкретных параметров излучения (ширина и форма лазерного пучка, мощность излучения и т.п.). Исследование рефракции проводилось на модели, основанной на параметрах стандартной атмосферы [39]. Данный стандарт соответствует международному стандарту ISO 2533.

Полученные в ходе моделирования зависимости представлены на рис. 1.19–1.20.

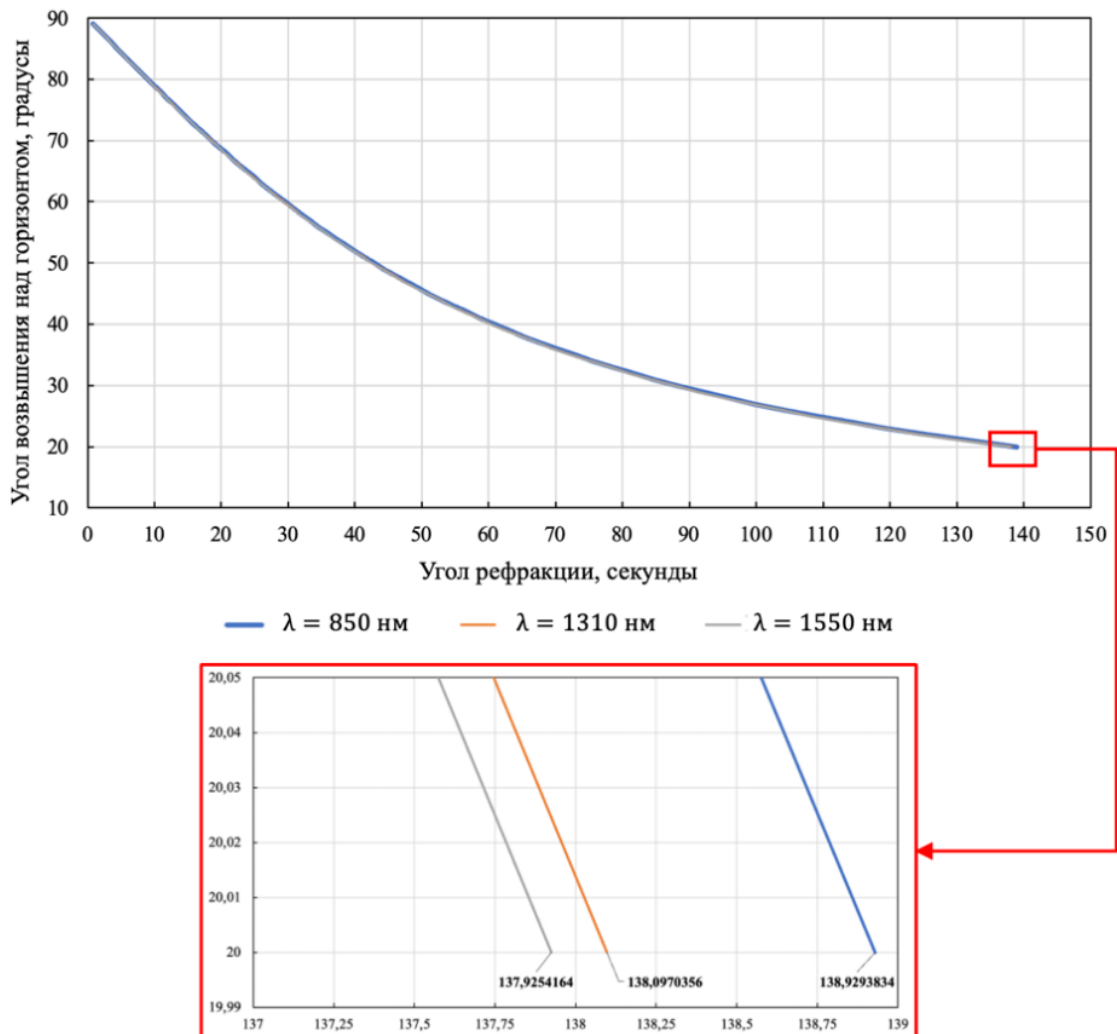


Рисунок 1.19 – Зависимости угла места и длины волны от угла рефракции при высоте орбиты спутника 500 км в случае сферической атмосферы Земли

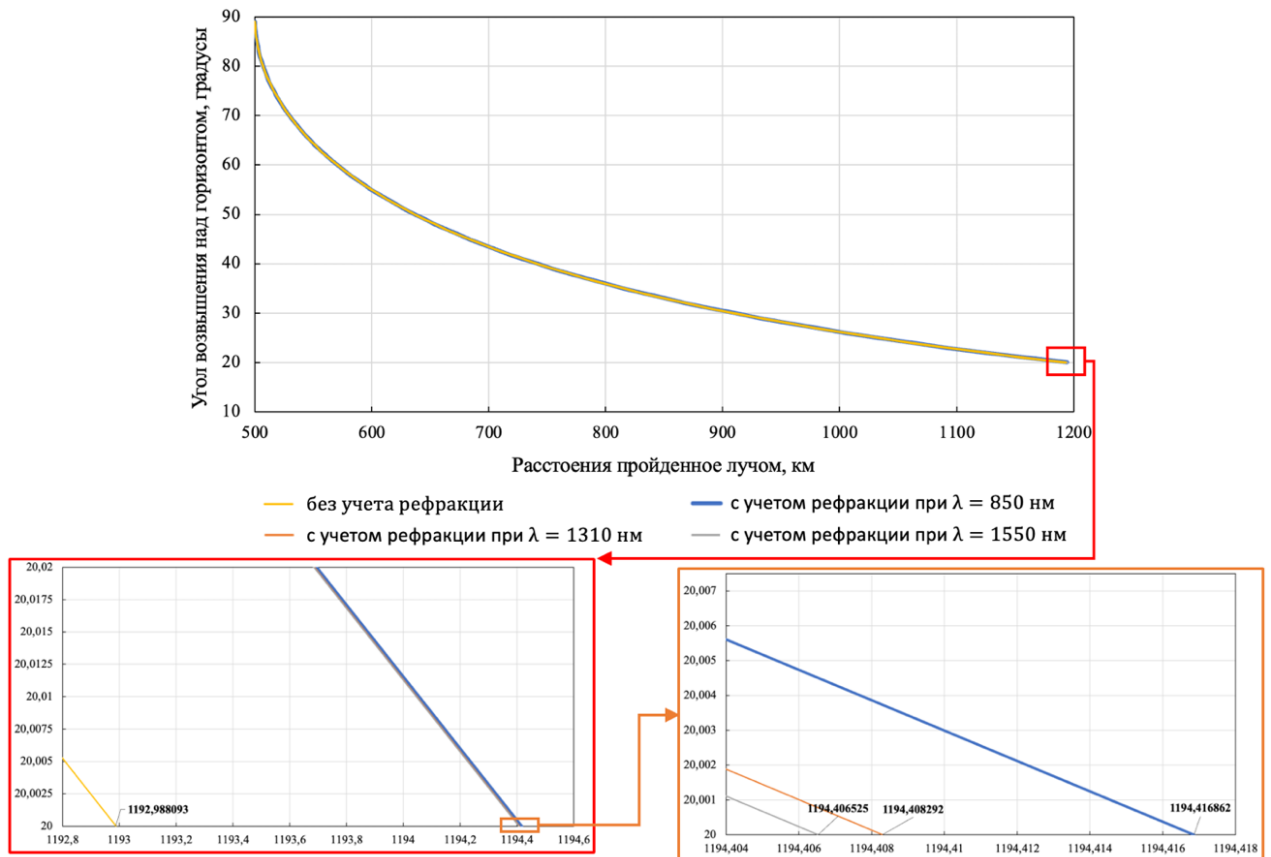


Рисунок 1.20 – Зависимости угла места и длины волны от расстояния, пройденного сигналом при высоте орбиты спутника 500 км, в случае сферической атмосферы Земли

Исходя из рис. 1.19–1.20, можно сделать следующие выводы:

1. Длинные волны более устойчивы к атмосферной рефракции:
 - Угол рефракции при $\lambda = 850$ нм составил 138,93 секунд, когда при $\lambda = 1550$ нм - 137,93 секунд;
 - Расстояние, пройденное лучом при $\lambda = 850$ нм, составило 1194,417 км, когда при $\lambda = 1550$ нм - 1194,406 км.
2. Смещение пучка на приёмнике увеличивается при меньших углах места;
3. Угол рефракции увеличивается при меньших углах места.

1.6. Выводы к разделу 1

В данном разделе представлен анализ существующих подходов к оценке влияния факторов, ограничивающих применение квантового распределения ключей в спутниковых каналах оптической связи, с акцентом на атмосферные потери. Учет этих факторов имеет критическое значение для практических задач, таких как развертывание новых наземных станций и повышение эффективности квантовых коммуникационных систем, поскольку они напрямую влияют на надежность и доступность таких каналов связи.

Среди различных факторов атмосферного воздействия наибольшее негативное влияние на распространение оптического излучения оказывает атмосферная турбулентность. Она является причиной таких явлений, как сцинтилляция (случайные колебания интенсивности сигнала) и пространственное блуждание луча, существенно снижающих устойчивость канала связи. В условиях глобальных климатических изменений и роста числа экстремальных погодных явлений актуальность исследования турбулентных процессов в атмосфере значительно возрастает.

Выявлено, что, несмотря на достижения в области моделирования атмосферной турбулентности и учета ее влияния на оптическую связь, существующие методы оценки энергетических потерь, обусловленных турбулентной атмосферой, имеют ряд серьезных недостатков. Во-первых, ограниченная точность моделей часто основана на упрощениях, которые не отражают реальную сложность атмосферы, например, предположение об однородности среды. Во-вторых, известные модели не учитывают временную изменчивость атмосферных процессов, что представляет собой значительное упущение, поскольку турбулентные процессы изменяются во времени, и существующие подходы не способны это учесть. В-третьих, отсутствие адаптивности существующих методик затрудняет их применение в различных

условиях. Модели, разработанные для конкретных регионов или климатических условий, часто не работают в других локациях.

Таким образом, успешная реализация квантового распределения ключей в условиях турбулентной атмосферы требует комплексного подхода для определения границ применимости этой технологии. Проведенный анализ подчеркивает необходимость дальнейших исследований для разработки новых методик, учитывающих динамические процессы, происходящие в атмосфере.

Изложенные результаты по первому разделу опубликованы в работе [1].

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

Турбулентные процессы в атмосфере вызывают флуктуации показателя преломления, что приводит к значительным энергетическим потерям оптического сигнала и ухудшению качества передачи данных. Как уже отмечалось, традиционные статистические модели в первую очередь ориентированы на учёт регулярной рефракции, плавного изменения атмосферных параметров, обусловленного средним градиентом показателя преломления. Однако, несмотря на определённые достижения в описании турбулентного воздействия, такие подходы носят неадаптивный характер: они предполагают, что метеорологические параметры (температура, давление, скорость ветра, кинематическая вязкость и др.) являются усреднёнными по времени и высоте величинами, не отражающими реальную пространственно-временную изменчивость.

При этом такие модели не учитывают физическую природу формирования, динамику развития и пространственную структуру атмосферных вихрей, которые напрямую влияют на характеристики турбулентности. Одной из причин ограниченности существующих подходов является отсутствие единой математической модели, описывающей механизм зарождения и эволюции вихревых образований в атмосфере [95].

В условиях современных требований к надежности и безопасности передачи информации, особенно в контексте квантового распределения ключей, становится критически важным учитывать все возможные факторы, способные негативно повлиять на доступность оптической связи. Атмосферная турбулентность, как один из основных источников энергетических потерь, представляет собой сложное и многогранное явление, которое требует глубокого понимания его природы и динамики.

Атмосфера Земли является динамичной средой, в которой происходят постоянные изменения температуры, давления и влажности. Эти изменения ведут

к образованию вихрей различного масштаба от мелких турбулентных структур до крупных атмосферных фронтов. Каждое из этих явлений способно оказывать значительное влияние на распространение оптических сигналов, вызывая флуктуации интенсивности и фазовые искажения. В связи с этим, для успешного внедрения технологии квантового распределения ключей в спутниковых каналах связи необходимо разработать надежные модели, способные учитывать эти эффекты.

2.1. Природа образования атмосферных вихрей

Атмосферу с физической точки зрения можно рассматривать, как вязкую среду, поведение которой в открытых потоках характеризуется двумя основными режимами движения: ламинарным и турбулентным. Ламинарное течение наблюдается при относительно низких значениях числа Рейнольдса ($Re \sim 50 - 150$) [23, 96], когда поток остаётся упорядоченным, а скоростные характеристики изменяются плавно и предсказуемо. В противоположность этому, при переходе к турбулентному режиму ($Re \sim 300 - 15000$) [23, 96] упорядоченность нарушается вследствие интенсивного перемешивания, возникают хаотичные вихревые структуры, так называемые турбулентные вихри, приводящие к случайным флуктуациям скорости. Переход от ламинарного к турбулентному движению определяется безразмерной величиной, называемой числом Рейнольдса (Re). В зависимости от величины Re можно судить о масштабах и интенсивности турбулентности в различных атмосферных слоях. Число Рейнольдса вычисляется по формуле: $Re = \frac{V l_f}{\nu_k}$, где V – характерная скорость, l_f – размерность потока (характерный размер), а ν_k – кинематическая вязкость.

Переход от ламинарного режима течения к турбулентному не происходит скачкообразно, а реализуется в некоторой окрестности критического значения

числа Рейнольдса. Превышение этого порога указывает на установление устойчивой турбулентной структуры потока. В приземном атмосферном слое типичный пространственный масштаб турбулентных вихрей l_f в среднем составляет порядка 2 метров [97]. Скорость ветра в этом слое обычно лежит в интервале 1-5 м/с, а кинематическая вязкость воздуха ν_k при стандартных условиях близка к $0,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [97].

Структура атмосферной турбулентности описывается каскадной теорией турбулентности [98]. Согласно данной теории, при увеличении скорости воздушного потока число Рейнольдса достигает критического уровня, после чего возникают локализованные неоднородности - турбулентные вихри. Их размеры меньше масштаба основного потока, и они уже не зависят от него напрямую [4]. Под действием инерционных процессов крупные вихри распадаются на более мелкие, пока не будет достигнут минимальный внутренний масштаб l_0 . При этом вихри, являясь объёмно массовой структурой, движутся со средней скоростью потока в профиле.

