

ПРИМЕНЕНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЮЖНОЙ АФРИКИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-1-32-41

Казанцев Сергей Юрьевич,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, s.i.kazantsev@mtuci.ru

Сапожников Максим Вячеславович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, m.v.sapozhnikov@mtuci.ru

Миронов Юрий Борисович,
Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, i.b.mironov@mtuci.ru

Боков Павел Михайлович,
Южноафриканская корпорация по ядерной энергии, Пелиндаба,
ЮАР; Северо-Западный университет, Почефструм, ЮАР,
pavel.bokov@necs.co.za; pavel.bokov@nwu.ac.za

Manuscript received 28 September 2025;
Accepted 30 November 2025

Ключевые слова: оптическая связь в свободном пространстве, атмосферные оптические линии связи, квантовое распределение ключей, безопасность промышленных комплексов, гибридные линии связи, доступность канала связи

В работе проводится оценка возможности использования терминалов атмосферной оптической связи для обеспечения высокоскоростной и защищённой передачи данных на объектах атомной энергетики и научных центрах Южной Африки, расположенных в районах Кейптауна и Претории. Дано подробное описание методик определения затухания сигналов на оптической трассе в разных погодных условиях. На основе 15-летних метеорологических данных проанализировано влияние ключевых климатических параметров на устойчивость оптического канала связи. Учитывая, что погодные условия в прибрежных регионах могут существенно зависеть от крупномасштабных океанических явлений, в исследовании также рассмотрено влияние течений Эль-Ниньо на локальную метеорологию в зонах размещения рассматриваемых объектов ЮАР. Показано, что в данных регионах системы атмосферной оптической связи обладают высоким потенциалом, как в качестве основного, так и резервного канала связи, особенно на дистанциях до 1 км. Расчеты доступности выполнены для коммерческих терминалов, для которых может быть реализовано сопряжение с оборудованием квантового распределения ключей, разработанного для волоконно-оптических линий связи. Показано, что значительные преимущества систем атмосферной оптической связи через такие терминалы представляет их совместимость с технологиями квантового распределения ключей и реализации гибридных систем связи, что открывает возможности для создания принципиально нового уровня информационной безопасности на критически важных энергетических объектах.

Информация об авторах:

Казанцев Сергей Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры "Направляющие телекоммуникационные среды", Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Сапожников Максим Вячеславович, инженер, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Миронов Юрий Борисович, к.т.н., начальник НИО "Перспективные технологии в сфере телекоммуникаций", Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Боков Павел Михайлович, к.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Южноафриканская корпорация по ядерной энергии, Пелиндаба, ЮАР; внештатный, доцент, Северо-Западный университет, Почефструм, ЮАР

Для цитирования:

Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Боков П.М. Применение атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики с учетом климатических особенностей Южной Африки // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №1. С. 32-41.

For citation:

S. Y. Kazantsev, M. V. Sapozhnikov, Y. B. Mironov, P. M. Bokov, "Application of atmospheric optical communications at nuclear power facilities, taking into account the climatic features of South Africa", *T-Comm*, 2026, vol. 20, no.1, pp. 32-41. (in Russian)

1 Введение

Современные промышленные и энергетические комплексы характеризуются ускоренной цифровизацией, автоматизацией и возможностью удалённого управления, что повышает требования к скорости, надёжности и защищённости передачи данных [1]. Особенно критичны эти требования для объектов повышенного риска, где перебои связи могут повлечь серьёзные экономические или экологические последствия [2]. В таких условиях актуальны гибридные коммуникационные архитектуры, объединяющие различные каналы передачи, что повышает отказоустойчивость и суммарную пропускную способность, что особенно важно для крупных промышленных центров и развитии концепции «умных» городов [3, 4]. Тенденции развития такого комбинированного подхода к развитию инфраструктуры связи подтверждают наукометрические исследования тематик работ, обсуждаемых в последнее время на научных конференциях в области связи [5, 6]. Следует отметить, что для объектов энергетики и сложных инфраструктурных объектов значительный интерес представляет обеспечение точной синхронизации систем связи и их защита [7, 8].

На фоне угрозы квантовых атак в отношении традиционных криптосистем возрастает интерес к квантовому распределению ключей (КРК), технологии, обеспечивающей безопасность даже при наличии квантовых компьютеров [9,10]. Это делает особенно востребованными каналы связи, совместимые с КРК и обеспечивающие высокий уровень физической защиты.

Одним из перспективных решений для таких задач являются системы атмосферной оптической связи (АОЛС), сочетающие высокую скорость передачи данных и устойчивость к несанкционированному перехвату передаваемой информации [11, 12]. Однако эффективность АОЛС сильно зависит от состояния атмосферы. Ключевыми факторами, влияющими на качество канала, являются:

1. Атмосферное поглощение, возникающее вследствие взаимодействия лазерного излучения с молекулами газов, содержащихся в воздухе (в первую очередь, водяного пара, углекислого газа и озона) [13];

2. Атмосферное рассеяние, которое может быть разделено на два основных типа. Рэлеевское, характерное для частиц, размеры которых значительно меньше длины волны излучения, и Ми, наблюдаемое при взаимодействии со средами, где размеры частиц сравнимы с длиной волны. Последнее является доминирующим условием наличия аэрозольных загрязнений, туманов или пыли [13];

3. Турбулентные неоднородности атмосферы приводят к пространственным флуктуациям фазы и амплитуды оптического излучения, что проявляется в отклонении направления распространения лазерного пучка и перераспределении его интенсивности в плоскости приёмной апертуры [14-16].

Помимо описанных эффектов, особое внимание следует уделять влиянию осадков: крупные капли дождя вызывают значительное рассеяние и поглощение, что может привести к временному разрыву связи или снижению скорости передачи [17, 18].

В работе проводится оценка технико-экономической целесообразности применения атмосферных оптических линий связи в условиях объектов использования атомной энергии

(ОИАЭ), расположенных на территории Южно-Африканской Республики. На основе методик [2, 11, 12] проведено численное моделирование годовой доступности АОЛС с использованием 15-летних метеоданных для регионов Кейптауна и Претории. Расчёты выполнены для трёх типов терминалов компании «Мостком», которые выпускаются достаточно крупными сериями (M1-10GE, M1-GE-L, M1-GE-SL) [19]. Исследования, проводившиеся с участием разработчиков этих терминалов, показали возможность совместимости подобных терминалов с КРК-оборудованием [20, 21]. Следует заметить, что выбранные терминалы АОЛС осуществляют прием и передачу данных в полосе 1550 нм, данный спектральный диапазон является безопасным для глаз и меньше подвержен эффектам рассеяния в атмосфере, чем альтернативные системы АОЛС, работающие на длине волны 850 нм. Основным критерием оценки целесообразности применения систем связи на базе АОЛС выступает годовая доступность оптического канала, определяемая климатическими условиями и энергетическим запасом системы [2, 12].

2 Метеорологические особенности региона расположения ОИАЭ ЮАР

Для анализа перспектив применения АОЛС на ОИАЭ ЮАР, согласно методикам, описанным в [2, 11, 12], необходимо оценить доступность атмосферной связи в течение календарного года. Для оценки доступности необходимо иметь представление о многолетней статистике метеорологических данных по конкретному региону расположения ОИАЭ.