Диапазон между внешним L_0 и внутренним l_0 масштабами турбулентности называется инерционным поддиапазоном. Внешний масштаб определяет верхнюю границу, ниже которой свойства турбулентности перестают зависеть от исходного потока. Обычно он лежит в пределах от 10 до 100 метров и возрастает с увеличением высоты над поверхностью Земли [23, 39, 99]. Внутренний масштаб, напротив, соответствует нижнему пределу турбулентных структур и составляет порядка 1-10 мм вблизи земной поверхности, тогда как в тропосфере и стратосфере этот показатель может достигать нескольких сантиметров и более [23, 39, 99]. Масштаб, меньший внутреннего масштаба l_0 , относится к диапазону вязкой диссипации. В этом диапазоне турбулентные вихри исчезают, а оставшаяся энергия рассеивается в виде тепла. Вихри ослабляют и перенаправляют поток распространяющегося лазерного луча на основе относительного размера волнового фронта по отношению к l_0 и L_0 [100].

Экспериментально установленные зависимости числа Струхала от числа Рейнольдса для ламинарного и турбулентного режимов течения описываются аналитическими соотношениями (2.1) и (2.2) соответственно [96].

$$St = 0,212(1 - \frac{21,2}{Re}), \quad (2.1)$$

$$St = 0,212(1 - \frac{12,7}{Re}), \quad (2.2)$$

где St – число Струхала, определяемое выражением (2.3):

$$St = f \frac{l_f}{V}, \quad (2.3)$$

где f – частота образования вихрей, V – характерная скорость, l_f – размерность потока (характерный размер).

Таким образом, при увеличении Re возрастает и St , что в конечном итоге приводит к увеличению частоты образования вихрей.

Описанная динамики формирования и физическая природа возникновения атмосферных вихрей создаёт основу для качественного прогнозирования отклонения оптического луча, вызванного случайными изменениями показателя преломления.

2.2. Методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча

Методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности состоит из нескольких ключевых этапов:

1. Учет параметров приемо-передающего терминала.

$$M_{TP_ord} = \{\lambda, W_0, \varphi\}, \quad (2.4)$$

где:

- M_{TP_ord} – параметры приемо-передающего терминала (излучателя);
- λ – рабочая длина волны;

- W_0 – радиус луча, формируемый передатчиком;
- φ – угол места на спутник.

Первым шагом является получение данных о параметрах передающего терминала.

2. Учет параметров атмосферы.

$$M_{AP_ord} = \{h_z, T(h_z)_z, P(h_z)_z, V(h_z)_z, v(h_z)_z\}_{i=1}^z, \quad (2.5)$$

где:

- M_{AP_ord} – параметры атмосферы;
- z – атмосферный слой толщиной Δz ;
- h_z – высота слоя z ;
- $T(h_z)_z$ – температура атмосферного слоя z на высоте h_z ;
- $P(h_z)_z$ – давление атмосферного слоя z на высоте h_z ;
- $V(h_z)_z$ – скорость ветра в атмосферном слое z на высоте h_z ;
- $v(h_z)_z$ – кинематическая вязкость в атмосферном слое z на высоте h_z .

Вторым шагом является сбор данных о состоянии атмосферы в потенциальном регионе расположения наземной станции.

Этот процесс включает в себя получение информации о профиле температуры, давления, кинематической вязкости и скорости ветра. Данные могут быть собраны с помощью метеорологических станций, расположенных в различных точках региона, а также с использованием спутниковых метеорологических данных. Атмосфера моделируется как слоистая среда, разбитая на слои толщиной Δz в пределах каждого из которых ее термодинамические параметры постоянны.

Сбор данных для моделирования:

– *Наземные метеорологические станции:* Эти станции обеспечивают локальные измерения текущих атмосферных параметров, включая температуру на различных высотах, атмосферное давление и скорость ветра.

– *Спутниковые данные:* Спутники могут обеспечивать обширными пространственно распределёнными данными о состоянии атмосферы, включая карты температуры и давления на различных высотах.

– *Модели стандартной атмосферы:* В случае, когда более надежные, полученные в потенциальном месте расположения наземной станции данные отсутствуют, необходимо использовать модели атмосферы, основанные на параметрах стандартной атмосферы такие как [39, 101, 102].

– *Интеграция данных:* Для создания полного представления о состоянии атмосферы необходимо учитывать данные из различных источников. Например, если данные с метеорологических станций неполные, можно использовать модели стандартной атмосферы, а также многолетнюю статистику по данному региону, которая может предоставить информацию о типичных метеорологических условиях.

3. Учет параметров вихревой структуры атмосферы.

$$M_{VP_ord} = \{h_k(\tau), T(h_k)_k, P(h_k)_k, v(h_k)_k, l(h_k, \tau)_k, t(l_k, I_k, v_k, \tau)_k, f(v_k, l_k)_k\}_{i=1}^k, \quad (2.6)$$

где:

- M_{VP_ord} – параметры вихревой структуры;
- $h_k(\tau)$ – высота расположения k -го вихря в момент времени τ ;
- $T(h_k)_k$ – температура k -го вихря на высоте h_k ;
- $P(h_k)_k$ – давление воздуха в центре k -го вихря на высоте h_k ;
- $v(h_k)_k$ – характерная скорость k -го вихря на высоте h_k ;
- $l(h_k, \tau)_k$ – характерный размер k -го вихря на высоте h_k в момент времени τ ;
- $t(l_k, I_k, v_k, \tau)_k$ – время жизни k -го вихря в момент времени τ ;
- $f(v_k, l_k)_k$ – частота образования k -го вихря.

Третий шаг включает учет:

– *Динамики вихрей.* На основе представлений современной науки о природе образования атмосферных вихрей создаются модели вихрей. Атмосферные слои моделируются как совокупность вихревых структур. В

процессе своего существования вихри могут распадаться на более мелкие структуры (меньшие вихри), в соответствии с их временем жизни, объединяться при их столкновении, аннигилироваться, зарождаться, в зависимости от частоты образования, которая может быть определена из статистических данных о метеорологических явлениях либо из экспериментальных зависимостей.

– *Параметров вихревых структур.* Каждый моделируемый вихрь характеризуется набором численных параметров, определяемых на основе метеоданных, включая температуру и давление в соответствующем атмосферном слое. К таким параметрам относятся размеры вихря, его собственную скорость перемещения и продолжительность существования (время жизни).

4. Расчет параметров оптического излучения, проходящего через турбулентную атмосферу.

Расчёт параметров оптического излучения, проходящего через турбулентную атмосферу, требует учёта локальных изменений показателя преломления. В предлагаемой методике траектория луча определяется на основе закона Снеллиуса с учётом сферической геометрии атмосферных слоёв. Таким образом, угол падения на границе между слоями и вихрями задаётся следующим соотношением:

$$\varphi(h_{z,k})_{z,k} = \left\{ \arcsin \left(\frac{n(h_{z,k+1}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k} R(h_{z,k+1}) \sin \varphi(h_{z,k+1})_{z,k}}{n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k}} \right) \right\}_{i=1}^{z,k}, \quad (2.7)$$

где:

- $\varphi(h_{z,k})_{z,k}$ – угол падения луча на атмосферный слой z или k -ый вихрь на высоте $h_{z,k}$;
- $R(h_{z,k})$ – расстояние от центра Земли до высоты $h_{z,k}$;
- $n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k}$ – показатель преломления атмосферного слоя z или k -го вихря:

$$n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k} = \left\{ 1 + \left[\frac{77,6(1+7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) P(h_{z,k})_{z,k}}{T(h_{z,k})_{z,k}} \cdot 10^{-6} \right] \right\}_{i=1}^{z,k}, \quad (2.8)$$

где:

- $T(h_{z,k})_{z,k}$ – температура атмосферного слоя z или k -го вихря;

- $P(h_{z,k})_{z,k}$ – давление атмосферного слоя z или давление воздуха в центре k -го вихря;
- λ – рабочая длина волны приемо-передающего терминала.

Следующий этап включает в себя расчет параметров оптического пучка с учетом данных о параметрах атмосферы и ее вихревой структуре, а также передающего терминала:

– На основе метеорологических данных и параметров смоделированных турбулентных структур вычисляется пространственно-временное распределение показателя преломления для каждого атмосферного слоя, включая динамически формирующиеся вихревые неоднородности.

– С использованием уравнений геометрической оптики рассчитывается отклонение оптического луча при прохождении через неоднородные слои атмосферы и ее вихревые структуры. В этом процессе учитываются:

- 1) Атмосфера не является плоской, и ее кривизна влияет на путь оптического луча;
- 2) Угол преломления изменяется в зависимости от показателя преломления различных слоев атмосферы и характеристик вихрей.

5. Статистический анализ полученных результатов.

Оптическое излучение проходит через N атмосферных слоев и вихрей ($N = z + k$) на высотах h_N . На каждой высоте h_N оно получает малое угловое отклонение φ_N (2.9):

$$\varphi_N = \varphi(h_{z,k})_{z,k}, \quad (2.9)$$

где: $\varphi(h_{z,k})_{z,k}$ – угол падения на атмосферный слой z или k -ый вихрь на высоте $h_{z,k}$.

Тогда его поперечное смещение в точке наблюдения r является суммой вкладов всех отклонений (2.10):

$$r \approx \sum_N \varphi_N s_N, \quad (2.10)$$

где: $s_N = H - h_N$; H – высота расположения спутника.

Так как при малых углах $\tan(\varphi_N) \approx \varphi_N$.

Таким образом, при некоррелированных отклонениях (угловые смещения на разных слоях и вихрях статистически независимы) среднеквадратическое отклонение оптического излучения на апертуре приемника определяется согласно выражению (2.11):

$$\langle r_c^2 \rangle_{ord} = \sqrt{\langle (r - \langle r \rangle)^2 \rangle} = \sum_N s_N^2 \langle \varphi_N^2 \rangle |_{M_{AP_ord}, M_{VP_ord}, M_{TP_ord}}, \quad (2.11)$$

где: $\langle r_c^2 \rangle_{ord}$ – среднеквадратическое отклонение оптического излучения на апертуре приемника; r – отклонение оптического излучения на апертуре приемника; $\langle r \rangle$ – среднее значение отклонения оптического излучения на апертуре приемника (математическое ожидание); φ_N – угловое отклонение оптического излучения на атмосферном слое (вихре) N ; s_N – расстояние от атмосферного слоя (вихря) N до точки наблюдения; M_{AP_ord} – параметры атмосферы; M_{VP_ord} – параметры вихревой структуры; M_{TP_ord} – параметры приемопередающего терминала.

Чем меньше стандартное отклонение $\langle r_c^2 \rangle_{ord}$, тем более устойчивый канал связи, так как это указывает на меньшие флуктуации в направлении оптического луча.

Таким образом, статистический анализ служит основой для вывода об устойчивости спутниковой оптической связи в условиях атмосферной турбулентности и позволяет сделать обоснованные прогнозы о ее эффективности и возможности использования при конкретных моделируемых условиях.

В рамках выполняемой работы, для получения среднеквадратического отклонения $\langle r_c^2 \rangle_{ord}$ разработан программный комплекс, позволяющий проводить численный эксперимент при заданных исходных данных с целью определения искомых характеристик закона распределения исследуемого параметра [VII.]. Данный комплекс апробирован и внедрён в компании ООО «КуСпэйс Технологии» и ООО «КуРэйт» для использования при обосновании технико-экономической целесообразности развертывания наземных станций спутниковых систем КРК.

На рис. 2.1–2.2 представлены плотности вероятности отклонения оптического луча в восходящем канале связи ($W(x)$). Согласно описанной

методике, были учтены: параметры атмосферы, исходя из моделей стандартной атмосферы; параметры вихревой структуры, исходя из статистических данных; параметры приемо-передающего терминала наземной станции в Звенигороде [111].

На рис. 2.1–2.2 рассмотрены случаи для углов места $\varphi = 20$ град (рис. 2.1) и $\varphi = 89$ град (рис. 2.2) при расположении спутника на низкой околоземной орбите ($H = 500$ км). На этих рисунках изображены усредненная плотность вероятности отклонения оптического излучения (черная линия) и плотности вероятности, полученные в разные моменты времени (цветные линии).

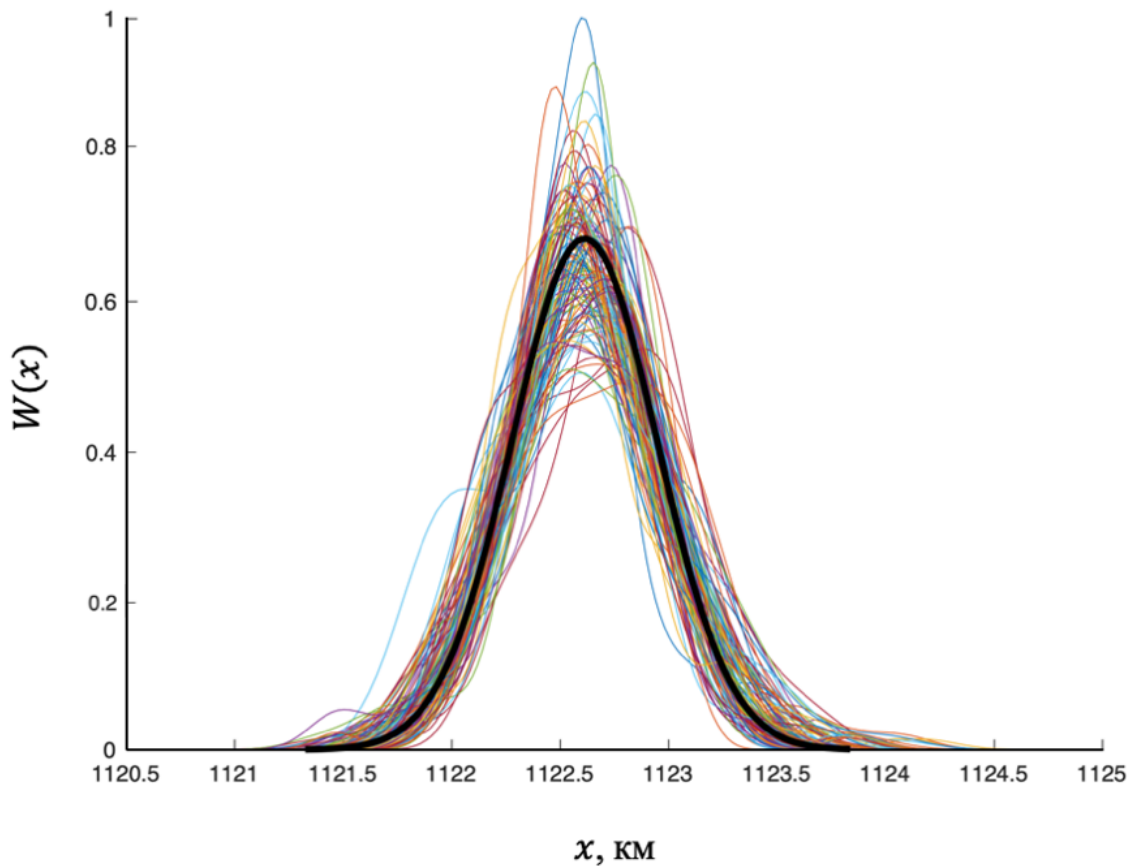


Рисунок 2.1 – Плотности вероятности отклонения оптического излучения на апертуре приемника

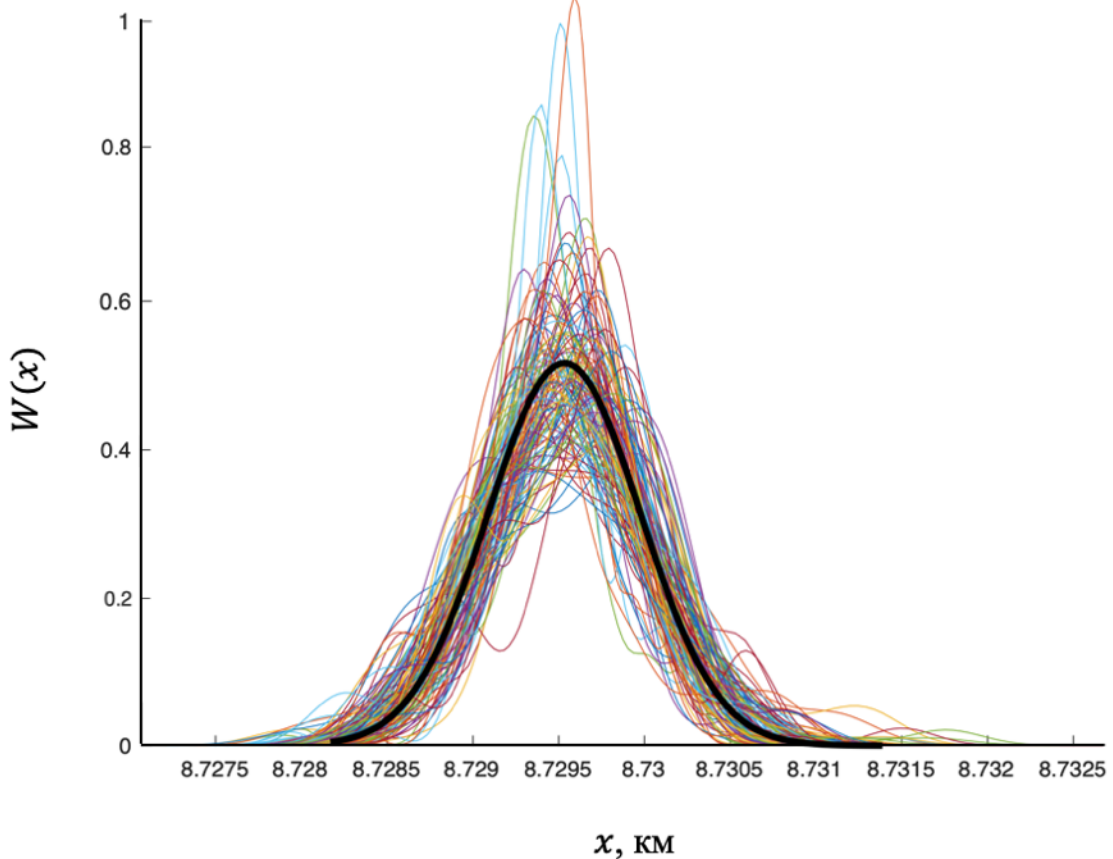


Рисунок 2.2 – Плотности вероятности отклонения оптического излучения на апертуре приемника

Исходя из рис. 2.1–2.2, можно сделать следующие выводы:

1. Среднее значение отклонения (μ) соответствует положению центра пятна излучения на приёмной апертуре в условиях регулярной рефракции, то есть при систематическом, предсказуемом изменении показателя преломления атмосферы с высотой. При угле места $\varphi = 20$ град. это отклонение составляет 1122,6 км, тогда как при $\varphi = 89$ град. оно снижается до 8,72 км. Такая разница обусловлена увеличением длины трассы в атмосфере при малых углах места, где влияние регулярной рефракции проявляется наиболее сильно. На графиках среднее значение μ совпадает с положением максимума кривой плотности вероятности.

2. Стандартное отклонение (σ), отражающее степень случайного разброса положения луча из-за турбулентных флуктуаций, возрастает по мере уменьшения угла места. Это наглядно видно на рис. 2.1: при $\varphi = 20$ град. распределение значительно шире, чем при $\varphi = 89$ град. на рис. 2.2. Увеличение σ связано с более

продолжительным взаимодействием оптического сигнала с турбулентными слоями атмосферы на длинной трассе, что усиливает нестабильность канала.

3. При больших углах места наблюдается более высокая устойчивость оптического канала связи. Это объясняется как уменьшением влияния регулярной рефракции, так и снижением степени случайных флуктуаций. Это особенно заметно на рис. 2.2, где плотность вероятности имеет узкий пик с малым значением σ , что указывает на высокую пространственную стабильность оптического луча на входе приемной системы.

2.3. Методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке

Методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке вследствие влияния атмосферной турбулентности состоит из нескольких ключевых этапов:

1. Учет параметров приемо-передающего терминала.

$$M_{TP_ddor} = \{\lambda, W_0, \varphi\}, \quad (2.12)$$

где:

- M_{TP_ddor} – параметры приемо-передающего терминала (излучателя);
- λ – рабочая длина волны;
- W_0 – радиус луча, формируемый передатчиком;
- φ – угол места на спутник.

Первым шагом является получение данных о параметрах передающего терминала.

2. Учет параметров атмосферы.

$$M_{AP_ddor} = \left\{ h_z, T(h_z)_z, P(h_z)_z, V(h_z)_z, v(h_z)_z, MDV(h_z)_z, \right\}_{i=1}^z, \quad (2.13)$$

где:

- M_{AP_ddor} – параметры атмосферы;
- z – атмосферный слой толщиной Δz ;
- h_z – высота слоя z ;
- $T(h_z)_z$ – температура атмосферного слоя z на высоте h_z ;
- $P(h_z)_z$ – давление атмосферного слоя z на высоте h_z ;
- $V(h_z)_z$ – скорость ветра в атмосферном слое z на высоте h_z ;
- $\nu(h_z)_z$ – кинематическая вязкость в атмосферном слое z на высоте h_z ;
- $MDV(h_z)_z$ – метеорологическая дальность видимости атмосферного слоя z на высоте h_z ;
- $N(T_z, P_z)_z$ – число молекул в единице объёма атмосферного слоя z ;
- $\sigma_A(\lambda, N_z)_z$ – коэффициент поглощения атмосферного слоя z на длине волны λ приемо-передающего терминала;
- $\sigma_R(\lambda, N_z)_z$ – коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния атмосферного слоя z на длине волны λ приемо-передающего терминала;
- $\sigma_{MI}(\lambda, MDV_z)_z$ – коэффициент аэрозольного (Ми) рассеяния атмосферного слоя z на длине волны λ приемо-передающего терминала.

Коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния атмосферного слоя z рассчитывается согласно выражению:

$$\sigma_R(N_z)_z = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2}{3N_z\lambda^4} \frac{6+3\delta}{6-7\delta}, \quad (2.14)$$

где:

- n – показатель преломления воздуха;
- λ – рабочая длина волны приемо-передающего терминала;
- δ – фактор деполяризации молекул;
- N_z – число молекул в единице объёма атмосферного слоя z .

Коэффициент аэрозольного (Ми) рассеяния атмосферного слоя z рассчитывается согласно выражению:

$$\sigma_{MI}(\lambda, MDV_z)_z = \frac{3,91}{MDV_z} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-q}, \quad (2.15)$$

где:

- MDV_z – МДВ атмосферного слоя z ;
- λ – длина волны приемо-передающего терминала;
- q – коэффициент, зависящий от распределения размеров рассеивающих частиц.

Вторым шагом является сбор данных о состоянии атмосферы в потенциальном регионе расположения наземной станции.

Моделирование атмосферных условий требует комплексного учёта вертикальных профилей температуры, давления, кинематической вязкости и скорости ветра, а также детального состава атмосферы, в частности, концентрации молекул различных компонентов в единице объёма.

Химический и аэрозольный состав атмосферы подвержен пространственно-временным вариациям: он зависит как от географического положения наземного терминала, так и от времени суток и сезона. Для каждого компонента существуют спектроскопические базы данных, содержащие зависимости коэффициента поглощения от длины волны. Такие данные могут быть получены как экспериментально, так и из справочных источников, в частности, с использованием отечественной системы SPECTRA [37].

Для сбора информации необходимо использовать наземные метеорологические станции, распределённые по региону, а также данные дистанционного зондирования, включая спутниковые метеорологические данные. Повышение точности моделирования достигается за счёт учета данных из различных источников.

3. Учет параметров вихревой структуры атмосферы.

$$M_{VP_ddor} = \left\{ h_k(\tau), T(h_k)_k, P(h_k)_k, v(h_k)_k, l(h_k, \tau)_k, t(l_k, I_k, v_k, \tau)_k, f(v_k, l_k)_k, N(T_k, P_k)_k, \sigma_A(\lambda, N_k)_k, \sigma_R(\lambda, N_k)_k, \sigma_{MI}(\lambda, MDV_k)_k \right\}_{i=1}^k, \quad (2.16)$$

где:

- M_{VP_ddor} – параметры вихревой структуры;
- $h_k(\tau)$ – высота расположения k -го вихря в момент времени τ ;
- $T(h_k)_k$ – температура k -го вихря на высоте h_k ;
- $P(h_k)_k$ – давление воздуха в центре k -го вихря на высоте h_k ;

- $v(h_k)_k$ – характерная скорость k -го вихря на высоте h_k ;
- $l(h_k, \tau)_k$ – характерный размер k -го вихря на высоте h_k в момент времени τ ;
- $t(l_k, I_k, v_k, \tau)_k$ – время жизни k -го вихря в момент времени τ ;
- $f(v_k, l_k)_k$ – частота образования k -го вихря;
- $N(T_k, P_k)_k$ – число молекул в единице объёма k -го вихря;
- $\sigma_A(\lambda, N_k)_k$ – коэффициент поглощения k -го вихря на длине волны λ приемо-передающего терминала;
- $\sigma_R(\lambda, N_k)_k$ – коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния k -го вихря на длине волны λ приемо-передающего терминала;
- $\sigma_{MI}(\lambda, MDV_k)_k$ – коэффициент аэрозольного (Ми) рассеяния k -го вихря на длине волны λ приемо-передающего терминала.

В соответствии с современными представлениями о физике атмосферной турбулентности, для численного моделирования формируются вихревые структуры, описывающие динамику атмосферных слоёв. Каждая вихревая ячейка в модели наделяется индивидуальным набором физических параметров, которые определяются на основе метеорологических условий. Кроме того, состав вихревой структуры (в частности, локальная концентрация молекул) задаётся пропорционально числу молекул в единице объёма.

В процессе своего существования вихри могут распадаться на более мелкие структуры (меньшие вихри), в соответствии с их временем жизни, объединяться при их столкновении, аннигилироваться, зарождаться, в зависимости от частоты образования, которая может быть определена из статистических данных о метеорологических явлениях либо из экспериментальных зависимостей.

4. Расчет параметров оптического излучения, проходящего через турбулентную атмосферу.

Расчёт параметров оптического излучения, проходящего через турбулентную атмосферу, требует учёта локальных изменений показателя преломления. В предлагаемой методике траектория луча определяется на основе закона Снеллиуса

с учётом сферической геометрии атмосферных слоёв. Таким образом, угол падения на границе между слоями и вихрями задаётся следующим соотношением:

$$\varphi(h_{z,k})_{z,k} = \left\{ \arcsin \left(\frac{n(h_{z,k+1}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k} R(h_{z,k+1}) \sin \varphi(h_{z,k+1})_{z,k}}{n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k}} \right) \right\}_{i=1}^{z,k}, \quad (2.17)$$

где:

- $\varphi(h_{z,k})_{z,k}$ – угол падения луча на атмосферный слой z или k -ый вихрь на высоте $h_{z,k}$;
- $R(h_{z,k})$ – расстояние от центра Земли до высоты $h_{z,k}$;
- $n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k}$ – показатель преломления атмосферного слоя z или k -го вихря:

$$n(h_{z,k}, T_{z,k}, P_{z,k})_{z,k} = \left\{ 1 + \left[\frac{77,6(1+7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) P(h_{z,k})_{z,k}}{T(h_{z,k})_{z,k}} \cdot 10^{-6} \right] \right\}_{i=1}^{z,k}, \quad (2.18)$$

где:

- $T(h_{z,k})_{z,k}$ – температура атмосферного слоя z или k -го вихря;
- $P(h_{z,k})_{z,k}$ – давление атмосферного слоя z или давление воздуха в центре k -го вихря;
- λ – рабочая длина волны приемо-передающего терминала.

На основе метеорологических данных и параметров смоделированных турбулентных структур вычисляется локальный показатель преломления для каждого атмосферного слоя, включая динамически возникающие вихри. При этом распределение показателя преломления динамически обновляется по мере формирования новых неоднородностей.

Для определения траектории распространения оптического луча применяются уравнения геометрической оптики, в которых учитывается как сферическая геометрия атмосферы, так и её мелко- и крупномасштабная вихревая структура.

5. Суммирование вкладов всех факторов (поглощение, молекулярное и аэрозольное рассеяние) атмосферы и её вихревой структуры.

Поскольку в атмосфере присутствует множество вихревых структур (турбулентность), общая функция пропускания рассчитывается по закону Бугера-Ламберта-Бэра, согласно выражению (2.19). Этот закон описывает, как интенсивность света уменьшается при прохождении через поглощающую среду [40].

$$I = I_0 e^{-\alpha L}, \quad (2.19)$$

где: I – интенсивность излучения на расстоянии L ; I_0 – начальная интенсивность излучения; α – коэффициент ослабления, зависящий от свойств среды; L – длина пути, пройденная излучением.