Внедрение комплексного анализа климатических характеристик потенциального региона размещения терминалов атмосферной оптической связи, включая метеорологическую дальность видимости, осадки, температуру и атмосферное давление, является критически важным на этапе проектирования системы [2].

Такой подход позволяет заранее оценить влияние внешних факторов на качество распространения лазерного излучения и обеспечить необходимые технические решения для компенсации неблагоприятных условий, повысить надёжность функционирования систем АОЛС и организовать эффективное резервирование. Особенно это актуально при внедрении технологий, таких как квантовое распределение ключей, где стабильные атмосферные условия играют критическую роль в успешной реализации защищённого канала передачи информации [22].

На основе информации из открытых источников в ЮАР существует одна действующая атомная электростанция - АЭС Кёберг (Koeberg) [23]. АЭС Кёберг расположена на побережье Атлантического океана, в 30 км к северу от Кейптауна. Она состоит из двух реакторов типа PWR (реакторы с водой под давлением). Общая мощность станции составляет 1880 МВт [23].

В ЮАР расположен главный ядерный исследовательский центр Южной Африки, управляемый Южноафриканской корпорацией по ядерной энергии (Necsa) Пелиндаба (Pelindaba) [24]. Он расположен в 33 км к западу от Претории и эксплуатирует исследовательский реактор SAFARI-1 для научных исследований и производства радиоизотопов [25].

Метеорологическая дальность видимости

Доступность атмосферной оптической линии связи существенно снижается при ухудшении метеорологических условий, в частности, при наличии пыли, туманов и осадков, что количественно характеризуется метеорологической дальностью видимости (МДВ) [26]. МДВ традиционно используется как ключевой показатель коэффициента пропускания атмосферы для оптического излучения [26]. При этом повышение энергетического запаса (т.е. запаса усиления) приёмопередающих терминалов позволяет частично компенсировать ослабление сигнала в неблагоприятных метеорологических условиях, что позволяет увеличить предельную длину трассы при требуемом уровне доступности [2].

Метеорологическая дальность видимости представляет собой случайную величину, статистические характеристики которой определяются временной динамикой, географическим положением и метеорологическими факторами [26]. Тем не менее, при отсутствии прямых измерений в потенциальном регионе размещения терминалов АОЛС, необходимо использовать архивные данные ближайших метеорологических станций для оценки вероятностных характеристик МДВ. На основе многолетней статистики возможно выделение устойчивых закономерностей изменения МДВ [12].

В частности, для территории АЭС Кёберг, обработанная статистика МДВ за период 2010-2024 гг. [27] представлена на рис. 1.

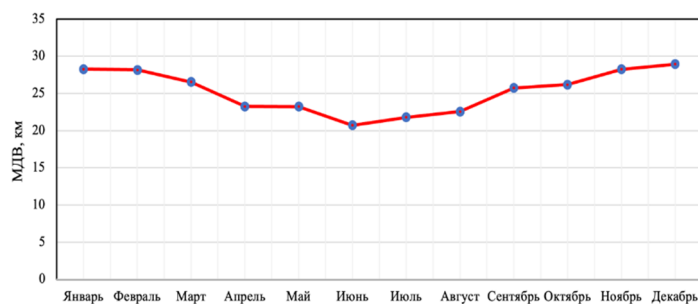


Рис. 1. Среднемесячные значения метеорологической дальности видимости, усреднённые за период 2010-2024 гг., для района АЭС Кёберг

На основании анализа многолетних данных метеорологической дальности видимости за 2010-2024 гг. (рис. 1) можно сделать вывод о том, что регион вокруг АЭС Кёберг, расположенный в Кейптауне, обладает благоприятными условиями для применения атмосферной оптической связи. Средние значения МДВ остаются достаточно высокими (20-30 км) на протяжении всего года, что обеспечивает стабильность распространения лазерного излучения.

Однако следует учитывать сезонные колебания МДВ, особенно в зимние месяцы (июнь-август), когда её значение может снижаться до 20-22 км. Очевидно, требование к величине МДВ необходимой для организации связи в режиме прямой видимости зависит от дистанции, на которой планируется организовать передачу данных. Предварительным (грубым) условием целесообразности использования АОЛС на трассе длиной L является превышение метеорологической дальности видимости параметра L .

В среднем за период наблюдений (2010-2024 гг.) метеорологическая дальность видимости в районе станции Кёберг

(Кейптаун) остаётся достаточно высокой в течение всего года, что свидетельствует о хорошей прозрачности атмосферы. Однако в отдельные дни и часы МДВ может резко снижаться, в первую очередь из-за туманов, дымки и осадков, что приводит к значительному разбросу значений дальности видимости. В данных условиях дисперсия среднемесячных значений МДВ не является информативной характеристикой для оценки доступности оптической линии связи, поскольку она маскирует экстремальные события.

Более информативным показателем является среднегодовая частота (в днях или часах), с которой метеорологическая дальность видимости снижается ниже критического порога, определяемого энергетическим запасом системы на заданной дистанции [11, 12].

Именно этот параметр целесообразно использовать при оценке доступности атмосферной оптической линии связи. В связи с тем метеорологические условия в регионах, соседствующих с Мировым океаном, могут сильно зависеть от океанских течений, важно принимать в расчет этот фактор, поэтому был проанализирован аспект влияния течения Эль-Ниньо на погодные условия в регионах расположения ОИЯЭ ЮАР.

Течения Эль-Ниньо и ее влияние на МДВ

Феномен Эль-Ниньо представляет собой крупномасштабное климатическое явление, возникающее в экваториальной части Тихого океана [28, 29]. Оно характеризуется аномальным прогревом поверхностных вод в западной части Тихого океана, что приводит к перераспределению тепла и влаги в атмосфере. Эти изменения оказывают значительное влияние на глобальные погодные паттерны, включая частоту и интенсивность осадков, облачности, туманов и других явлений, снижающих МДВ.

Поскольку доступность терминалов атмосферной оптической связи напрямую зависит от МДВ, особенно при её значении менее 1 км, климатические события, такие как Эль-Ниньо, могут оказывать косвенное, но существенное влияние на работу таких систем. Длина трассы 1 км принята в качестве репрезентативной, исходя из типовых габаритов промышленных и энергетических объектов, где максимальные расстояния между ключевыми узлами редко превышают этот масштаб [2, 11].

На рисунке 2 приведены результаты обработки архивных метеоданных (2010-2024 гг.) [27], полученных на метеорологической станции, ближайшей к АЭС Кёберг.

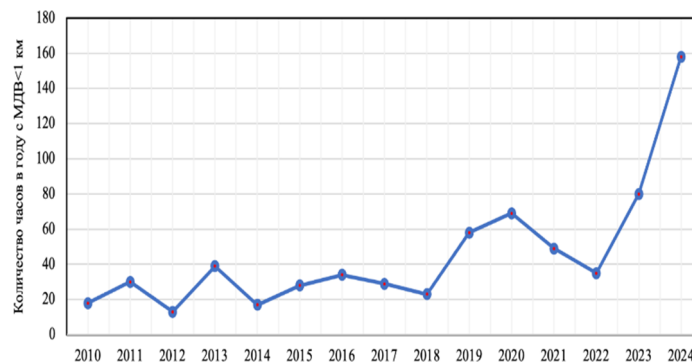


Рис. 2. Суммарное количество часов в каждом году, когда метеорологическая дальность видимости была меньше 1 км в Кейптауне

График отражает годовую продолжительность периодов с МДВ менее 1 км. Анализ данных по количеству часов в год с МДВ < 1 км в регионе Кейптауна за период с 2010 по 2024 годы показывает выраженную долгосрочную тенденцию к увеличению числа неблагоприятных условий для оптической связи. В частности, наблюдается рост числа часов с плохой видимостью (менее 1 км) с ~20-30 часов в начале периода до более чем 150 часов в 2024 году. Этот рост может быть связан с изменением климатических режимов, включая усиление воздействия Эль-Ниньо под влиянием глобального потепления.

Кейптаун расположен в Южной Африке, удалённой от экваториального Тихого океана, однако исследования показывают, что фазы Эль-Ниньо могут вызывать аномалии в атмосферной циркуляции, влияющие на тропические и умеренные широты, включая южную часть Африки. Например, во время сильных событий Эль-Ниньо часто наблюдаются изменения в режимах осадков и влажности воздуха, что может способствовать образованию туманов, дождей и смога - факторов, значительно снижающих МДВ.

Заметный рост числа часов с МДВ < 1 км в 2023-2024 годах совпадает с периодом активизации глобальных климатических аномалий, включая одно из сильнейших проявлений Эль-Ниньо за последние десятилетия [29]. Это указывает на возможную связь между фазами Эль-Ниньо и ухудшением условий для атмосферной оптики. Обработанная статистика метеорологической дальности видимости за период с 2013 по 2024 год [27], полученная с ближайшей метеостанции к ядерному исследовательскому центру Южной Африки Пелиндаба, расположенной в Претории, представлена на рисунке 3. На графике показано суммарное количество часов в каждом году, когда метеорологическая дальность видимости была меньше 1 км.

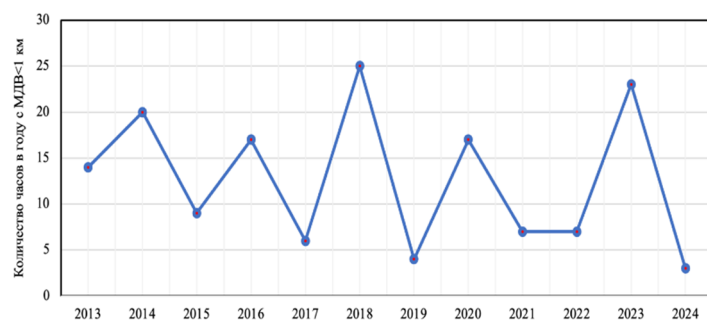


Рис. 3. Суммарное количество часов в каждом году, когда метеорологическая дальность видимости была меньше 1 км в Пелиндаба (архив данных с метеостанции в аэропорту Лансерия)

Исходя из рис. 3 видно, что Эль-Ниньо оказывает более сильное и стабильное влияние на МДВ в Кейптауне, чем в Претории. Это связано с близостью к океану, повышенной влажностью и более чувствительной атмосферной циркуляцией в прибрежных регионах. В Претории влияние Эль-Ниньо проявляется эпизодически и маскируется локальными факторами (изменение уровня загрязнения воздуха, сезонные пожары и т.д.).

Однако даже при меньшей амплитуде изменений, заметное увеличение дней с МДВ меньше 1 км в 2023 году совпадает с периодом активизации фаз Эль-Ниньо, что указывает на возможную косвенную связь между глобальными климатическими аномалиями и локальными условиями видимости.

Таким образом, прогнозирование фаз Эль-Ниньо и понимание его региональных последствий становятся важными для оценки долгосрочной доступности оптических каналов связи в Кейптауне и Претории. В условиях усугубляющихся климатических изменений, когда Эль-Ниньо-циклы могут усиливаться и становиться более частыми, необходимо учитывать эти макроклиматические факторы при проектировании и эксплуатации сетей атмосферной оптической связи.

Осадки

Наряду с анализом метеорологической дальности видимости, важное значение имеет исследование характера осадков в потенциальном регионе размещения терминалов АОЛС. Осадки, такие как дождь и снег, оказывают существенное влияние на распространение лазерного излучения в атмосфере, вызывая дополнительное рассеяние и поглощение сигнала. Эти эффекты могут привести к снижению уровня принимаемой мощности, ухудшению качества передачи данных или даже к временному разрыву соединения.

Обработанная статистика осадков (а именно, дождя) в период с 2010 г. по 2024 г., с ближайшей метеостанции к АЭС Кёберг, расположенной в Кейптауне [27], представлена на рисунках 4-5.

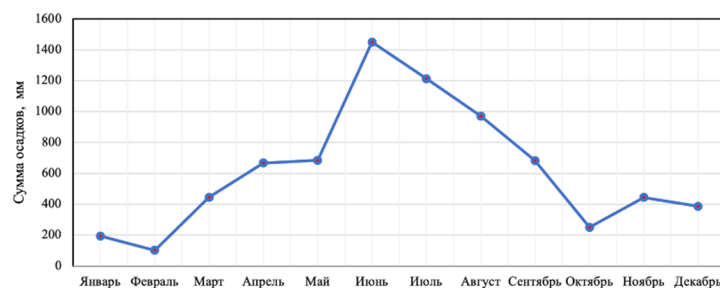


Рис. 4. Сумма осадков в период с 2010 г. по 2024 г. в Кейптауне

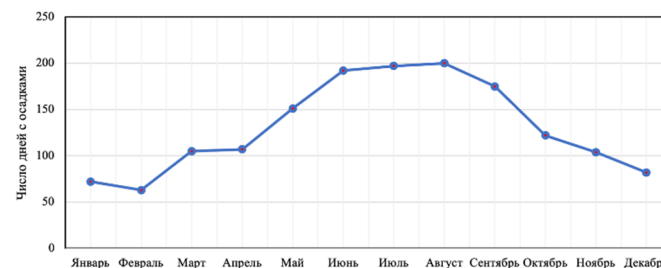


Рис. 5. Число дней с осадками в период с 2010 г. по 2024 г. в Кейптауне

Анализ суммы и частоты осадков за 15-летний период (рис. 4, 5) выявил чётко выраженную сезонную зависимость. Основная доля годового количества осадков (1200-1400 мм) выпадает в зимний период (июнь-август), при этом число дней с осадками достигает 180-200.

В летний период (январь-февраль) сумма осадков снижается до 100-200 мм при 70-80 днях их выпадения. В остальные месяцы показатели составляют 400-600 мм и 100-150 дней соответственно.

Высокая интенсивность и частота осадков в зимний период оказывают существенное влияние на распространение лазерного излучения в атмосфере, вызывая рассеяние и поглощение сигнала.