В условиях турбулентной атмосферы коэффициент ослабления α представляет собой сумму вкладов от поглощения, молекулярного и аэрозольного рассеяния, каждый из которых зависит от локальных параметров атмосферных слоёв и вихревых неоднородностей. В рамках предложенной методики, учитывающей пространственную неоднородность атмосферы, обобщённое выражение (2.19) конкретизируется как (2.20):

$$I(\sigma_A(\lambda, N_{z,k})_{z,k}, \sigma_R(\lambda, N_{z,k})_{z,k}, \sigma_{MI}(\lambda, MDV_{z,k})_{z,k}) = I_0 e^{-\alpha(\sigma_{Az,k}, \sigma_{Rz,k}, \sigma_{MIz,k})_{z,k} L}, \quad (2.20)$$

где:

- $\sigma_{Az,k}$ – коэффициент поглощения атмосферного слоя z или k -го вихря;
- $\sigma_{Rz,k}$ – коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния атмосферного слоя z или k -го вихря;
- $\sigma_{MIz,k}$ – коэффициент аэрозольного (Ми) рассеяния атмосферного слоя z или k -го вихря;
- I – интенсивность излучения на расстоянии L ;
- I_0 – начальная интенсивность излучения;
- L – длина пути, пройденная излучением;
- $\alpha(\sigma_{Az,k}, \sigma_{Rz,k}, \sigma_{MIz,k})_{z,k}$ – коэффициент ослабления, зависящий от свойств среды: $\alpha(\sigma_{Az,k}, \sigma_{Rz,k}, \sigma_{MIz,k})_{z,k} = \sigma_{Az,k} + \sigma_{Rz,k} + \sigma_{MIz,k}$.

Итоговая функция пропускания, с учетом поглощения, молекулярного и аэрозольного рассеяния, будет равна сумме вкладов отдельных факторов

($\alpha = \sigma_A + \sigma_R + \sigma_{Mi}$). Это позволяет получить полное представление о том, как атмосферная турбулентность может повлиять на интенсивность оптического излучения.

6. Статистический анализ полученных результатов.

В предлагаемой методике интенсивность излучения на апертуре приемника I_{ap} определяется выражением (2.20), в котором в качестве начального значения I_0 принимается интенсивность на выходе последнего учитываемого атмосферного слоя (или вихря). Для оценки вероятностного распределения интенсивности излучения на апертуре приемника используются статистические методы. Одним из ключевых параметров, который используется для описания распределения интенсивности излучения на апертуре приемнике, является стандартное отклонение $\langle r_c^2 \rangle_{ddor}$, определяемое выражением (2.21).

$$\langle r_c^2 \rangle_{ddor} = \sqrt{\langle (I_{ap} - \langle I_{ap} \rangle)^2 \rangle}_{M_{AP_ddor}, M_{VP_ddor}, M_{TP_ddor}}, \quad (2.21)$$

где: $\langle r_c^2 \rangle_{ddor}$ – среднеквадратическое отклонение интенсивности оптического излучения на апертуре приемника; I_{ap} – интенсивность излучения на апертуре приемника; $\langle I_{ap} \rangle$ – среднее значение интенсивности излучения на апертуре приемника; M_{AP_ddor} – параметры атмосферы; M_{VP_ddor} – параметры вихревой структуры; M_{TP_ddor} – параметры прямо-передающего терминала.

Количественная оценка отклонения распределения интенсивности излучения на апертуре приемника от среднего значения используется для получения представления о поведении интенсивности по мере удаления от источника и, как следствие, заключения о степени устойчивости канала связи. Чем меньше стандартное отклонение, тем более устойчивый канал связи, так как это указывает на меньшие флуктуации в направлении оптического луча. Таким образом, статистический анализ служит основой для вывода об устойчивости спутниковой оптической связи в условиях атмосферной турбулентности и позволяет сделать прогнозы о ее эффективности и возможности использования при конкретных моделируемых условиях.

2.4. Методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью

Существующая методика расчета энергетических потерь, рассмотренная в п. 1.4., первоначально основывается на известных моделях профилей высотных зависимостей структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы $C_n^2(h)$ [23]. Как было отмечено ранее, традиционные модели не учитывают ряд ключевых параметров атмосферы, а также природу образования и существования атмосферных вихрей, описанных в п. 2.1, что ограничивает их применимость в различных географических локациях. В связи с этим ниже описывается предлагаемый подход, который позволяет рассчитать структурную постоянную показателя преломления турбулентной атмосферы.

Предлагаемая методика оценки энергетических потерь реализуется в виде последовательной многоэтапной процедуры, включающей следующие ключевые компоненты:

1. Первоначальное определение профиля $C_n^2(h)$. Исходя из получаемых значений среднеквадратичного отклонения оптического излучения на апертуре приемника $\langle r_c^2 \rangle_{ord}$ по методике количественной оценки среднеквадратического блуждания луча описанной в п. 2.2, рассчитывается диаметр когерентности атмосферы r_0 , в соответствии с выражением:

$$\langle r_c^2 \rangle = 0,54(H - h_0)^2 (\sec(\xi))^2 \left(\frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (2.22)$$

где: ξ – зенитный угол; W_0 – радиус луча, формируемый передатчиком; H и h_0 – высота спутника и передатчика соответственно. Для наземного передатчика $h_0 = 0$; r_0 – диаметр когерентности атмосферы (параметр Фрида [91]); λ – длина волны.

Исходя из представленного выражения (2.22), r_0 определяется как:

$$r_0 = 2W_0 \langle r_c^2 \rangle_{ord}^{-3/5} \left(0,54(H - h_0)^2 (\sec(\xi))^2 \left(\frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \right)^{3/5} \quad (2.23)$$

Из найденного значения r_0 находится значение профиля структурной постоянной показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$:

$$C_n^2(h) = \frac{d(0,423^{-1}k^{-2} \cos(\xi)r_0^{-5/3})}{dh} \quad (2.24)$$

Исходя из зависимости r_0 от $C_n^2(h)$:

$$r_0 = \left(0,423k^2 \sec(\xi) \int_0^H C_n^2(h)dh\right)^{-3/5} \quad (2.25)$$

2. Расчёт энергетических потерь с учетом сцинтилляции и блуждания луча. На основе восстановленного профиля $C_n^2(h)$, исходя из выражения (2.24), осуществляется расчет энергетических потерь, обусловленных сцинтилляцией и блужданием луча, по известным теоретически обоснованным выражениям, описанным в п. 1.4.

3. Расчет функции пропускания атмосферы с учетом ее вихревой структуры. Предлагаемая методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, учитывает расчет функции пропускания, исходя из методики определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, описанной п. 2.3. Поскольку существующая методика расчета функции пропускания, описанная в п. 1.2–1.3, учитывает только слоистую модель атмосферы и не учитывает вклад вихревой структуры.

Учитывая значимость учета энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, для практического применения квантового распределения ключей, представленная методика повысит точность оценки показателей эффективности КРК.

В целях анализа валидности предложенной методики оценки энергетических потерь необходимо провести её верификацию путём количественного и качественного сравнения полученных результатов с данными натурного эксперимента. Данный аспект детально рассмотрен в 3 разделе, где представлена методология и результаты сравнительного анализа.

2.5. Выводы к разделу 2

В данном разделе предложена методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью. Данная методика основана на двух разработанных и описанных методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

Методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности учитывает процессы взаимодействия жизни и аннигиляции вихревых структур. Данная методика позволяет количественно оценить устойчивость спутниковой оптической связи к воздействию атмосферных явлений, обусловленных турбулентностью, то есть способность обеспечивать на заданном временном интервале требуемый уровень достоверности передачи данных.

Методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке позволяет анализировать изменения распределения интенсивности оптического излучения, вызванные воздействием атмосферной турбулентности. Методика обеспечивает не только количественную оценку локальных значений интенсивности, но и позволяет качественно интерпретировать динамику перераспределения энергии излучения вдоль трассы распространения, от источника до приёмника.

Разработанные методики учитывают описанные особенности формирования и существования совокупности атмосферных вихрей, которые служат основой для моделирования слоистой атмосферы. Такой подход не только повышает точность расчётов энергетических и пространственных характеристик оптического излучения, но и обеспечивает возможность адаптации модели под меняющиеся метеорологические условия, тем самым создавая гибкий инструмент для прогнозирования поведения оптического пучка.

Изложенные результаты по второму разделу опубликованы в работах [II., III., IV.].

РАЗДЕЛ 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ МЕЖДУ СПУТНИКОМ И НАЗЕМНОЙ ПРИЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ

Квантовая криптография на сегодняшний день представляет собой один из наиболее надёжных методов обеспечения информационной безопасности, поскольку позволяет выявить факт несанкционированного доступа к передаваемым данным без раскрытия содержания самой защищённой информации. В рамках данного подхода передаваемая информация шифруется с использованием общего ключа (сеансовый ключ), который формируется в результате согласования между двумя участниками взаимодействия. Зашифрованные данные передаются по открытому классическому каналу связи, а в случае обнаружения попытки перехвата переданный ключ аннулируется. При этом сама секретная информация остаётся недоступной для злоумышленника.

В данный момент разработаны различные методы по созданию сеансового ключа, протоколы КРК, к наиболее известным относят следующие: BB84 [103], B92 [104] и E91 [105]. Протокол BB84, предназначенный для передачи данных в квантовых системах связи, является первым практическим примером реализации квантового протокола, обеспечивающего установление защищённого соединения между двумя удалёнными пользователями посредством оптической линии связи [106-108].

Алгоритм работы протокола BB84 для получения общего ключа между передатчиком и приемником, обычно называемыми Алисой и Бобом, изображенный на рис. 3.1, состоит из следующих шагов:

1. Алиса выбирает случайным образом базис поляризации («+» (0° и 90°) или «X» (45° и 135°)), а затем в этом базисе случайно одно из двух направлений поляризации, после чего отправляет сгенерированные единичные фотоны со случайной поляризацией (т.е. кубиты) Бобу.

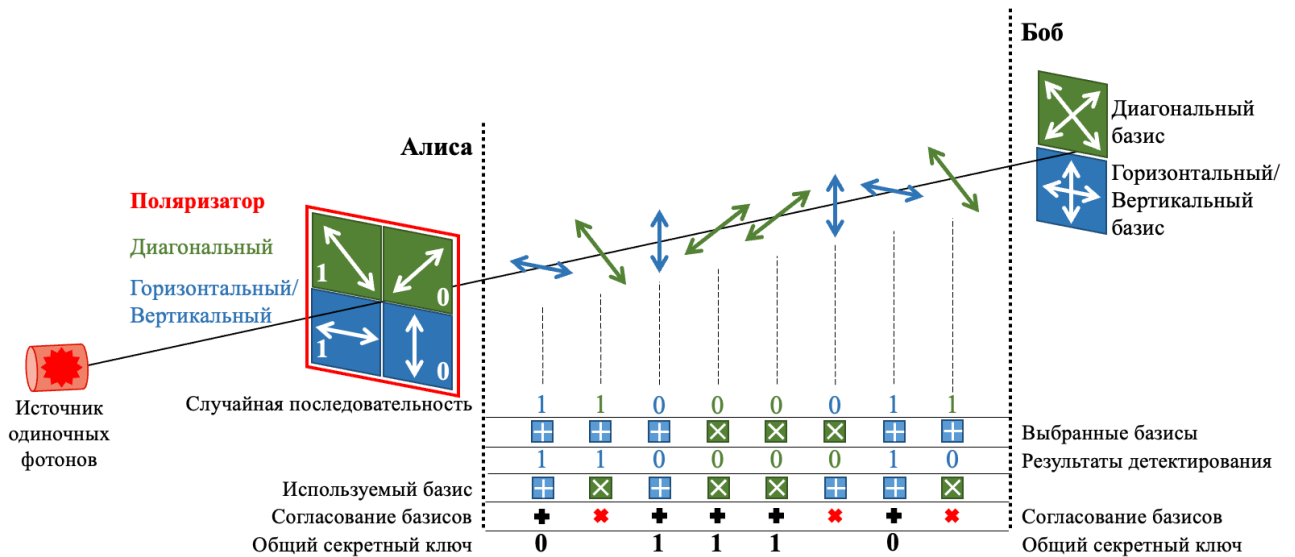


Рисунок 3.1 – Принцип работы протокола BB84

2. Боб для каждого полученного кубита случайным образом выбирает базис поляризации и ставит на его пути соответствующий поляризатор и детектор. После чего сообщает Алисе, какие именно базисы поляризации использовались для каждого измерения. При этом сами измеренные значения (прошёл фотон через поляризатор или нет) Боб не разглашает.

Ева (злоумышленник) также может получить отправленные Бобу кубиты, однако, любое ее действие ей не поможет уничтожить кубит или послать вместо него случайный, приведет к тому, что Алиса и Боб не смогут сгенерировать общий ключ; пропустить фотон через один из поляризаторов и попытаться поймать фотон детектором усложняется тем, что у фотона возможных 4 базиса поляризации, а не два (никакое положение одного поляризатора не даст четкого ответа какое из 4 состояний принимает фотон), а пропустить через несколько не получится (если фотон, к примеру, прошел через вертикальный поляризатор, какая бы исходная у него не была, после поляризатора она станет вертикальной);

3. Далее Алиса информирует Боба о базисах поляризации, которые были корректно использованы для каждого переданного фотона.

4. После этого пары данных, соответствующие некорректно выбранным базисам, исключаются из рассмотрения. Оставшиеся значения преобразуются в двоичный формат: фотоны с горизонтальной (0°) или диагональной (45°)

поляризацией интерпретируются как бит «0», а фотоны с вертикальной (90°) или противоположной диагональной (135°) поляризацией как бит «1». Полученная последовательность представляет собой просеянный квантовый ключ.

5. Для обнаружения возможного прослушивания Алиса и Боб сравнивают случайно выбранный поднабор битов из своих просеянных ключей. Если уровень ошибок превышает допустимое значение (пороговая величина составляет 11% [109]), это свидетельствует о наличии третьей стороны (Евы), поскольку любое измерение со стороны злоумышленника неизбежно вызывает изменение состояния квантовых частиц. В этом случае протокол прекращается, и участники повторяют процедуру генерации ключа пока не удостоверятся в его безопасности.

6. Участники реализуют этап коррекции ошибок (error correction) с целью устранения возможных расхождений в их ключах, а также проводят процедуру усиления секретности (privacy amplification) для минимизации объёма информации, потенциально доступной Еве. Одним из способов реализации является случайный выбор пар битов и применение операции XOR к ним. В результате формируется финальная секретная последовательность - квантовый ключ, который будет использоваться для последующего шифрования передаваемой информации.

Эффективность системы квантового распределения ключей между спутником и наземной станцией оценивается с использованием двух ключевых параметров, описанных в работе [24]: скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности R_{sift} и коэффициента квантовых ошибок на бит $QBER$.