Это может привести к снижению устойчивости и дальности действия систем АОЛС, а также ограничить эффективность реализации технологий КРК [30, 31].

Температура и давление

Анализ средних значений температуры и давления за длительный период является важным этапом при оценке условий распространения лазерного излучения в атмосфере для систем атмосферной оптической связи. Эти параметры оказывают существенное влияние на характеристики атмосферы, такие как степень турбулентности, что напрямую сказывается на качестве передачи данных. Температурные градиенты вызывают конвекцию воздуха, которая приводит к возникновению атмосферных турбулентностей.

Также, атмосферное давление и температура определяет концентрацию молекул воздуха, что, в свою очередь, влияет на степень поглощения и рассеяния лазерного излучения. Высокое давление увеличивает количество молекул в единице объёма, что может привести к большему затуханию сигнала. Обработанная статистика значений температуры и атмосферного давления в период с 2010 г. по 2024 г., с ближайшей метеостанции к АЭС Кёберг, расположенной в Кейптауне [27], представлена на рисунках 6-7.

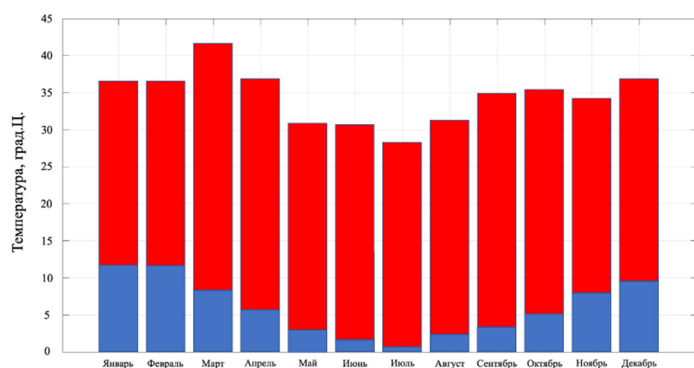


Рис. 6. Средняя месячная температура в Кейптауне и ее годовой диапазон (минимум (синие диаграммы)-максимум (красные диаграммы)) за период 2010–2024 гг.

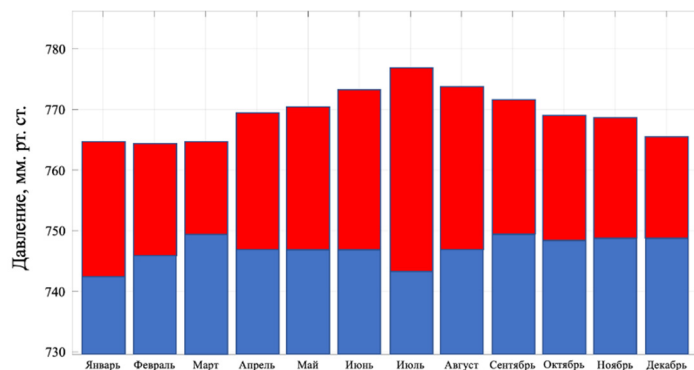


Рис. 7. Среднее месячное атмосферное давление в Кейптауне и его годовой диапазон (минимум (синие диаграммы)-максимум (красные диаграммы)) за период 2010–2024 гг.

Анализ значений температуры и давления за 15-летний период (рис. 6, 7) показал, что климатическая обстановка в регионе характеризуется выраженным сезонным ходом температуры воздуха и атмосферного давления. Амплитуда суточных и месячных колебаний температуры значительна,

достигая 30°C в отдельные месяцы, что свидетельствует о высокой климатической изменчивости. Среднее атмосферное давление стабильно варьируется в пределах 756-763 мм рт.ст., с максимумом в июле (762.5 мм рт.ст.) и минимумом в январе (755.5 мм рт.ст.), что соответствует типичному барическому циклу для умеренных широт. Наблюдаемые экстремальные значения температуры (до 41°C) и давления (до 778 мм рт.ст.) подчеркивают необходимость учета климатических аномалий при проектировании инфраструктуры с учетом систем АОЛС.

3 Оценка запаса усиления на оптической линии связи

Расходимость оптического излучения

Потери мощности, обусловленные дифракционной расходимостью лазерного пучка, определяются соотношением [13]:

$$P_{\text{расх}} = 10 \lg \left(\frac{S_{\text{пятна}}}{S_{\text{прием}}} \right),$$

где:

- $S_{\text{пятна}}$ – площадь поперечного сечения лазерного пучка в плоскости приёмной апертуры, м², определяемая выражением: $S_{\text{пятна}} = \frac{\pi d_{\text{пятна}}^2}{4}$, $d_{\text{пятна}} = L\varphi$, где φ – полный угол расходимости пучка, мрад; L – протяжённость трассы, км;

- $S_{\text{прием}}$ – площадь приёмной апертуры, в м², $S_{\text{прием}} = \frac{\pi d_{\text{прием}}^2}{4}$, где $d_{\text{прием}}$ – диаметр линзы приёмного терминала, м.

С использованием указанных соотношений потери, обусловленные расходимостью пучка, могут быть рассчитаны по общеизвестным техническим характеристикам приёмопередающих терминалов АОЛС согласно формуле (1).

$$P_{\text{расх}} = 10 \lg \left(\frac{\pi(L\varphi)^2}{4 S_{\text{прием}}} \right), \quad (1)$$

где: L – длина трассы, км; φ – полный угол расходимости лазерного пучка, мрад; $S_{\text{прием}}$ – площадь приёмной апертуры, м².

Атмосферное поглощение

Для расчёта молекулярного поглощения широко используются различные спектральные базы данных, содержащие коэффициенты поглощения основных атмосферных газов для стандартных моделей атмосферы. Стандартные модели атмосферы используются в сочетании со спектроскопическими базами данных (например, HITRAN [32], GEISA [33], SPEC-TRA [34]) для вычисления коэффициентов поглощения, пропускания, рассеяния и других характеристик атмосферы. Для оценки энергетического запаса терминалов АОЛС используются спектральные коэффициенты поглощения σ_A из базы данных SPECTRA [34], рассчитанные для стандартных моделей атмосферы, соответствующих различным географическим широтам.

При рассмотрении только молекулярного поглощения (без учёта рассеяния) коэффициент пропускания определяется экспоненциальным законом Бугера-Ламберта (2):

$$TR_{\text{погл}} = \exp(-\sigma_A L) \quad (2)$$

где: L – длина трассы, км; σ_A – коэффициент молекулярного поглощения, км⁻¹.

Атмосферное рассеяние

Ослабление оптического излучения в атмосфере определяется молекулярным (рэлеевским) и аэрозольным (Ми) рассеянием. Рэлеевское рассеяние доминирует в коротковолновой области спектра и ограничивает максимальную дальность передачи. Согласно теории рэлеевского рассеяния, коэффициент молекулярного рассеяния описывается выражением [35]:

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

где: n – показатель преломления воздуха; λ – длина волны излучения, км; δ – фактор деполяризации молекул ($\approx 0,035$ для воздуха); N – концентрация молекул, км⁻³.

Ослабление вследствие аэрозольного (Ми-рассеяния) рассеяния оценивается эмпирически [35, 36]. Таким образом, коэффициент Ми-рассеяния задаётся выражением:

$$\sigma_{Mi} = \frac{3,91}{MDV} \left(\frac{\lambda}{0,55}\right)^{-q},$$

где: MDV – метеорологическая дальность видимости, км; λ – длина волны излучения, мкм; q – показатель спектрального затухания [35, 36].

С учётом только рассеяния коэффициент пропускания определяется по формуле (3):

$$TR_{\text{расс}} = \exp(-\sigma_R L) \exp(-\sigma_{Mi} L) \quad (3)$$

где: L – расстояние между излучателем и приёмником, км; σ_R – коэффициент молекулярного рассеяния, км⁻¹; σ_{Mi} – коэффициент аэрозольного рассеяния, км⁻¹.

Функция пропускания атмосферы, с учетом поглощения и рассеяния, может быть представлен в виде произведения (4):

$$TR = TR_{\text{погл}} TR_{\text{расс}} \quad (4)$$

Ослабление в дожде

Для расчета ослабления в дожде используется эмпирическое выражение для расчета затухания в дожде, в зависимости от интенсивности осадков [17, 18]:

$$\alpha_{\text{дождя}} = 1,45 I_{\text{дождя}}^{0,64}$$

где I_{rain} – интенсивность дождя, в мм/ч.

Функция пропускания, связанная с затуханием в дожде для горизонтальных линий, определяется по формуле (5):

$$TR_{\text{дождя}} = \exp(-\alpha_{\text{дождя}} L), \quad (5)$$

где: $\alpha_{\text{дождя}}$ – затухание в дожде, дБ/км; L – расстояние между излучателем и приёмником, км.

Энергетический запас терминала АОЛС

С учётом выражений (1)-(5) энергетический запас терминала FM , определяемый как разность между уровнем излучаемой мощности и порогом срабатывания приёмника за вычетом суммарных потерь на трассе, рассчитывается по формуле (6):

$$FM = P_e - S_r - 10 \lg \left(\left(\frac{\pi(L\varphi)^2}{4S_{\text{прием}}} \right) TR \cdot TR_{\text{дождя}} \right), \quad (6)$$

где: FM – энергетический запас терминала, дБ; P_e – излучаемая оптическая мощность, дБм; S_r – чувствительность

приёмника, дБм; L – длина трассы, км; φ – полный угол расходимости лазерного пучка, мрад; $S_{\text{прием}}$ – площадь линзы приемного устройства, м²; TR – функция пропускания атмосферы, с учетом поглощения и рассеяния; $TR_{\text{дождя}}$ – функция пропускания, связанная с затуханием в дожде.

4 Анализ применимости АОЛС на объектах использования атомной энергии в Южно-Африканской Республике

Доступность атмосферной оптической линии связи определяется совместным влиянием энергетического запаса терминалов, длины трассы, климатических условий и суммарного атмосферного ослабления. Таким образом, доступность канала АОЛС ($A\vartheta$) можно оценивать, исходя из метеорологических условий потенциального района размещения и параметров терминалов АОЛС. $A\vartheta$ можно рассчитать по формуле [11]:

$$A\vartheta = 1 - P_{Vfm}$$

где P_{Vfm} – вероятность того, что $MДВ < Vfm$, обусловленная энергетическим запасом усиления оборудования FM (в дБ) на дистанции L (в км), определяемая по формуле [2]:

$$Vfm = \frac{17}{FM} L,$$

где Vfm – предельная дальность, км.

После того, как рассчитана предельная дальность Vfm на основе архива метеоданных о МДВ за несколько лет строится аппроксимация для отношения средней частоты дней(часов) когда, МДВ ниже Vfm к общему числу дней (часов), когда велись наблюдения. Фактически это отношение и является оценкой P_{Vfm} . Согласно описанной методике оценки доступности АОЛС, аналогичной [11, 12], рассчитаны зависимости доступности АОЛС от длины трассы (рис. 8-9) для двух регионов расположения АЭС Кёберг (район аэропорта Кейптаун) и ядерного центра Пелиндаба (район аэропорта Лансерия).

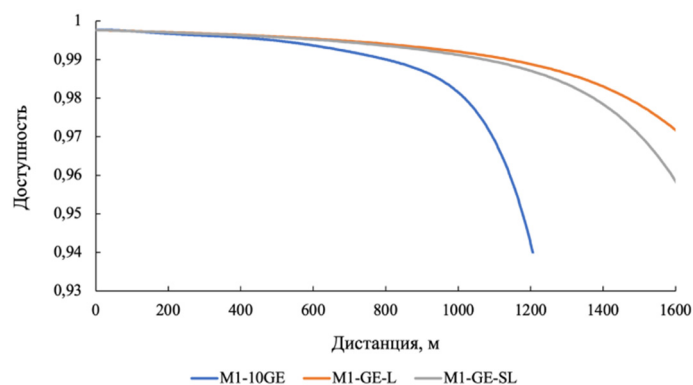


Рис. 8. Зависимости доступности терминалов АОЛС от дистанции в регионе расположения АЭС Кёберг

Расчёты выполнены для терминалов ARTOLINK (модели M1-10GE, M1-GE-L, M1-GE-SL) [19] с учётом их технических параметров и статистики метеорологических условий (2010-2024 гг.) [27].

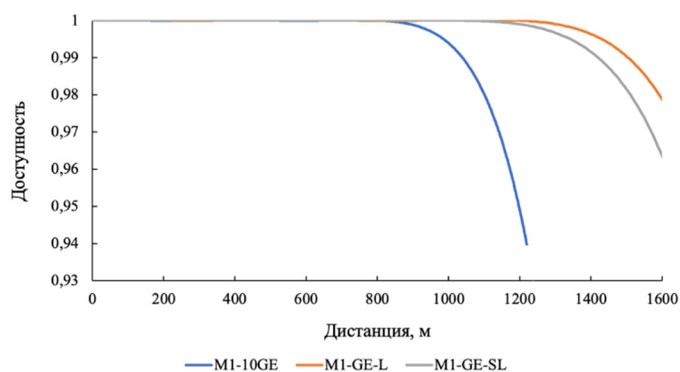


Рис. 9. Зависимости доступности терминалов АОЛС от дистанции в регионе расположения ядерного исследовательского центра Пелиндаба

На основе анализа данных, представленных на рисунках 8-9, и предварительных оценок, проведенных в [37] можно сделать следующие выводы о доступности атмосферной оптической связи в регионах расположения АЭС Кёберг и ядерного исследовательского центра Пелиндаба:

1. Анализ, который включал учет метеорологических особенностей регионов ОИАЭ ЮАР, выявил существенное влияние океанских течений на характер распространения лазерного излучения в районе расположения АЭС Кёберг. Высокая интенсивность осадков, изменчивость температуры и давления, а также сезонные колебания метеорологической дальности видимости приводят к дополнительному затуханию сигнала.