Для расчёта показателей эффективности квантового распределения ключей используются различные методы, описанные в [24], отдельно стоит упомянуть методику для протокола BB84, используемую в данной работе, подтвержденную в том числе экспериментально [110-111]. Для протокола BB84, в соответствии с [111], R_{sift} и $QBER$ определяются выражениями (3.1)–(3.2):

$$R_{sift} = \frac{1}{2} f p_s [Y_0 + 1 - e^{-\mu\eta(t)}], \quad (3.1)$$

$$QBER = \frac{1}{2} f p_s [e_0 Y_0 + e_{det} (1 - e^{-\mu \eta(t)})] / R_{sift}, \quad (3.2)$$

где: f – частота импульсов передатчика; μ – интенсивность импульсов для сигнальных состояний, выбор которых происходит случайным образом с вероятностью p_s ; Y_0 – вероятность зарегистрировать шум; $\eta(t)$ – общая эффективность пропускания для канала связи в момент времени t ; e_{det} – собственная ошибка, вероятность того, что фотон попал в ошибочный детектор вследствие неточности процедуры измерения приемником квантового состояния; e_0 – связанные с шумом ошибки.

3.1. Моделирование скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности

3.1.1. Существующая методика расчета энергетических потерь

Сравнительный анализ рассчитанной скорости генерации просеянного квантового ключа, полученной с применением методики оценки энергетических потерь, изложенной в 1 разделе, был проведён с экспериментальными данными, опубликованными в работе [110]. В указанном эксперименте реализовано квантовое распределение ключей между спутником *Micius* и наземной станцией обсерватории ИНАС РАН, расположенной в Звенигороде.

Эксперимент по КРК между *Micius* и звенигородской станцией был осуществлён в период с 28 февраля по 1 марта 2022 года. На основе двухстрочных орбитальных элементов (TLE) спутника *Micius* были рассчитаны геометрические характеристики сеанса связи, моделируемого в условиях реального эксперимента: временные зависимости угла места и наклонной дальности до спутника.

Устойчивое двустороннее наведение и удержание спутника наземной станцией началось при угле места 28° и продолжалось вплоть до снижения угла до

20°. Таким образом, расстояние между спутником *Micius* и наземной приемной станцией во время эксперимента по КРК варьировалось от 600 км до 1150 км. Графики геометрических параметров сеанса представлены на рис. 3.2.

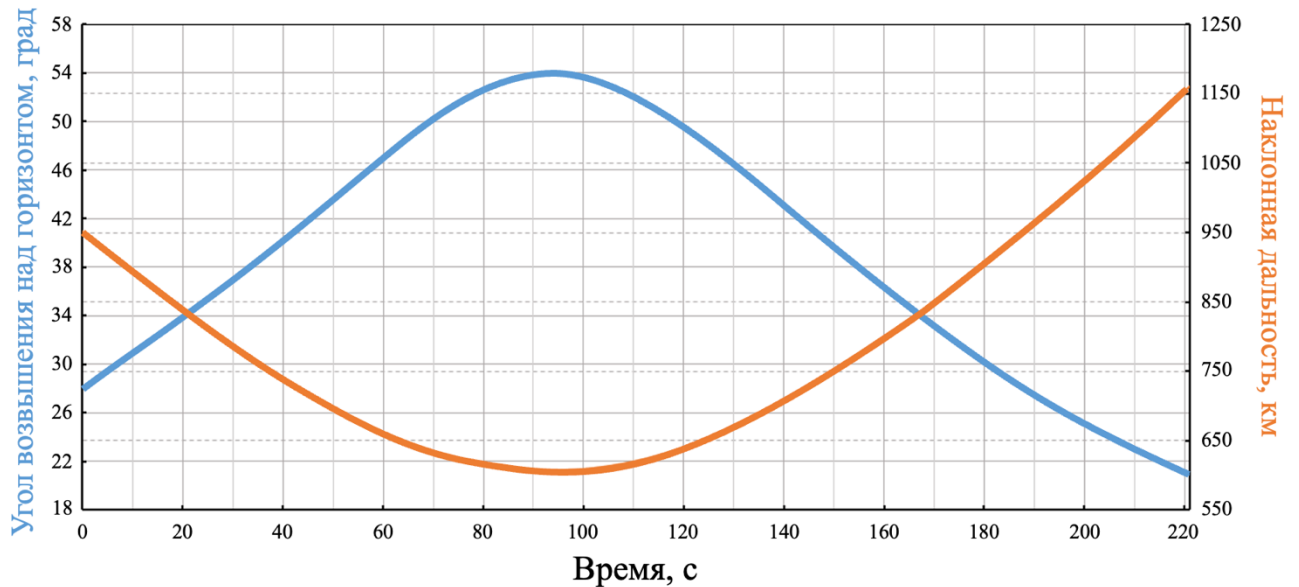


Рисунок 3.2 – Геометрические параметры моделируемого сеанса связи

Моделирование скорости генерации квантового ключа в квантовом канале связи производился с учетом:

1. Полученной эффективности пропускания (η_T), исходя методики расчета энергетических потерь, описанной в 1 разделе, согласно выражению (3.3):

$$\eta_T = \eta_{div} \cdot \eta_{absorption} \cdot \eta_{scattering_R} \cdot \eta_{scattering_{MI}} \cdot \eta_{sci} \cdot \eta_{bw}, \quad (3.3)$$

где: η_{div} – коэффициент потерь, обусловленных расходимостью оптического излучения; $\eta_{absorption}$ – функция пропускания с учетом поглощения; $\eta_{scattering_R}$ – функция пропускания с учетом молекулярного рассеяния; $\eta_{scattering_{MI}}$ – функция пропускания с учетом аэрозольного рассеяния; η_{sci} – коэффициент пропускания из-за эффекта сцинтилляции; η_{bw} – коэффициент пропускания из-за эффекта блуждания луча;

2. Географического расположения наземного терминала [110], что позволило использовать данные о пропускании атмосферы из системы SPECTRA [37], а также метеорологические параметры, зафиксированные в период проведения эксперимента. Эти данные были получены из архивов ближайших

метеорологических станций [51]. Дополнительно в расчётах использовались параметры эталонной модели стандартной атмосферы [39];

3. Конкретных технических характеристик оптических телескопов, используемых во время эксперимента [111];

4. Двухстрочных орбитальных данных спутника Micius, соответствующих временному интервалу эксперимента [111];

5. Методики оценки ключевых показателей системы, включая R_{sift} и $QBER$. В частности, в модель включены: оптическая эффективность приёмного оборудования наземной станции в Звенигороде η_{opt} и квантовая эффективность детекторов одиночных фотонов η_{det} . Таким образом, общая эффективность пропускания канала связи между спутником и наземной приемной станцией, включая квантовую эффективность детекторов одиночных фотонов, определяется как (3.4):

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{det} \quad (3.4)$$

Однако, профиль структурной постоянной показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$, для расчета энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, согласно существующей методике, описанной в п. 1.4, на конкретный период исследования, в конкретном географическом месте расположения наземной станции, найти невозможно.

В частности, авторы опубликованного эксперимента [110], основываясь на разработанной математической модели спутникового КРК, использовали феноменологические коэффициенты атмосферного затухания [111], поскольку полностью теоретические модели, описанные в п. 1.4, требуют учета множества трудноизмеримых параметров, что затрудняет практический расчёт энергетических потерь в конкретных условиях.

Эксперимент был осуществлён в условиях ясной, безоблачной ночи [110], что позволяет использовать характерные («типичные») значения структурной постоянной оптической турбулентности у земной поверхности $C_n^2(0)$, принятые в работах [24, 89], а также модель Хафнагеля-Валли [69] для описания вертикального профиля турбулентности.

Существуют также специализированные непараметрические модели для ночных условий профиля $C_n^2(h)$, к примеру, H-V Night [68]. Однако область ее применимости ограничена, поскольку она разрабатывалась для субтропических регионов. Это существенно снижает её универсальность, как и других подобных моделей, поскольку они разработаны для использования в определенных (конкретных) географических локациях или климатических условиях.

На рис. 3.3 приведено сопоставление рассчитанной скорости генерации просеянного квантового ключа, полученной с использованием модели профиля турбулентности H-V Night и экспериментальных данных, зарегистрированных в ходе пролёта спутника Micius над звенигородской наземной станцией [110].

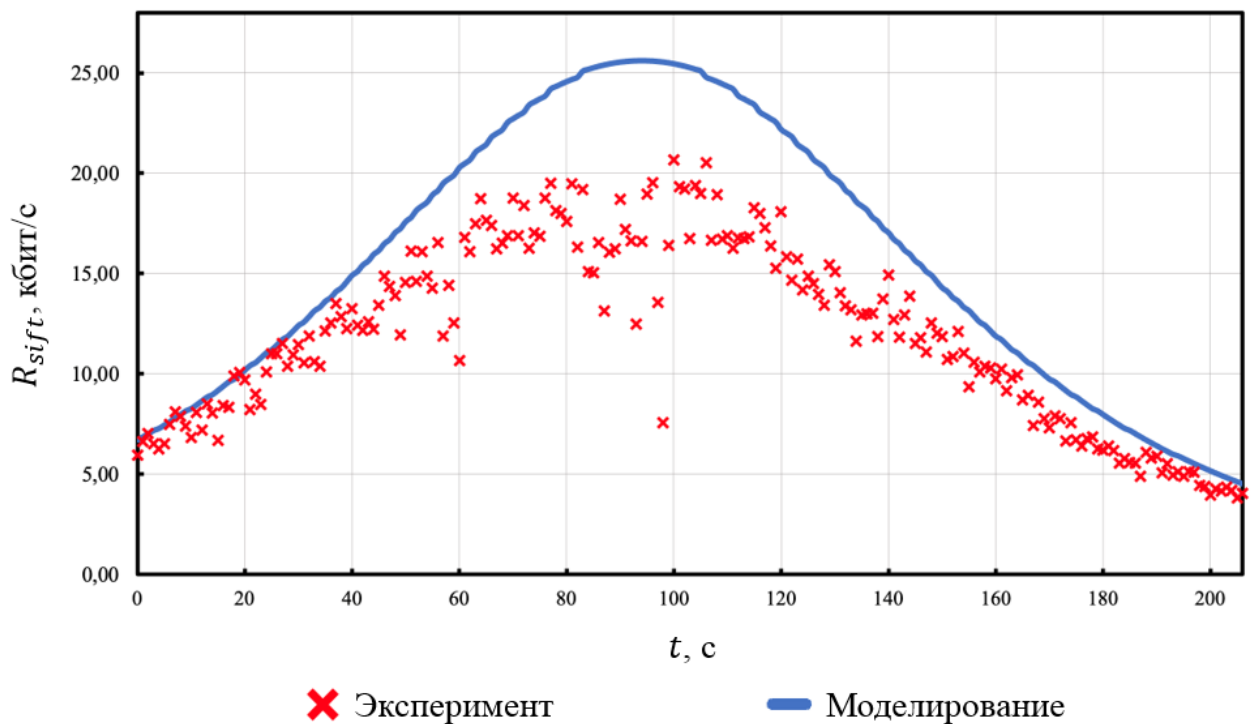


Рисунок 3.3 – Скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности с учетом модели H-V Night

Анализ рис. 3.3 показывает, что рассчитанная скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности существенно отличается от экспериментальных данных. Это расхождение обусловлено тем, что профиль $C_n^2(h)$, заданный моделью H-V Night, был разработан для условий, характерных другой географической зоне, и не учитывает локальные метеорологические и

климатические особенности региона проведения эксперимента. Подобное ограничение присуще всем непараметрическим моделям турбулентности, поскольку они не предусматривают адаптации к пространственно-временным вариациям параметров атмосферы в иных локациях [68].

Использование параметрических, к примеру, HV [69], оказывается нецелесообразным, поскольку номинальное значение оптической турбулентности у поверхности Земли $C_n^2(0)$ (начальный параметр данной модели) не может быть определено с достаточной точностью в момент проведения эксперимента. Это ограничение существенно снижает точность получаемых результатов, и, как следствие, приводит к ошибочным выводам.

Результаты моделирования скорости генерации просеянного квантового ключа, выполненные с применением профилей $C_n^2(h)$, основанных на моделях Гурвича-Грачевой [66] и Гринвуда [67], и представленные на рис. 3.4 и 3.5, также демонстрируют значительное несоответствие с экспериментальными данными, полученными при пролёте спутника *Micius* над звенигородской станцией [110]. Это подтверждает, что их параметризация жёстко привязана к специфическим географическим и климатическим условиям, что делает их малоприспособленными для прямого применения в иных регионах.