2. На основе полученных данных рекомендуется использовать модели M1-GE-L и M1-GE-SL для работы на больших дистанциях (> 1000 м), так как они обеспечивают более высокую доступность, по сравнению с моделью M1-10GE. При выборе конкретной модели необходимо учитывать требования к скорости передачи данных и условиям размещения терминалов.

3. Несмотря на относительно высокую доступность на коротких и средних дистанциях, снижение уровня доступности на больших расстояниях требует организации резервных каналов связи. Особенно важно это для критически важных объектов, таких как АЭС, где любые перебои в передаче данных могут иметь серьезные последствия. Рекомендуется использовать гибридные сети, сочетающие АОЛС с радиочастотными или оптоволоконными каналами, чтобы обеспечить максимальную доступность.

5 Заключение

Проведённое исследование подтверждает, что условия в районах размещения ОИАЭ Южной Африки (Кейптаун и Претория) позволяют эффективно использовать атмосферную оптическую связь для организации высокоскоростных и защищённых каналов передачи данных. На дистанциях до 1 км системы АОЛС обеспечивают высокую доступность, что делает их перспективным решением для промышленной и энергетической инфраструктуры, включая объекты повышенного риска.

Особое внимание в работе уделено влиянию крупномасштабных климатических явлений: с учётом прибрежного расположения АЭС Кёберг проанализировано воздействие фазы

Эль-Ниньо на локальные метеоусловия. Полученные данные свидетельствуют о том, что, несмотря на межгодовую изменчивость, общий климатический режим остаётся благоприятным для стабильной работы оптических линий связи.

Отдельный интерес представляет интеграция АОЛС с технологией квантового распределения ключей [38, 39]. Такой вид связи может стать основой для построения новых поколений безопасных коммуникационных систем на критически важных объектах атомной энергетики. В частности, для оперативной организации защищенного канала связи в условиях плотной застройки ОИАЭ могут быть использована реализация оптического канала связи через беспилотный летательный аппарат [40, 41]. В то же время на больших расстояниях рекомендуется применять гибридные архитектуры, сочетающие АОЛС с радиочастотными или волоконно-оптическими каналами, чтобы компенсировать возможные кратковременные ухудшения погодных условий и обеспечить требуемую отказоустойчивость.

Литература

1. *Статьев В.Ю., Докучаев В.А., Маклачкова В.В.* Информационная безопасность на пространстве "Больших данных" // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 4. С. 21-28. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-4-21-28.
2. *Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В.* Применение атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики // Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11, № 6. С. 530-539. DOI 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539.
3. *Bush S.F., Challenger W.A., Mantelet G.A.* A perspective on industrial quantum networks // AVS Quantum Science. 2021. Vol. 3, No 3. P. 030501. DOI 10.1116/5.0051881.
4. *Grychkin S.E., Stroganova E.P.* "Smart city": electromagnetic compatibility problem // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems 2023. 2023. Vol. 6, No. 1. pp. 138-142.
5. *Varlamov O.V., Dymkova S.S.* New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF // 2023 Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. Vol. 6, No 1. pp. 445-449. DOI 10.1109/WECONF57201.2023.10147930.
6. *Dymkova S.S., Varlamov O.V.* Scientometric analysis of authors collaborations at the international conference "Engineering Management of Communications and Technologies // 2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). 2023. pp. 1-4. DOI 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946.
7. *Лоховин В.А., Шварц М.Л., Рыжков А.В.* Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 11. С. 30-37. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37.
8. *Шварц М.Л., Богданов Е.А., Рыжков А.В., Аладин В.М.* Особенности построения систем единого и точного времени в сетях связи электроэнергетики // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 12. С. 27-33. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-12-27-33.
9. *Kong P.-Y.* A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security // IEEE Systems Journal. 2023. Vol. 16, No 1. pp. 41-54. DOI 10.1109/JSYST.2020.3024956.
10. *Ерохин, К.Ю., и др.* Применимость технологии квантового распределения ключей в свободной атмосфере при построении сегментов современных квантовых коммуникационных сетей // Оптический журнал. 2024. Т. 91, № 11. С. 63-70. DOI 10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70.

11. Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Терехин Д.Н. Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации // Ядерная физика и инжиниринг. 2025. Т. 16, № 1. С. 5-12. DOI 10.56304/S2079562924060162.
12. Казанцев С.Ю., Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Бурдин А.В. Перспективы применения атмосферной оптической связи на крупных промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19, № 1. С. 21-30. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30.
13. Uysal M., Capsoni C., Ghassemloooy Z., Boucouvalas A., Udvary E. Optical Wireless Communications: An Emerging Technology // Springer. 2016. DOI 10.1007/978-3-319-30201-0
14. Сапожников М.В. Анализ влияния атмосферной турбулентности на устойчивость квантового канала связи. Существующие подходы и методы // Электросвязь. 2025. № 4. С. 37-46. DOI 10.34832/ELSV.2025.66.4.005.
15. Сапожников М.В., Миронов Ю.Б. Алгоритм оценки влияния вихревой структуры атмосферы на устойчивость квантового канала связи // Электросвязь. 2025. № 6. С. 2-6. DOI: 10.34832/ELSV.2025.68.6.001.
16. Сапожников М.В., Миронов Ю.Б. Ослабление оптического излучения в атмосфере // Электросвязь. 2025. № 7. С. 2-7. DOI: 10.34832/ELSV.2025.69.7.001.
17. Zhang S.-J., et al. Performance analysis of the continuous-variable measurement-device-independent quantum key distribution under diverse weather conditions // Chinese Physics B. 2020. Vol. 29, No 2. P. 020301. DOI 10.1088/1674-1056/ab5efd.
18. Sekga C., Mafu M. Measurement device-independent quantum key distribution with vector vortex modes under diverse weather conditions // Sci Rep. 2023. Vol. 13. P. 14931. DOI 10.1038/s41598-023-40602-x.
19. Мобильные терминала АОЛС. <https://moctkom.ru/mobile-terminals>.
20. Боев А.А., и др. Возможность построения модульной системы квантового распределения ключей в атмосфере // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48, № 15. С. 15-18. DOI 10.21883/PJTF.2022.15.53125.19192.
21. Bolotov, D.V., et al. A Method for Estimating Losses in a Quantum Channel for Implementing Quantum Key Distribution Technology for Atmospheric Laser Communication Terminals // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. Vol. 5, No. 1. pp. 57-61.
22. Бушувев Э.Ю., Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Строганова Е.П. Влияние климатических факторов на атмосферную оптическую линию системы связи с квантово-криптографической аппаратурой // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17, № 3. С. 29-34. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-3-29-34.
23. Международное агентство по атомной энергии. <https://www.iaea.org/ru>.
24. Necsa South African Nuclear Energy Corporation. <https://necsa.co.za>.
25. Strydom W., et al. The role of SAFARI-1 in industry and academia // Physica Scripta. 2006. Vol. 2002, No T97. P. 45. DOI 10.1238/Physica.Topical.097a00045.
26. Гришин А.И., Крючков А.В. Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическим методами // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 156-159. DOI 10.15372/A0020180212.
27. Архив погоды, METAR. <https://tp5.ru>.
28. Mendi V., Dwarakish G. El Nino: A Review // International Journal of Earth Sciences and Engineering. 2015. Vol. 8, No 2. pp. 130-137.
29. Qihua P., et al. Strong 2023-2024 El Niño generated by ocean dynamics // Nature Geoscience. 2025. Vol. 18, No 6. pp. 471-478. DOI 10.1038/s41561-025-01700-9.
30. Wan Z., et al. Analysis of the influence of atmospheric aerosol on the attenuation of free space QKD channel // Tenth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, SPIE. 2025. Vol. 13511. pp. 1846-1860. DOI 10.1117/12.3057767
31. Bolotov D.V., Kazantsev S.Y., Pchelkina N.V., et al. Modular facility of quantum Key distribution in a free space // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. Vol. 6, No. 1. pp. 50-54.
32. High-resolution transmission molecular absorption database. <https://hitran.org>.
33. Spectroscopic database. <https://geisa.aeris-data.fr>.
34. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 09. С. 765-776.
35. Миронов А.В. Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд: Учебное пособие. – М.: ЭДЭМ, 1997. 157 с.
36. Pchelkina N.V., Zhukovsky D.D., Nanidzhanyan A.K., et al. Investigation of the Atmospheric Optical Disturbances Impact on the Free Space Optics Quantum Key Distribution // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2024. Vol. 7, No. 1. pp. 400-406. DOI 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486.
37. Бахус А.В., Боков П.М., Даниэлис Г.К., и др. Оценка возможности применения атмосферной оптической связи на объектах использования атомной энергии ЮАР // XIV международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов, Москва: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. 2025. С. 461-462.
38. Tang Z., Zhang P., Krawec W.O., Wang L. Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation // IEEE Transactions on Power Systems. 2023. Vol. 38, No 2. pp. 1189-1204. DOI 10.1109/TPWRS.2022.3172374.
39. Paudel H.P., et al. Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective // Advanced Quantum Technologies. 2023. Vol. 6, No 10. P. 2300096. DOI 10.1002/qute.202300096.
40. Бушувев Э.Ю., Пchelкина Н.В., Строганова Е.П. Атмосферный оптический канал связи с беспилотными летательными аппаратами в условиях турбулентности атмосферы // Электросвязь. 2025. № 4. С. 32-36. DOI 10.34832/ELSV.2025.66.4.004.
41. Tian X.H. et al. Experimental demonstration of drone-based quantum key distribution // Physical Review Letters. 2024. Vol. 133, No. 20. P. 200801. DOI 10.1103/PhysRevLett.133.200801

APPLICATION OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS AT NUCLEAR POWER FACILITIES, TAKING INTO ACCOUNT THE CLIMATIC FEATURES OF SOUTH AFRICA

Sergey Yu. Kazantsev, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, s.i.kazantsev@mtuci.ru
Maksim V. Sapozhnikov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, m.v.sapozhnikov@mtuci.ru
Yuri B. Mironov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, i.b.mironov@mtuci.ru
Pavel M. Bokov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, pavel.bokov@necsa.co.za

Abstract

This paper evaluates the feasibility of using atmospheric optical communication terminals to provide high-speed and secure data transmission at nuclear power facilities and research centers in South Africa located in the Cape Town and Pretoria areas. Methods for determining signal attenuation along an optical path under various weather conditions are described in detail. Using 15 years of meteorological data, the influence of key climatic parameters on the stability of the optical communication channel is analyzed. Considering that weather conditions in coastal regions can significantly depend on large-scale oceanic phenomena, the study also considers the influence of El Niño currents on local meteorology in the areas where the facilities in question are located in South Africa. It is shown that in these regions, atmospheric optical communication systems have high potential as both a primary and back-up communication channel, especially at distances of up to 1 km. Availability calculations are performed for commercial terminals that can be interfaced with quantum key distribution equipment developed for fiber-optic communication lines. It has been shown that significant advantages of atmospheric optical communication systems via such terminals are their compatibility with quantum key distribution technologies and the implementation of hybrid communication systems, which opens up opportunities for creating a fundamentally new level of information security at critical energy facilities.

Keywords: free-space optical communication, atmospheric optical communication lines, quantum key distribution, industrial complex security, hybrid communication lines, communication channel availability

References

- [1] V.Yu. Statev, V.A. Dokuchaev, V.V. Maklachkova, "Information security in the big data space," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 4, pp. 21-28. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-4-21-28. (in Russian)
- [2] S.Yu. Kazantsev, S.N. Kuznetsov, A.Yu. Maksimov, N.V. Pchelkina, "Applications of atmospheric optical communication at nuclear power facilities," *Advances in Applied Physics*. 2023. Vol. 11. No. 6, pp. 530-539. DOI 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539 (in Russian).
- [3] S.F. Bush, W.A. Challener, G.A. Mantelet, "A perspective on industrial quantum networks," *AVS Quantum Science*. 2021. Vol. 3. No. 3, P. 030501. DOI 10.1116/5.0051881.
- [4] S.E. Grychkin, E.P. Stroganova, "Smart city": electromagnetic compatibility problem," *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 6. No. 1, pp. 138-142.
- [5] O.V. Varlamov, S.S. Dymkova, "New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF," *2023 Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 6. No. 1, pp. 445-449. DOI 10.1109/WECONF57201.2023.10147930.
- [6] S.S. Dymkova, O.V. Varlamov, "Scientometric analysis of authors collaborations at the international conference "Engineering Management of Communications and Technologies," *2023 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. 2023. pp. 1-4. DOI 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946.
- [7] V.A. Likhovin, M.L. Schwartz, A.V. Ryzhkov, "Development trends regarding communication and synchronization systems of complex infrastructure facilities," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 11, pp. 30-37. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37. (in Russian)
- [8] M.L. Schwartz, E.A. Bogdanov, A.V. Ryzhkov, V.M. Aladin, "Features of constructing single and accurate time systems in electric power communication networks," *T-Comm*. 2024. Vol. 18. No. 12, pp. 27-33. (in Russian)
- [9] P.-Y. Kong, "A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security," *IEEE Systems Journal*. 2023. Vol. 16. No. 1, pp. 41-54. - DOI 10.1109/JSYST.2020.3024956.
- [10] K.Yu. Erokhin, S.Yu. Kazantsev, T.V. Kazieva, Y.B. Mironov, and N.V. Pchelkina, "Applicability of quantum key distribution technology under free-space atmospheric conditions to construct segments of modern quantum communication networks," *Journal of Optical Technology*. 2024. Vol. 91, pp. 749-752. DOI: 10.1364/JOT.91.000749
- [11] S.Y. Kazantsev, M.V. Sapozhnikov, D.N. Terekhin, "Development of Map of Applicability of Atmospheric Optical Communication at Nuclear Energy Facilities of the Russian Federation," *Physics of Atomic Nuclei*. 2024. Vol. 87, pp. 1759-1765. DOI: 10.1134/S106377882409014X
- [12] S.Yu. Kazantsev, M.V. Sapozhnikov, Yu.B. Mironov, D.N. Terekhin, A.V. Burdin, "Prospects for the application of atmospheric optical communications in large industrial and energy complexes of the Russian Federation," *T-Comm*. 2025. Vol. 19. No. 1, pp. 21-30. DOI 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30. (in Russian)
- [13] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, E. Udvary, "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Springer. 2016. DOI 10.1007/978-3-319-30201-0.
- [14] M.V. Sapozhnikov, "Analysis of the influence of atmospheric turbulence on the stability of a quantum communication channel, existing approaches and methods," *Electrosvyaz*. 2025. No. 4, pp. 37-46. DOI 10.34832/ELSV.2025.66.4.005. (in Russian)
- [15] M.V. Sapozhnikov, Yu.B. Mironov, "Algorithm for assessing the influence of the vortex structure of the atmosphere on the stability of a quantum communication channel," *Electrosvyaz*. 2025. No. 6, pp. 2-6. DOI 10.34832/ELSV.2025.68.6.001. (in Russian)
- [16] M.V. Sapozhnikov, Yu.B. Mironov, "Attenuation of optical radiation in the atmosphere," *Electrosvyaz*. 2025. No. 7, pp. 2-7. DOI 10.34832/ELSV.2025.69.7.001. (in Russian)