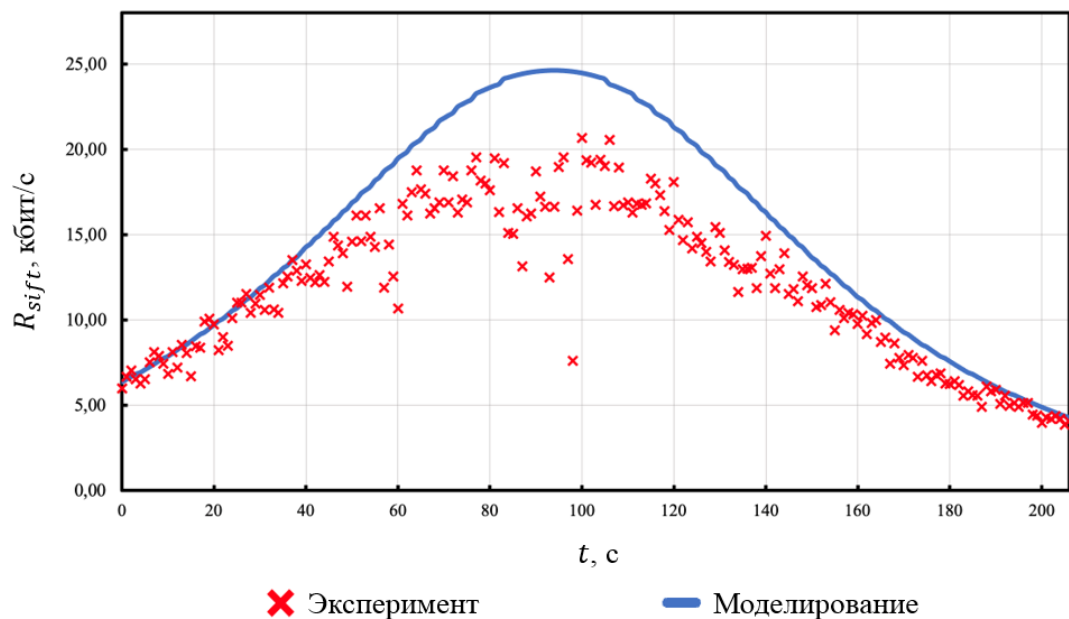


Рисунок 3.4 – Скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности с учетом модели Гурвича и Грачевой

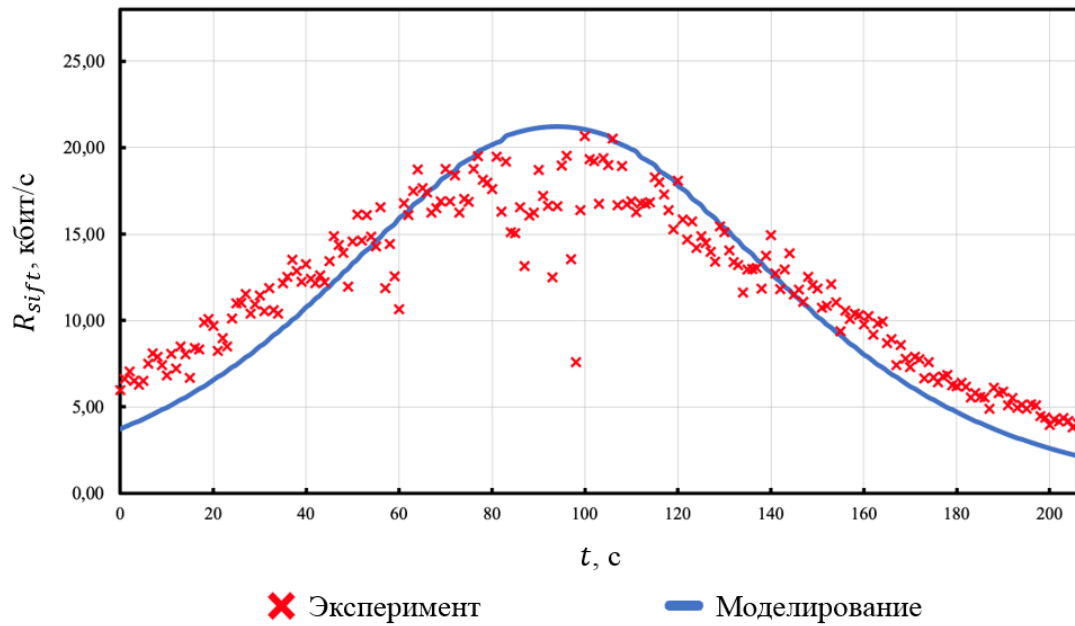


Рисунок 3.5 – Скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности с учетом модели Гринвуда

3.1.2. Верификация разработанной методики оценки энергетических потерь

Расчет скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности в квантовом канале связи, основанный на предлагаемой методике оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, описанной во втором разделе, предполагает первоначальное определение профиля $C_n^2(h)$, основываясь на **методике количественной оценки среднеквадратического блуждания луча**, описанной в п. 2.2, и расчете энергетических потерь, обусловленных сцинтилляцией и блужданием луча, по известным теоретически обоснованным выражениям, описанным в п. 1.4.

Таким образом, зная профиль $C_n^2(h)$, можно использовать известные теоретически обоснованные выражения, описанные в п. 1.4, для расчета эффективности пропускания η_T (выражение (3.3)), исходя из методики расчета энергетических потерь, описанной в 1 разделе.

На рис. 3.6 приведено сравнение экспериментально измеренной и рассчитанной с использованием предложенной методики (оценки энергетических потерь) скорости формирования квантового ключа в ходе пролёта спутника Micius над наземной станцией в Звенигороде [110].

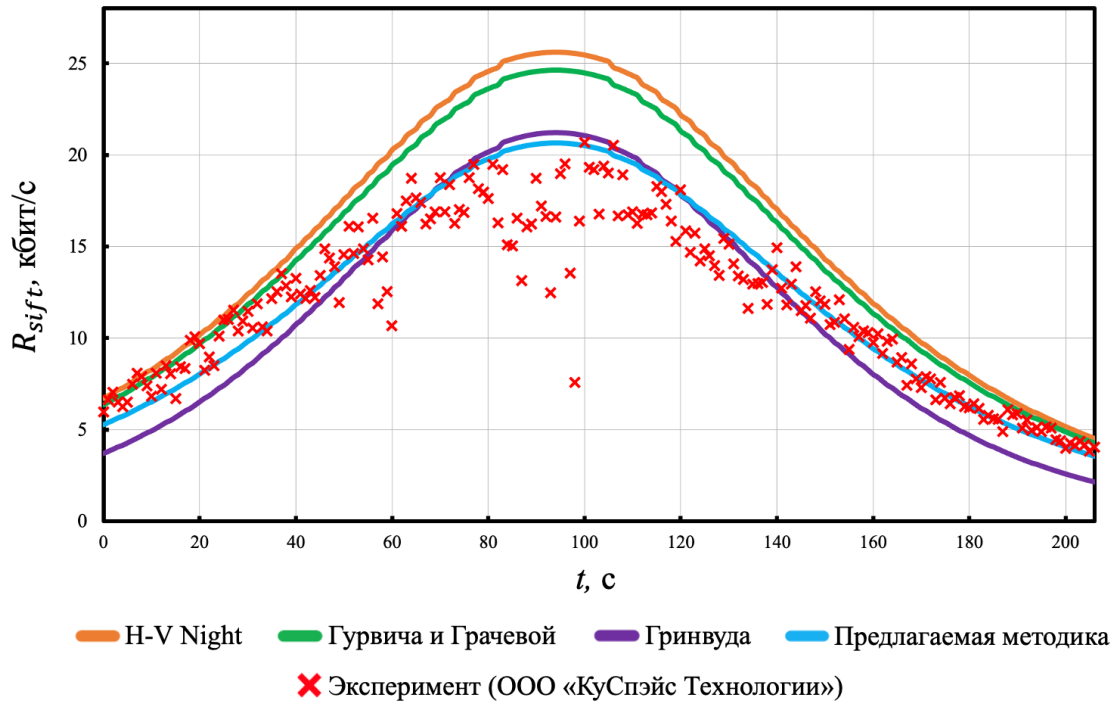


Рисунок 3.6 – Скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности

Анализ данных, представленных на рис. 3.6, демонстрирует высокую степень соответствия между экспериментальными измерениями и результатами, полученными с помощью разработанной методики. Это свидетельствует о её достоверности, практической применимости и способности адекватно описывать реальные условия распространения сигнала.

«Провал» скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности на больших углах места (более 52 град.) обусловлен увеличением угловой ошибки слежения за спутником, которая приводит к кратковременной потере сигнала. Данная ошибка связана с механической особенностью работы альт-азимутального типа опорно-поворотного устройства. Так, в максимальной точке подъема спутника над горизонтом возникают

наибольшие скорости вращения телескопа вдоль оси зенита, и, в случае прохода спутника через зенит наземной станции, эта скорость стремится к бесконечности.

Для оценки эффективности предложенной методики оценки энергетических потерь в спутниковом оптическом канале связи, обусловленных атмосферной турбулентностью, проведен сравнительный анализ методик, в качестве показателя эффективности выбранной методики выбран параметр S , являющийся квадратным корнем из суммы квадратов невязок деленный на количество наблюдений, характеризующий степень отклонения результатов эксперимента от аналитических (3.5):

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y' - y)^2}}{N} \quad (3.5)$$

В результате оценки каждой из методик получены следующие результаты, представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Оценка точности методик

Методика	S , кбит/с
Предлагаемая методика оценки энергетических потерь	0,15
H-V Night	0,33
Гринвуда	0,18
Гурвича и Грачевой	0,29

Критерием принятия решения о наилучшей методике является $S \rightarrow \min$.

Таким образом, предлагаемая методика, основанная на разработанных методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, в условиях влияния турбулентных ячеек различных масштабов, повышает точность оценки показателей эффективности КРК, а именно, скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности не менее чем в 1,2 раза, и, как следствие, исходя из выражения (3.2), коэффициента квантовых ошибок на бит.

3.2. Выводы к разделу 3

В данном разделе представлен общий алгоритм работы протокола BB84 для получения общего ключа между передатчиком и приемником, используемый в исследуемом эксперименте по КРК между спутником *Micius* и наземной станцией в Звенигороде.

На основе экспериментальных данных была проведена верификация результатов моделирования скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности с использованием как существующей методики расчета энергетических потерь, рассмотренной в 1 разделе, так и предложенной методики оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью, описанной во 2 разделе.

Показано, что смоделированная скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности на основе существующей методики расчета энергетических потерь, рассмотренной в 1 разделе, значительно отличается от экспериментальных данных. Это обусловлено использованием непараметрических моделей профиля структурной постоянной показателя преломления атмосферы $C_n^2(h)$. Вариация метеорологических условий вследствие применимости таких моделей в другом географическом месте не предусмотрена, как и в случае всех непараметрических моделей. Кроме того, применение параметрических нецелесообразно, поскольку начальные параметры таких моделей требуют учета множества трудноизмеримых параметров, что затрудняет практический расчёт энергетических потерь в конкретных условиях.

Показано, что смоделированная скорость генерации просеянной квантовой ключевой последовательности на основе предлагаемой методики расчета энергетических потерь, рассмотренной во 2 разделе, имеет хорошее согласие с данными эксперимента.

Предлагаемая методика, основанная на разработанных методиках количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, повышает точность оценки показателей эффективности КРК, а именно, скорости генерации

просеянной квантовой ключевой последовательности не менее чем в 1,2 раза, и, как следствие, коэффициента квантовых ошибок на бит.

Изложенные результаты по третьему разделу опубликованы в работах [IV., V., VI.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Произведенный анализ современного состояния исследований распространения оптического излучения в условиях турбулентной атмосферы и влияния этих условий на оптическую связь показывает, что существующие методы обладают значительными недостатками. К числу этих недостатков относится ограниченная точность, отсутствие учета временной изменчивости атмосферных процессов и отсутствие адаптивности.

2. Разработана методика количественной оценки среднеквадратического блуждания луча вследствие влияния атмосферной турбулентности. Данная методика позволяет количественно оценить устойчивость спутниковой оптической связи к воздействию атмосферных явлений, обусловленных турбулентностью, то есть способность обеспечивать на заданном временном интервале требуемый уровень достоверности передачи данных.

3. Разработана методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, обусловленная влиянием атмосферной турбулентности. Данная методика основана на анализе распределения интенсивности излучения на апертуре приемника с учетом слоистой и вихревой структуры атмосферы. Методика позволяет количественно оценить значения распределения интенсивности и качественно отобразить закон перераспределения интенсивности по мере удаления от источника.

4. Разработана методика оценки обусловленных атмосферной турбулентностью энергетических потерь, использующая сочетание методики количественной оценки среднеквадратического блуждания луча и методики определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке, учитывающих как параметры атмосферы, так и ее вихревую структуру.

5. Предлагаемая методика оценки энергетических потерь повышает точность оценки показателей эффективности КРК, а именно, скорости генерации просеянной квантовой ключевой последовательности не менее чем в 1,2 раза, и, как следствие, коэффициента квантовых ошибок на бит.

Перспективным **направлением дальнейших исследований** является расширение разработанной методики оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью за счёт включения данных о климатических и метеорологических особенностях различных регионов Земли, для применения в задачах проектирования и анализа архитектуры сети, включающей группировку спутников и распределённую сеть наземных станций. Такое расширение позволит решать комплексные задачи оптимизации: выбора рабочих длин волн, параметров орбит космических аппаратов, планирования сеансов связи и размещения наземных терминалов с учётом пространственно-временных характеристик турбулентной атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Давыдов, С.Г.** Интернет в России в 2022-2023 годах. Состояние, тенденции и перспективы развития: Отраслевой доклад / С.Г. Давыдов, К.Р. Казарян, М.В. Сайкина; Под общей редакцией М.В. Сайкиной - Минцифры, 2023. - 207 с.
2. **Henniger, H.** An introduction to free-space optical communications / H. Henniger, O. Wilfert // Radioengineering. – 2010. – Vol. 19, Issue 2. – P. 203-212.
3. **Kedar, D.** Urban optical wireless communication networks: the main challenges and possible solutions / D. Kedar, S. Arnon // IEEE Communications Magazine. – 2004. – Vol. 42, Issue 5. – P. S2-S7. – DOI: 10.1109/MCOM.2004.1299334.
4. **Andrews, L.** Laser Beam Propagation Through Random Media / L. Andrews, R. Phillips. – SPIE, 2005. – 808 p. – DOI:10.1117/3.626196.
5. **Kaushal, H.** Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques / H. Kaushal, G. Kaddoum // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19, Issue 1. – P. 57-96. – DOI: 10.1109/COMST.2016.2603518.
6. **Toyoshima, M.** Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications / M. Toyoshima // Journal of Optical Networking. – 2005. – Vol. 4, Issue 6. – P. 300-311. – DOI: 10.1364/JON.4.000300.
7. **Древко, Д.Р.** Модификации электрооптического модулятора Маха–Цендера для управления лазерным излучением повышенной мощности / Д.Р. Древко, Ю.А. Зюрюкин, Н.М. Ушаков // Материалы V конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». – 2010. – С. 18-19.
8. **Kodheli, O.** Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges / O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S.K. Sharma, B. Shankar, J. Montoya, J.C. Merlano Duncan, D. Spano, S. Kisseleff, J. Querol, L. Lei, T. Vu, G. Goussetis // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Vol. 23, Issue 1. – P. 70-109. – DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247.