- [17] S.-J. Zhang, et al., "Performance analysis of the continuous-variable measurement device-independent quantum key distribution under diverse weather conditions," *Chinese Physics B*. 2020. Vol. 29. No. 2, P. 020301. DOI 10.1088/1674-1056/ab5efd.
- [18] C. Sekga, M. Mafu, "Measurement device-independent quantum key distribution with vector vortex modes under diverse weather conditions," *Sci Rep*. 2023. Vol. 13. P. 14931. DOI 10.1038/s41598-023-40602-x.
- [19] Mobile terminals of the FSO. <https://mocom.ru/mobile-terminals>.
- [20] A.A. Boev, S.S. Vorobey, S.Yu. Kazantsev, M.Yu. Kernosov, O.V. Kolesnikov, S.N. Kuznetsov, Yu.B. Mironov, A.A. Parshin, N.V. Rudavin, "Possibility of creating a modular system for quantum key distribution in the atmosphere," *Technical Physics Letters*. 2022. Vol. 48, pp. 11-14. doi: 10.21883/TPL.2022.08.55051.19192
- [21] D.V. Bolotov, M.S. Kuzmin, A.P. Nasaraia, N.V. Pchelkina and S.N. Kuznetsov, "A Method for Estimating Losses in a Quantum Channel for Implementing Quantum Key Distribution Technology for Atmospheric Laser Communication Terminals," *2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803408.
- [22] E.Y. Bushuev, S.Y. Kazantsev, S.N. Kusnetsov, E.P. Stroganova, "Climatic factors influence on atmospheric optical line of communication system with quantumcryptographic equipment," *H&ES Reserch*. 2025. Vol. 17. No. 3, P. 2934. DOI 10.36724/2409-5419-2025-17-3-29-34. (in Russian)
- [23] International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/ru>.
- [24] Necsa South African Nuclear Energy Corporation. <https://necsa.co.za>.
- [25] W. Strydom, et al., "The role of SAFARI-I in industry and academia," *Physica Scripta*. 2006. Vol. 2002. No. T97, P. 45. DOI 10.1238/Physica.Topical.097a00045.
- [26] A.I. Grishin, A.V. Kryuchkov, "Measuring the characteristics of the atmosphere using lidar and nephelometric methods," *Optics of the atmosphere and ocean*. 2018. Vol. 31. No. 2, pp. 156-159. DOI: 10.15372/A0020180212. (in Russian)
- [27] Weather archive, METAR. <https://rp5.ru>.
- [28] V. Mendi, G. Dwarakish, "El Nino: A Review," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2015. Vol. 8. No 2, pp. 130-137.
- [29] P. Qihua, et al., "Strong 2023-2024 El Niño generated by ocean dynamics," *Nature Geoscience*. 2025. Vol. 18. No. 6, pp. 471-478. DOI 10.1038/s41561-025-01700-9.
- [30] Z. Wan, et al., "Analysis of the influence of atmospheric aerosol on the attenuation of free space QKD channel," *Tenth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, SPIE*. 2025. Vol. 13511. pp. 1846-1860. DOI 10.1117/12.3057767
- [31] D. V. Bolotov, S. Y. Kazantsev, N. V. Pchelkina, S. N. Kuznetsov and M. Y. Kernosov, "Modular Facility of Quantum Key Distribution in a Free Space," *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017.
- [32] High-resolution transmission molecular absorption database. <https://hitran.org>.
- [33] Spectroscopic database. <https://geisa.aeris-data.fr>.
- [34] S.N. Mikhailenko, Yu.L. Babikov, V.F. Golovko, "Information-computational system 'Spectroscopy of atmospheric gases': Structure and main functions," *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2005. Vol. 18. No. 9, pp. 765-776. (in Russian)
- [35] A.V. Mironov, *Precision Photometry: Practical Foundations of Precision Photometry and Spectrophotometry of Stars*, Moscow: EDEM, 1997, p. 157. (in Russian)
- [36] N.V. Pchelkina, D.D. Zhukovsky, A.K. Nanidzhanyan, E.Y. Bushuev and D.D. Chizhin, "Investigation of the Atmospheric Optical Disturbances Impact on the Free Space Optics Quantum Key Distribution," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486.
- [37] A.V. Bakhus, P.M. Bokov, G.C. Daniels, S.Yu. Kazantsev, M.V. Sapozhnikov, "Assessing the applicability of using atmospheric optical communications at the south african nuclear facilities," in *XIV International Conference on Photonics and Information Optics*, Moscow. 2025. pp. 461-462.
- [38] Z. Tang, P. Zhang, W.O. Krawec, L. Wang, "Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*. 2023. Vol. 38. No 2, pp. 1189-1204. DOI 10.1109/TPWRS.2022.3172374.
- [39] H.P. Paudel, et al., "Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective," *Advanced Quantum Technologies*. 2023. Vol. 6, No. 10, P. 2300096. DOI 10.1002/qute.202300096.
- [40] E.Yu. Busheev, N.V. Pchelkina, E.P. Stroganova, "Atmospheric optical communication channel with unmanned aerial vehicles in atmospheric turbulence conditions," *Electrosvyaz*. 2025. No. 4, pp. 32-36. DOI 10.34832/ELSV.2025.66.4.004. (in Russian)
- [41] X.H. Tian, et al., "Experimental demonstration of drone-based quantum key distribution," *Physical Review Letters*. 2024. Vol. 133. No. 20. P. 200801. DOI 10.1103/PhysRevLett.133.200801

Information about authors:

Sergey Yu. Kazantsev, PhD, Professor, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Maksim V. Sapozhnikov, Engineer, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Yuri B. Mironov, PhD, Head of the Research Department "Advanced Technologies in Telecommunications", Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Pavel M. Bokov, PhD, Chief Scientist, South African Nuclear Energy Corporation, Pelindaba, South Africa, pavel.bokov@necsa.co.za; Associate Professor, North-West University, Potchefstroom, South Africa