9. **Zhang, X.** The Security in Optical Wireless Communication: A Survey / X. Zhang, G. Klevering, X. Lei, Y. Hu, L. Xiao, G. Tu // ACM Computing Surveys. – 2023. – Vol. 55, Issue 14s. – P. 1-36. – DOI: 10.1145/3594718.
10. **Gisin, N.** Quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden // Reviews of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74, Issue 1. – P. 145-195. – DOI: 10.1103/RevModPhys.74.145.
11. **Bernstein, D.J.** Post-quantum cryptography / D.J. Bernstein, T. Lange // Nature. – 2017. – Vol. 549, Issue 7671. – P. 188-194. – DOI: 10.1038/nature23461.
12. **Boev, A.A.** Possibility of creating a modular system for quantum key distribution in the atmosphere / A.A. Boev, S.S. Vorobey, S.Y. Kazantsev et al. // Technical Physics Letters. – 2022. – Vol. 48, Issue 8. – P. 11-14. – DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55051.19192.
13. **Bolotov, D.V.** Modular Facility of Quantum Key Distribution in a Free Space / D.V. Bolotov, S.Y. Kazantsev; N.V. Pchelkina et al. // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2023. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017.
14. **Pirandola, S.** Advances in quantum cryptography / S. Pirandola, U.L. Andersen, S. Pirandola et al. // Advanced in Optics and Photonics. – 2020. – Vol. 12, Issue 4 – P. 1012-1236. – DOI: 10.1364/AOP.361502.
15. **Collins, R.** Progress in experimental quantum digital signatures / R. Collins, R. Donaldson, G. Buller // Quantum Communications and Quantum Imaging XVI. – 2018. – DOI: 10.1117/12.2319015.
16. **Shengkai, L.** Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network / L. Shengkai, W.-Q. Cai, J. Handsteiner, B. Liu, J. Yin, L. Zhang, D. Rauch, M. Fink, J. Ren, W. Liu, Y. Li, Q. Shen, Y. Cao, F.-Z. Li, F.-J. Wang, Y.-M. Huang, L. Deng, T. Xi, L. Ma, J.-W. Pan // Physical Review Letters. – 2018. – Vol. 120, Issue 3. – P. 030501. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.030501.
17. **Chen, Y.-A.** An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres / Y.-A. Chen et al // Nature. – 2021. – Vol. 589, Issue 7841. – P. 214-219. – DOI: 10.1038/s41586-020-03093-8.

18. **Bedington, R.** Progress in satellite quantum key distribution / R. Bedington, J. Mantilla, A. Ling // *npj Quantum Information*. – 2017. – Vol. 3, Issue 1. – DOI:10.1038/s41534-017-0031-5.
19. **Lu, C.-Y.** Micius quantum experiments in space / C.-Y. Lu et al // *Rev.Mod. Phys.* – 2022. – Vol. 94, Issue 3. – P. 035001. – DOI: 10.1103/RevModPhys.94.035001.
20. **Eso, E.** Impact of visibility limiting conditions on satellite and high-altitude platform quantum key distribution links / E. Eso, C. Simmons, G. Buller, R. Donaldson // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, Issue 15. – P. 26776-26792. – DOI: 10.1364/OE.527870.
21. **Fahey, T.** Laser Beam Atmospheric Propagation Modelling for Aerospace LIDAR Applications / T. Fahey, M. Islam, A. Gardi, R. Sabatini // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, Issue 7. – P. 918. – DOI: 10.3390/atmos12070918.
22. **Тимофеев, Ю.М.** Основы теоретической атмосферной оптики учебно-методическое пособие / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев; С.-Петерб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. физики атмосферы, Приоритет. нац. проект Образование. — Санкт-Петербург: [б.и.], 2007. — 151, [1] с. ил.; 21. — (Проект "Инновационная образовательная среда в классическом университете"); ISBN 978-5-98340-131-0.
23. **Зуев, В.Е.** Атмосферная оптика Т. 5. Оптика турбулентной атмосферы / В.Е. Зуев, В.А. Банах, В.В. Покасов // Л.: Гидрометеиздат, 271 с. – 1988.
24. **Muskan, R.M.** Analysing QBER and secure key rate under various losses for satellite based free space QKD / R.M. Muskan, R. Meena, S. Banerjee. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2308.01036.
25. **Hosseinidehaj, H.** Continuous-variable quantum communication over free-space lossy channels: Ph.D. thesis / Nedasadat Hosseinidehaj. – UNSW Sydney, 2017.
26. **Sidorovich, V.G.** Solar background effects in wireless optical communications / V.G. Sidorovich // *Optical Wireless Communications V*. – 2002. – Vol. 4873, Issue 8. – P. 133-142. – DOI: 10.1117/12.456303.
27. **William, D.C.** Effects of increased near-infrared absorption by water vapor on the climate system / D.C. William, J.M. Lee -Taylor, D.P. Edwards, G.L. Francis //

Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2006. – Vol. 111, Issue D18. – P. ARTN D18109. – DOI: 10.1029/2005JD006796.

28. **Alkholidi, A.G.** Climate effects on performance of free space optical communication systems in Yemen / A.G. Alkholidi, K.S. Altowij // *Frontiers of Optoelectronics*. – 2014. – Vol. 7, Issue 1 – P. 91-101. – DOI: 10.1007/s12200-014-0392-8.

29. **Mohd, N.** Atmospheric Effects on Free Space Earth-to-Satellite Optical Link in Tropical Climate / N. Mohd, Md. Islam, W. Al-Khateeb, S. Ahmad Zabidi // *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*. – 2013. – Vol. 3, Issue 1. – P. 17-36. – DOI: 10.5121/ijcsea.2013.3102.

30. **Self, S.A.** Focusing of spherical Gaussian beams / S.A. Self // *Appl Opt.* – 1983. – Vol. 22, Issue 5. – P. 658-661. – DOI: 10.1364/ao.22.000658.

31. **Neuman, B.W.** Supramolecular architecture of severe acute respiratory syndrome coronavirus revealed by electron cryomicroscopy / B.W. Neuman et al // *Journal of virology*. – 2006. – Vol. 80, Issue 16. – P. 7918-7928. – DOI: 10.1128/JVI.00645-06.

32. **Long, R.K.** Atmospheric attenuation of ruby lasers // *Proc. of the IEEE*. – 1963. – Vol. 51, Issue 5. – P. 859–860. – DOI: 10.1109/proc.1963.2294.

33. **Langer, R.M.** Effects of atmospheric water vapour on near infrared transmission at sea level // in Report on Signals Corps Contract DA-36-039-SC-723351, J.R.M. Bege Co., Arlington, Mass. – 1957.

34. **Popoola, W.** Optical Wireless Communications: System and Channel / W. Popoola, S. Rajbhandari // *Optical Wireess Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*. – 2012. – DOI: 10.1201/b12687.

35. **Kneizys, F.** Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6. Supplement: Program Listings // F. Kneizys, E. Shettle, W. Gallery, C. Jr, L. Abreu. – 1983. – P. 197.

36. **Accetta, J.S.** The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Atmospheric Propagation of Radiation, Volume 2. – 1993.

37. **Михайленко, С.Н.** Информационно-вычислительная система Спектроскопия атмосферных газов. Структура и основные функции / С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабилов, В.Ф. Головки // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 09. – С. 765-776.
38. **Кикоин, А.К.** Молекулярная физика. М. / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – 1996.
39. **Глаголев, Ю.А.** Справочник по физическим параметрам атмосферы / Ю.А. Глаголев. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 212 с.
40. **Hugo, W.**, Laser Beam Propagation in the Atmosphere, Volume TT 3. (Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1990). ISBN: 9780819404879.
41. ITU-R, «Propagation data required for the design of earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz» no. Radiocommunication P. 1622, 2003.
42. **Willebrand, H. A.** Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks / H.A. Willebrand, S.G. Baksheesh. – 2001.
43. **Hemmati, H.** Deep-Space Optical Communications: Future Perspectives and Applications / H. Hemmati, A. Biswas, I. Djordjevic // Proceedings of the IEEE. – 2011. – Vol. 99, Issue 11. – P. 2020-2039. – DOI: 10.1109/JPROC.2011.2160609.
44. **Миронов, А.В.** Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. Учебное пособие. М.: Изд-во ТОО «ЭДЭМ». 1997.- 157.
45. **Maharjan, N.** Atmospheric Effects on Satellite–Ground Free Space Uplink and Downlink Optical Transmissions / N. Maharjan, N. Devkota, B.W. Kim // Applied Sciences. – 2022. – V. 12, Issue 21. – P. 10944. – DOI: 10.3390/app122110944.
46. **Medina, I.** On the Impact of Atmospheric Turbulence on OOK and BPSK Modulation Schemes for Satcom Optical Uplink / I. Medina, J.J. Hernández-Gómez, C. Couder Castañeda. – 2023. – DOI: 10.21203/rs.3.rs-3044900/v1.
47. **Medina, I.** Impact of atmospheric turbulence on OOK and BPSK modulations for satcom optical uplink / I. Medina, J.J. Hernández-Gómez, C. Couder-Castañeda // Telecommun. Syst. – 2024. – V. 86, Issue 1. – P. 25-37. – DOI: 10.1007/s11235-024-01103-y.

48. **Kim, I.I.** Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems / I.I. Kim, E.J. Korevaar // Optical Wireless Communications IV. – 2001. – Vol 4530. – P. 84-95. – DOI: 10.1117/12.449800.
49. **Григоров, Н.О.** Методы и средства метеорологических измерений / Н.О. Григоров, А.Г. Саенко, К.Л. Восканян. – С-Пб.; 2012, 306с.
50. **Uysal, M.** Optical Wireless Communications – An Emerging Technology / M. Uysal, C. Capsoni, A. Boucouvalas, E. Udvary. – 2017. – DOI: 10.1007/978-3-319-30201-0.
51. Архив погоды, METAR. <https://rp5.ru>.
52. Распоряжение Правительства РФ от 10.08.2007 N 1034-р (ред. от 27.12.2023) «Об утверждении перечня аэродромов совместного базирования Российской Федерации».
53. **Ghassemlooy, Z.** Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with Matlab® / Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari // CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 2019. – P. 115-128. – DOI: 10.1201/9781315151724.
54. **Kim, I.I.** Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications / I.I. Kim, B. McArthur, E.J. Korevaar // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26-37. – DOI: 10.1117/12.417512.
55. **Dada, A.C.** Near-maximal two-photon entanglement for optical quantum communication at 2.1 μm / A.C. Dada, J. Kaniewski, C. Gawith et al. // Phys. Rev. Applied. – 2021. – Vol. 16, Issue 5. – P. L051005. – DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.L051005.
56. **Temporao, G.** Feasibility study of free-Space quantum key distribution in the mid-infrared / G. Temporao, H. Zibinden, S. Tanzilli et al. // Quantum Information and Computation. – 2008. – Vol 8, Issue 1. – P. 1-11. – DOI: 10.26421/QIC8.1-2-1.
57. **Williams, W.D.** RF and optical communications: A comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 timeframe / W.D. Williams, M. Collins, D. Boroson et al. // 12th Ka and Broadband Communications Conference. – 2007, № E-15723.

58. **Trichili, A.** Roadmap to free space optics / A. Trichili, M. Cox, B. Ooi, M.-S. Alouini // Journal of the Optical Society of America B. – 2020. – Vol. 37, Issue 11. – P. A184-A201. – DOI: 10.1364/JOSAB.399168.
59. **Ghassemlooy, Z.** Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB / Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari. – CRC Press, 2012. – 576 p. – DOI: 10.1201/b12687.
60. **Шиховцев, А.Ю.** Вертикальные профили оптической турбулентности и оценка внешнего масштаба турбулентности над Байкальской астрофизической обсерваторией / А.Ю. Шиховцев, П.Г. Ковадло // Оптика атмосферы и океана. – 2024. – Т. 37, № 9. – С. 808-814. – DOI: 10.15372/AOO20240912.
61. **Atiyah, M.** PDF Comparison based on Various FSO Channel Models under Different Atmospheric Turbulence / M. Atiyah, L.F. Abdulameer, G. Narkhedel // Al-Khwarizmi Engineering Journal. – 2023. – Vol. 9, Issue 4. – P. 78-89. – DOI: 10.22153/kej.2023.09.004.
62. **Beland, R.R.** Propagation through Atmospheric Optical Turbulence / R.R. Beland // in The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. – SPIE Press, 1993. – 322 p.
63. **Good, R.E.** Atmospheric models of optical turbulence / R.E. Good, R.R. Beland, E.A. Murphy, J.H. Brown, E.M. Dewan // Proc. SPIE 0928. – 1988. – P. 165-186. – DOI: 10.1117/12.975626.
64. **Банах, В.А.** Влияние дифракционного размера апертуры и спектра турбулентности на флуктуации интенсивности лазерного излучения / А.В. Банах, В.Л. Миронов // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5, № 7. – С. 1535-1542.
65. **Oh, E.S.** Optical turbulence model for laser propagation and imaging applications / E.S. Oh, J.C. Ricklin, G.C. Gilbreath et al. // Proceedings Vol. 5160, Free Space Laser Comm. and Active Laser Illumina. III. – 2004. – DOI: 10.1117/12.504556.
66. **Гурвич, А.С.** Простая модель для расчета турбулентных помех в оптических системах / А.С. Гурвич, М.Е. Грачева // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1980. – Т. 16, № 10. – С. 1107-1111.

67. **Greenwood, D.P.** Bandwidth specification for adaptive optics systems / D.P. Greenwood // Journal of the Optical Society of America. – 1977. – Vol. 67, Issue 3. – P. 390-393. – DOI: 10.1364/JOSA.67.000390.
68. **Parenti, R.R.** Laser-guide-star systems for astronomical applications / R.R. Parenti, R.J. Sasiela // Journal of the Optical Society of America. – 1994. – Vol. 11, Issue 1. – P. 288-309. – DOI: 10.1364/JOSAA.11.000288.
69. **Hufnagel, R.E.** Variations of atmospheric turbulence / R.E. Hufnagel // Topical Meeting on Optical Propagation through Turbulence in Proc IEEE. – 1974. – P. 76-80.
70. **Большасова, Л.А.** Аналитические модели высотной зависимости структурной постоянной показателя преломления турбулентной атмосферы для задач адаптивной оптики / Л.А. Большасова, В.П. Лукин // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 11. – С. 918–925. – DOI: 10.15372/AOO20161104.
71. **Phehlukwayo, S.P.** Influence of coincidence detection through free-space atmospheric turbulence using partial spatial coherence / S.P. Phehlukwayo, M.L. Umuhire, Y. Ismail et al // Physical Review A. – 2020. – Vol. 102, Issue 3. – P. 033732. – DOI: 10.48550/arXiv.2006.12911.
72. **Andrews, L.** Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles / L. Andrews, R. Phillips, C.Y. Hopen // Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, Issue 12. – P. 3272-3280. – DOI: 10.1117/1.1327839.
73. **Al-Habash, A.** Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media / A. Al-Habash, L.C. Andrews, R.L. Phillips // Optical Engineering. – 2001. – Vol. 40, Issue 8. – P. 1554-1562. – DOI: 10.1117/1.1386641.
74. **Giggenbach, D.** Fading-loss assessment in atmospheric free-space optical communication links with on-off keying / D. Giggenbach, H. Henniger // Optical Engineering. – 2008. – Vol. 47, Issue 6. – P. 046001. – DOI: 10.1117/1.2951952.
75. **Andrews, L.** Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model / L.C. Andrews, M.A. Al-Habash, C.Y. Hopen, R.L. Phillips // Waves in Random Media. – 2001. – Vol. 11, Issue 3. – P. 271-291. – DOI: 10.1080/13616670109409785.

76. **Barrios, R.** Exponentiated Weibull fading channel model in free-space optical communications under atmospheric turbulence: Pd.D. thesis / Ricardo Barrios. – Barcelona, Universitat Politècnica De Catalunya, 2013. – 158 p.
77. **Chatzidiamantis, N.D.** New results on turbulence modeling for free-space optical systems / N.D. Chatzidiamantis, H.G. Sandalidis, G.K. Karagiannidis et al. // IEEE International Conference on Telecommunications (ICT). – 2010. – P. 487-492. – DOI: 10.1109/ICTEL.2010.5478872.
78. **Jurado-Navas, A.** General analytical expressions for the bit error rate of atmospheric optical communication systems / A. Jurado-Navas, J.M. Garrido-Balsells, J.F. Paris et al. // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36, Issue 20. – P. 4095-4097. – DOI: 10.1364/OL.36.004095.
79. **Kaur, K.** The Gamma-Gamma Channel Model - A Survey / K. Kaur, R. Miglani, J.S. Malhotra // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9, Issue 47. – P. 1-4. – DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i1/106796.
80. **Churnside, J.H.** Experimental evaluation of log-normally modulated Rician and I-K models of optical scintillation in the atmosphere / J.H. Churnside, R.G. Frehlich // Journal of Optical Society of America (JOSA) A. – 1989. – Vol. 6, Issue 11. – P. 1760-1766. – DOI: 10.1364/JOSAA.6.001760.
81. **Goodwin, F.E.** A review of operational laser communication systems / F.E. Goodwin // Proceedings of the IEEE. – 1970. – Vol. 58, Issue 10. – P. 1746-1752. – DOI: 10.1109/PROC.1970.7998.
82. **Jakeman, E.** Significance of K distributions in scattering experiments / E. Jakeman, P. Pusey // Physical Review Letters. – 1978. – Vol. 40, Issue 9. – P. 546-550. – DOI: 10.1103/PhysLett.40.546.
83. **Churnside, J.H.** Probability density of irradiance scintillations for strong path-integrated refractive turbulence / J.H. Churnside, R.J. Hill // Journal of the Optical Society of America A. – 1987. – Vol. 4, Issue 4. – P. 727-733. – DOI: 10.1364/JOSAA.4.000727.
84. **Mclaren, J.R.W.** Comparison of probability density functions for analyzing irradiance statistics due to atmospheric turbulence / J.R.W. McLaren, J.C. Thomas, J.L.

Mackintosh et al. // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, Issue 25. – P. 5996-6002. – DOI: 10.1364/AO.51.005996.

85. **Barrios, R.** Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves / R. Barrios, F. Dios // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 12. – P. 13055-13064. – DOI: 10.1364/OE.20.013055.

86. **Vetelino, F.S.** Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-to-strong turbulence / F.S. Vetelino, C. Young, L. Andrews // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46, Issue 18. – P. 3780–3789. – DOI: 10.1364/ao.46.003780.

87. **Lachinova, S.L.** Giant irradiance spikes in laser beam propagation in volume turbulence: Analysis and impact / S.L. Lachinova, M.A. Vorontsov // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 2. – P. 025608. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/2/025608.

88. **Perlot, N.** Evaluation of the Scintillation Loss for Optical Communication Systems with Direct Detection / N. Perlot // *Optical Engineering*. – 2007. – Vol. 46, Issue 2. – P. 025003. – DOI: 10.1117/1.2436866.

89. **Giggenbach, D.** Scintillation loss in optical low earth orbit data downlinks with avalanche photodiode receivers / D. Giggenbach, F. Moll // 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). – 2017. – P. 115-122. – DOI: 10.1109/ICSOS.2017.8357220.

90. **Kaushal, H.** Free Space Optical Communication / H. Kaushal, V.K. Jain, S. Kar. – Springer, 2017. – 209 p. – DOI: 10.1007/978-81-322-3691-7.

91. **Zhao, S.** Optimum transmitter radius for ground-to-satellite laser uplink communication systems in the presence of beam wander effect / S. Zhao, B. Luo, A. Dang, H. Guo // 2010 Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications. – 2010. – DOI: 10.1364/LSC.2010.LSMD2.

92. **Kaushal, H.** Experimental Investigation of Optimum Beam Size for FSO Uplink / H. Kaushal, G. Kaddoum, V.K. Jain, S. Kar // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 400 – P. 106-114. – DOI: 10.1016/j.optcom.2017.05.009.

93. **Kar, S.** Analysis of earth-to-satellite free-space optical link performance in the presence of turbulence, beam-wander induced pointing error and weather conditions for different intensity modulation schemes / S. Kar, A. Viswanath, V. Jain // *IET*

Communications. – 2015. – Vol. 9, Issue 18. – P. 2253-2258. – DOI: 10.1049/iet-com.2015.0379.

94. **Стробен, Д.** Распространение лазерного пучка в атмосфере / Д. Стробен. – М.: Мир, 1981. – 414 с.

95. **Лапин, А.П.** Вихревой метод измерения расхода: Модели вихреобразования и современные средства моделирования / А.П. Лапин, А.М. Дружков, К.В. Кузнецова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Том 14, №4. – С. 28-34.

96. **Roshko, A.** On the development of turbulent wakes from vortex streets. – 1953. – DOI: 10.7907/4WDN-9807.

97. **Kaushal, H.** Free-space optical channel models / H. Kaushal, V.K. Jain, S. Kar // Free space optical communication. – 2017. – P. 41-89. – DOI: 10.1007/978-81-322-3691-7_2.

98. **Hocking, W.K.** Measurement of turbulent energy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques: a review / W.K. Hocking // Radio Science. – 1985. – Vol. 20, Issue 6. – P. 1403-1422. – DOI: 10.1029/RS020i006p01403.

99. **Банах, В.А.** Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере / В.А. Банах, В.Л. Миронов. – Новосибирск. Наука, 1986. – 173 с.

100. **Xiang, N.J.** Intensity correlation of Gaussian Schell-model beam on slant turbulent atmosphere / N.J. Xiang, Z.S. Wu, X.-X. Hua, M.J. Wang // Proceedings Volume 8906, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems. – DOI: 10.1117/12.2035608.

101. ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная. Параметры».

102. ГОСТ 24728-81 Ветер. Пространственное и временное распределение характеристик.

103. **Charles, H.B.** Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing / H.B. Charles, B. Gilles. – 2020. – DOI: arXiv:2003.06557.

104. **Charles, H.B.** Quantum cryptography using any two nonorthogonal states / H.B. Charles // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68, Issue 21. – P. 3121-3124. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.3121.
105. **Artur, K.E.** Quantum cryptography based on bell's theorem / K.E. Artur // *Physical Review Letters.* – 1991. – Vol. 67, Issue 6. – P. 661-663. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.661.
106. **Аверьянов, В.С.** Гибридный квантово-классический подход для защиты наземных линий связи / В.С. Аверьянов, И.Н. Карцан // *Южно-Сибирский научный вестник.* – 2019. – Т. 4, № 28. – С. 264-269. – DOI: 10.25699/SSSB.2019.2846385.
107. **Агеева, Е.С.** Защищенный протокол для передачи данных в спутниковой связи / Е.С. Агеева, И.Н. Карцан // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики.* – 2015. – Т. 1, №11. – С. 68-70.
108. **Bennett, C. H.** Quantum cryptography using any two no orthogonal states / C.H. Bennett // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68, Issue 21. – P. 3121-3124. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.3121.
109. **Tan, X.** Introduction to Quantum cryptography. – 2013. – DOI: 10.5772/56092.
110. **Khmelev, A.V.** Eurasian-scale experimental satellite-based quantum key distribution with detector efficiency mismatch analysis / A.V. Khmelev et al. // *Optics Express.* – 2024. – Vol. 32, Issue 7. – P. 11964-11978. – DOI: 10.1364/OE.511772.
111. **Khmelev, A.V.** Semi-empirical satellite-to-ground quantum key distribution model for realistic receivers / A.V. Khmelev et al. // *Entropy.* – 2023. – Vol. 25, Issue 4. – P. 670. – DOI: 10.3390/e25040670.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО
РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)



MINISTRY OF DIGITAL
DEVELOPMENT,
COMMUNICATIONS
AND MASS MEDIA OF
THE RUSSIAN FEDERATION

MOSCOW TECHNICAL
UNIVERSITY
OF COMMUNICATIONS
AND INFORMATICS
(MTUCI)

ул. Авиамоторная, д. 8а, Москва, 111024,
www.mtuci.ru; mtuci.pf; e-mail: kanc@mtuci.ru
Телефон (495) 957-77-31; факс (495) 957-77-36

ОГРН 1027700117191; ИНН/КПП 7722000820/772201001; ОКПО 01179952;
ОКВЭД 85.22, 46.19, 58.19, 61.10, 68.32, 72.19, 85.21, 85.23, 85.42.9, 71.20, 33.13, 26.60 ; ОКТОМ 45388000

16.09 2025 № 3181/02-17
На № _____ от _____

проректор по научной работе
доктор технических наук, профессор

УТВЕРЖДАЮ

Ю.Л. Леохин

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Сапожникова Максима Вячеславовича

«Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с
учетом атмосферной турбулентности»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебном
процессе по кафедре «Направляющие телекоммуникационные среды» МТУСИ

Комиссия в составе: председатель - зав. кафедрой НТС, доцент Колесников О.В.;
члены - профессор Кузнецова Н.С. и профессор Казанцев С.Ю. составили настоящий акт в
том, что результаты диссертационной работы:

методика количественной оценки среднеквадратического смещения блуждания луча;

методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке;

методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной
турбулентностью

использованы в учебно-исследовательской работе бакалавров и магистров кафедры НТС,
при курсовом проектировании по дисциплинам «Направляющие телекоммуникационные
среды и методы их защиты» и «Направляющие среды передачи квантовых сигналов в
свободном пространстве».

Председатель комиссии:

Колесников О.В.

Члены комиссии:

Кузнецова Н.С.

Казанцев С.Ю.



ООО «КуРэйт»
121205, г. Москва, вн.тер.
г. Муниципальный Округ Можайский,
тер Инновационного центра Сколково,
Б-р большой, д. 30 стр. 1
ОГРН 1155032004346
ИНН/КПП 5032203330 /773101001

Тел: +7 (495) 280 1291
e-mail: mail@goqrates.com
<http://goqrates.com>

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы М.В. Сапожникова

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Сапожникова Максима Вячеславовича на тему: «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности» использованы в ООО «КуРэйт».

Использованы следующие результаты диссертационной работы М.В. Сапожникова:

- методика количественной оценки среднеквадратического смещения блуждания луча;
- методика определения изменений распределения интенсивности излучения в пучке;
- методика оценки энергетических потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью.

Руководитель проекта

Технический директор ООО «КуРэйт»

Утверждаю

Генеральный директор ООО «КуРэйт»

И.Д. Павлов



А.К. Федоров

16.09.2025

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «КуСпэйс Технологии»
П.Е. Варобьев
2025 г.



АКТ

О практическом применении результатов диссертационной работы
Сапожникова Максима Вячеславовича на тему: «Методика оценки потерь в
спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной
турбулентности» в ООО «КуСпэйс Технологии».

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Сапожникова М.В. на тему «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности» обладают высокой актуальностью и практической значимостью, что позволило использовать их при оценке эффективности спутниковых оптических систем с КРК.

Предложенная методика оценки энергетических потерь обеспечивают более точное соответствие расчётных показателей эффективности КРК данным натурных экспериментов. Это, в свою очередь, позволило повысить точность оценки энергетического бюджета систем спутниковой оптической связи. Полученные в ходе диссертационного исследования результаты были использованы для обоснования технико-экономической целесообразности развертывания наземных станций спутниковых систем КРК.

Технический руководитель проекта
ООО «КуСпэйс Технологии»



Р.М. Бахшалиев

г. Москва



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «Мостком»

С.Ю. Поляков

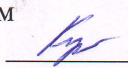
09 2025 г.

АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы**

Настоящий акт подтверждает, что научные и практические результаты, полученные соискателем Сапожниковым Максимом Вячеславовичем в ходе выполнения диссертационной работы по теме «Методика оценки потерь в спутниковых системах квантовых коммуникаций с учетом атмосферной турбулентности» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, использованы в Акционерном обществе «Мостком» (АО «Мостком»).

Созданный Сапожниковым М.В. программный комплекс, реализующий предложенную методику оценки энергетических потерь, применяется для моделирования оптических каналов связи и представляет интерес для специалистов в области лазерной связи с целью внедрения расчётных моделей в проектные процедуры компаний, разрабатывающих системы беспроводной оптической связи.

Директор по информационным технологиям
АО «Мостком»


С.Н. Кузнецов

г. Рязань

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024660809

Программа оценки бюджета вертикальной оптической
линии связи

Правообладатель: *Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский технический
университет связи и информатики» (RU)*

Авторы: *Сапожников Максим Вячеславович (RU), Миронов
Юрий Борисович (RU), Терехин Дмитрий Николаевич (RU),
Казанцев Сергей Юрьевич (RU)*



Заявка № 2024618693

Дата поступления 22 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 мая 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619971

Программа расчета вертикальных атмосферных профилей

Правообладатель: *Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский технический
университет связи и информатики» (RU)*

Авторы: *Сапожников Максим Вячеславович (RU), Миронов
Юрий Борисович (RU), Терехин Дмитрий Николаевич (RU),
Казанцев Сергей Юрьевич (RU)*



Заявка № 2024618714

Дата поступления 22 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 мая 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3953164baf96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619362

**Программа энергетического расчета линий «вниз» и
«вверх» для спутниковой системы связи**

Правообладатель: *Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский технический
университет связи и информатики» (RU)*

Авторы: *Сапожников Максим Вячеславович (RU), Миронов
Юрий Борисович (RU), Терехин Дмитрий Николаевич (RU)*



Заявка № 2024617543

Дата поступления 10 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 апреля 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3953164baf96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024618934

Программный комплекс FSO

Правообладатель: *Ордена Трудового Красного Знамени
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский технический университет связи и
информатики» (RU)*

Авторы: *Сапожников Максим Вячеславович (RU), Миронов
Юрий Борисович (RU), Терехин Дмитрий Николаевич
(RU), Казанцев Сергей Юрьевич (RU)*



Заявка № 2024618141

Дата поступления 17 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 апреля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3953164baf96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов