

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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,
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия, ymironov@jssc.ru

Терехин Дмитрий Николаевич,
Московский Технический Университет Связи и Информатики,
Москва, Россия, d.n.terehin@mtuci.ru

Бурдин Антон Владимирович,
АО "Научно-производственное объединение государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург, Россия;
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича", г. Санкт-Петербург, Россия;
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики Самара, Россия, bourdine@yandex.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-21-30

Manuscript received 27 November 2024;
Accepted 15 December 2024

Мироновым Ю.Б. работа выполнялась в НИЦ "Курчатовский институт" в рамках государственного задания по теме FNEF-2024-0014.

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

Предложена концепция реализации гибридных линий связи на промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации, базирующихся на применении атмосферной оптической связи. Рассмотрены сценарии развертывания коммуникационной сети связи на основе использования терминалов атмосферных оптических линий связи, работающих в спектральной полосе 1550нм. Показано, что наличие значительных успехов в развитии квантовых технологий стимулирует исследования в области реализации квантовых сетей для защиты систем управления энергетическими сетями, для которых целесообразно использовать гибридные линии связи с передачей данных по оптическому каналу связи, которые могут быть реализованы через коммерческие оптические терминалы. Проанализирована возможность применения атмосферной оптической связи в качестве основного и резервного канала для передачи данных в регионах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, последовательно рассмотрены тепловые электростанции (ТЭС), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), гидроэлектростанции (ГЭС). Основываясь на статистике климатических условий в регионах расположения таких объектов за 12 лет и технических параметрах современных российских терминалов показана эффективность применения оптических терминалов на крупных промышленных и энергетических объектах Российской Федерации.

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., ведущий инженер, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

Терехин Дмитрий Николаевич, аспирант, Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, советник генерального директора по инновациям, АО "Научно-производственное объединение государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", г. Санкт-Петербург, Россия;

профессор кафедры оптических и квантовых систем связи, ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича", г. Санкт-Петербург, Россия;

профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи, ФГБОУ ВО "Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики Самара, Россия

Для цитирования:

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. Том 19. №1. С. 21-30.

For citation:

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. (in Russian)

Введение

Высокие темпы цифровизации производств, создание полностью роботизированных систем с удалённым мониторингом и управлением [1, 2], требуют передачи все более значительных объемов данных по защищённым каналам связи [1]. Эта тенденция в полной мере относится и к крупному энергогенерирующему производству. Современные промышленные и энергетические комплексы, такие как: тепловые электростанции (ТЭС), нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), атомные электростанции (АЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС) являются ключевыми элементами, определяющими уровень развития экономики государства. Такие объекты располагаются на достаточно большой территории и содержат в своем составе много зданий и помещений (технические, административные, инженерные и т.п.), как правило, удаленных друг от друга на значительные расстояния [3, 4].

В то же время, постоянно растет объём передаваемой информации: высокоскоростной интернет, видеоконференция, передача видеонаблюдения, IP-телефония, потоковое вещание и т.д. На таких объектах необходимо всегда иметь резервные беспроводные каналы передачи информации, которые, в том числе, как и основной канал связи, должны соответствовать высоким требованиям безопасности, поскольку обеспечивают связь на объектах повышенного риска [4, 5]. Поэтому для увеличения качества связи и повышения пропускной способности в промышленных сетях крупных предприятий целесообразно объединять нескольких каналов передачи данных в один виртуальный канал [6-8], тем самым реализуются гибридные линии связи. В гибридной линии связи могут использоваться разные технологии, такие как оптические волокна, медные кабели и беспроводные каналы передачи информации, что позволяет более эффективно использовать ресурсы коммуникационной сети.

Значительное внимание к совершенствованию систем и технологий гибридных сетей связи является общей тенденцией, которая прослеживается, как при анализе пленарных докладов, представляемых на профильных научно-технических конференциях, так и проведении наукометрического анализа публикационной активности [9, 10]. В частности, кроме традиционных волоконно-оптических линий связи для подключения к высокоскоростному интернету параллельно используется беспроводные системы, использующие радиочастотный диапазон спектра [11].

Последнее время в области инфокоммуникаций большое внимание уделяется также развитию квантовых технологий [12, 13]. Угрозы появления у злоумышленников доступа к мощным квантовым компьютерам и их применения для взлома традиционных систем асимметричного шифрования привели к необходимости принятия дополнительных мер к защите информации, передаваемой по общедоступным сетям связи, в результате сегодня в системах управления промышленными комплексами и энергетическими сетями активно прорабатываются возможности использования технологии квантового распределения ключей (КРК) [12, 14]. Технология КРК использует квантовые протоколы, предоставляющие надежный метод обмена криптографическими ключами шифрования, устойчивыми к атакам со стороны злоумышленников, обладающих неограниченной вычислительной мощностью [15, 16].

В связи с этим, одной из наиболее актуальных проблем передачи данных с удаленных объектов промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации является выбор оптимальной технологии связи при обеспечении безопасности информации, передаваемой на такие объекты (а именно, объекты повышенного риска) в условиях возможностей перехвата сетевого трафика и применения квантового компьютера для взлома системы шифрования. В работах [4, 17], где анализировались критерии выбора технологии для резервного канала связи применительно к АЭС и объектам использования термоядерной энергии [5], в качестве перспективной технологии связи, позволяющей обеспечить высокую скорость передачи данных и защиту передаваемой информации, в том числе от квантовых угроз, рассматривается атмосферная оптическая связь.

Принцип работы такой связи основан на передаче данных модулированным излучением в ближней инфракрасной части спектра, что как показывают расчеты [17], позволяет обеспечить достаточно стабильную связь на территории АЭС, расположенных в Российской Федерации. Современные атмосферные оптические линии связи (АОЛС), по отношению к другим видам связи, имеют следующие ключевые преимущества: возможность обеспечения высокой скорости обмена информацией (10 Гбит/с и более), отсутствие необходимости получения лицензии и специальных разрешений на использование частот радиодиапазона, что гарантирует оперативное развертывание и настройку такой системы, возможность реализации технологии квантового распределения ключей на основе модульного подхода [18, 19] и невосприимчивость к электромагнитным помехам, порождаемых грозовыми явлениями [20]. Последнее обстоятельство стало особенно актуальным по мере того, как при передаче информации по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) стали применять сложные системы мультиплексирования и увеличилась скорость передачи данных, что сразу обнаружило чувствительность к помехам от грозовых разрядов не только радиолиний, но и ВОЛС [21-23].

Для АОЛС помехи от электромагнитных полей, порождаемых грозовыми явлениями, не оказывают заметного влияния, а внешние электромагнитные поля, воздействующие на оптический кабель, увеличивают частоту квантовых битовых ошибок при реализации КРК по ВОЛС [22, 23], поэтому при реализации КРК в условиях импульсных электромагнитных помех, АОЛС имеют дополнительное преимущество перед ВОЛС.

Однако, при всех описанных достоинствах атмосферной оптической связи, необходимо отметить и ряд проблем, обусловленных изменчивостью среды передачи данных. Действительно, поскольку среда распространения сигнала является атмосфера, такая связь, в значительной степени зависит от возмущений оптической плотности на атмосферной трассе, а вследствие этого, зависит от различных внешних факторов, в частности: погоды (туман, дымка, снег, сильный дождь и т.п.), особенностей географического места расположения приемо-передающих терминалов атмосферной связи; протяженности трассы и явлений поглощения и рассеяния на примесях могущих присутствовать в атмосферном воздухе [4, 20]. Изменчивость оптических параметров передачи данных в атмосфере крайне негативно сказываются при реализации технологии КРК на ее эффективности и доступности [18].

Обычно, в первую очередь, выделяют следующие факторы атмосферы, изменчивость которых следует учитывать: атмосферное поглощение, рассеяние, происходящее при взаимодействии лазерного луча с молекулами газов и частицами аэрозолей в воздухе, а также наличие турбулентностей, способных вызвать отклонение лазерного пучка и изменить распределение мощности по апертуре пучка на стороне приемника [24].

В стандартной атмосфере Земли на видимых и ИК-длинах волн основными «поглотителями» являются молекулы воды, углекислого газа и озона [25]. В ослабление лазерного излучения при распространении в свободной атмосфере вносит вклад Рэлеевское рассеяние, что может быть критично для передачи информации на атмосферных трассах свыше 1 км для систем АОЛС, работающих на длинах волн менее 0,9 мкм. В случае, когда размеры аэрозольных частиц сопоставимы по размеру с длиной волны лазера, основной вклад в ослабление мощности лазерного излучения вносит рассеяние Ми [24], именно такое рассеяние является основной причиной затухания на используемых длинах волн лазера. Исходя из этого, при проектировании систем АОЛС, выбирается длина волны с наименьшими значениями поглощения и рассеяния. Такие диапазоны известны, как окна прозрачности [25]. Именно этот факт, в том числе, обуславливает выбор следующих рабочих длин волн для приемо-передающих терминалов АОЛС: 850 и 1550 нм.

На отечественном рынке терминалов атмосферной связи присутствуют компании: «Оптические ТелеСистемы», г. Санкт-Петербург (терминалы «ЛАНтастИКа»); «Мостком», г. Рязань (терминалы «Artolink»); «Лазерные Информационные Телекоммуникации», г. Екатеринбург, (терминалы «ОСС»). Системы от компании «Мостком» (<https://mostkom.ru/mobile-terminals>) уже сейчас могут работать с оборудованием КРК [5, 19], поэтому параметры серийных изделий (приемо-передающих терминалов атмосферной связи) именно этой фирмы использованы для выполнения расчетов доступности канала связи АОЛС для всех регионов расположения АЭС в работе [17].

Таблица 1

Промышленные и энергетические комплексы
Российской Федерации

ТЭС	НПЗ	ГЭС
Сургутская ГРЭС-2	Омский НПЗ	Саяно-Шушенская ГЭС
Рефтинская ГРЭС	Киришинефтеоргсинтез	Красноярская ГЭС
Костромская ГРЭС	Рязанский НПЗ	Братская ГЭС
Пермская ГРЭС	Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез	Усть-Илимская ГЭС
Сургутская ГРЭС-1	Ярославнефтеоргсинтез	Богучанская ГЭС
Рязанская ГРЭС	Лукойл-Волгограднефтепереработка	Волжская ГЭС
	Лукойл-Пермьнефтеоргсинтез	
	Московский НПЗ	
	Ангарская нефтехимическая компания	
	Газпром нефтехим Салават	
	Башнефть-Уфанефтехим	
	Туапсинский НПЗ	

Целью настоящей работы являлось дальнейшее развитие подхода заложенного в работах [5, 17] и проработка концепции использования АОЛС при реализации гибридных линий связи на промышленных и энергетических комплексах Российской Федерации, а также расчета доступности АОЛС на основе данных многолетней статистики метеорологических данных по каждому конкретному региону, где расположены эти промышленные комплексы, приведенные в таблице 1.

2. Общая концепция применения АОЛС

На рисунках 1 и 2 представлен возможный вариант интеграции системы АОЛС, на примере нескольких разнесенных административных зданий, который предлагается реализовывать на крупных промышленных и энергетических комплексах. Атмосферная линия подключается к существующей структурированной кабельной системе (СКС) промышленного объекта, при этом следует отметить, что АОЛС позволяет, в том числе, решить проблемы «последней мили» [26].

В случае необходимости резервирования основного канала связи, при полном переходе на атмосферный оптический канал связи или при использовании «гибридной» связи, когда АОЛС встраивается лишь в часть участка сети связи. Системы АОЛС могут быть установлены на существующих объектах в гибридных конфигурациях, как показано на рисунке 2.

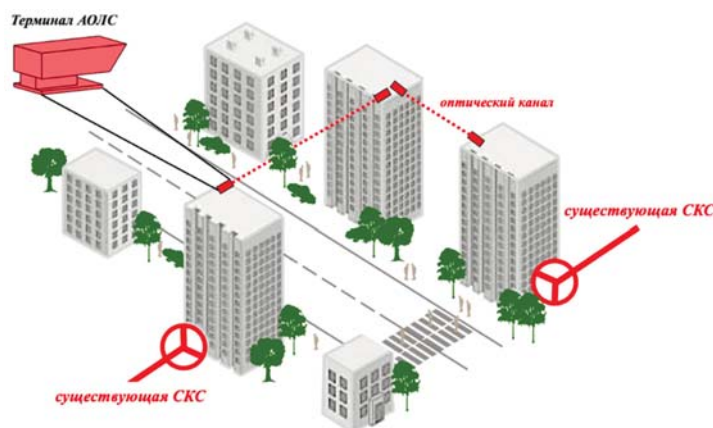


Рис. 1. Концепция применения АОЛС

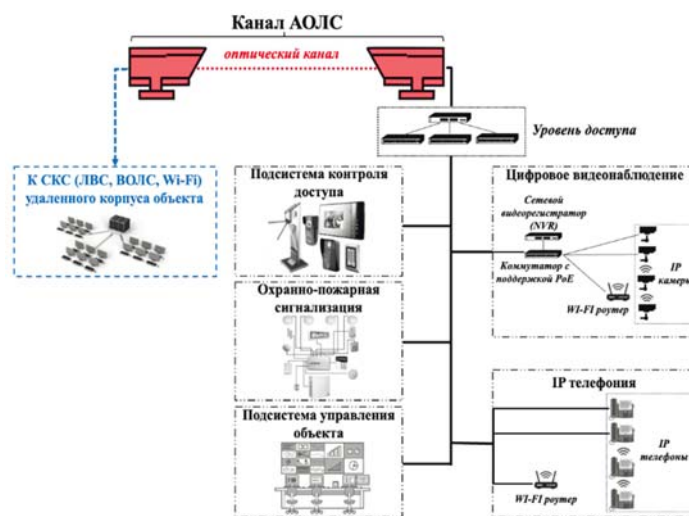


Рис. 2. Концепция применения АОЛС

Отметим возможные области применения АОЛС на промышленных комплексах:

1) мобильная и фиксированная связь в районе расположения объекта: соединение базовых станций в условиях сложной электромагнитной обстановки). Данная область становится все более актуальной, с появлением сетей 5G, так как возникает потребность в высокопроизводительных линиях связи на коротких расстояниях между базовыми станциями;

2) оперативное развертывание резервного канала в случае недоступности основного или во время ремонта основного поврежденного контура инфраструктуры коммуникационной сети предприятия;

3) построение быстродействующей локальной сети по топологии «звезда», «кольцо», «mesh» и подключение ее при необходимости, к Интернету в случае территориально удаленных сегментов сети, в том числе, проходящих через автомобильные и железнодорожные путепроводы, энергетические объекты, создающие сильные электромагнитные помехи, плотную городскую застройку, промышленные зоны, водные преграды, горы и другие участки местности, где прокладка кабельных соединений затруднена, невозможна (к примеру, в силу политики безопасности документированных руководящих принципов организации, регламентирующих, в том числе, управление и защиту информации, а также технические способы ее доведения), либо нерентабельности прокладки оптического кабеля;

4) увеличение пропускной способности существующей инфраструктуры.

Существует несколько подходов для оценки возможности и целесообразности реализации данной концепции применения АОЛС: качественный анализ возможности на основе составления матрицы применимости АОЛС рассматривался в работах [27, 28], где в качестве основы был использован подход работы [29], разработанный для оценки применимости АОЛС на предприятиях нефтегазового комплекса, а в работах [4, 5] была предложена количественная оценка целесообразности использования АОЛС на произвольном промышленном объекте.

Именно этот подход, впервые введенный в работе [4] для анализа перспективности АОЛС на объектах использования атомной энергии представляется нам наиболее правильным способом для определения целесообразности реализации линий связи на основе АОЛС для любых промышленных и энергетических комплексах, рассмотренных в настоящем исследовании. Одним из важнейших параметров, который согласно [4, 5], используется при вычислении критерия целесообразности применения АОЛС на промышленном объекте, является доступность канала атмосферной оптической связи, зависящая от местных климатических условий [17].

3. Анализ метеорологической дальности видимости в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации

Доступность канала АОЛС, вследствие ухудшения видимости (туманы, метели, снегопады, дожди), зависит от изменения параметра «видимости» [29-31]. Соответствие диапазонов «видимости» и погодных условий представлены в таблице 2.

Таблица 2

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

Понятие «видимости» на практике связывают с понятием метеорологической дальности видимости (МДВ) [17, 29]. Очевидно, что, чем больше запас усиления терминала атмосферной линии, тем меньше влияние таких погодных явлений на работоспособность атмосферной линии связи и тем больше может быть протяженность трассы. Методика измерения МДВ чаще всего основывается на ее определении визуально, по определенным, заранее выбранным объектам (тёмным на фоне неба), расстояние до которых известно [30]. Но имеется и ряд фотометрических приборов для инструментального измерения видимости, описанных, к примеру, в работе [31, 32]. Такие приборы используются для измерения видимости на аэродромах, где, определение метеорологической дальности видимости является одной из критически важных величин, от которой зависит безопасность посадки воздушного судна [33]. В условиях хорошей погоды, значение видимости условно считается 10 км, однако, реально, видимость, колеблется, в зависимости от влажности и запыленности воздушной трассы, в диапазоне от 10 до 100 км [31]. При слабом тумане дальность видимости составляет 500-1000 м, а при сильном тумане или сильной песчаной буре может снижаться до 100 метров и даже менее.

Изменение параметра МДВ носит случайный характер, зависящий от времени, конкретного географического места и различных погодных условий, таких как: туман, дымка, снег, дождь и т.п. Однако, в зависимости от конкретных географических условий расположения системы АОЛС, проанализировав статистику МДВ за определенный период, с ближайшей метеорологической станции, когда более надежные, полученные на месте данные отсутствуют, можно выявить систематический характер изменения данного параметра.

Обработанная, с помощью программного комплекса [34], статистика метеорологической дальности видимости (Архив погоды, METAR (gr5.ru)) в период с 2013 по 2024 год, с ближайших аэропортов для исследуемых регионов расположения всех крупных промышленных и энергетических комплексов России представлена на рис. 3-5. На рисунках приведены зависимости параметра МДВ от времени в сутках, полученные для разных месяцев в году, при этом параметр МДВ в конкретный час усреднялся с 2013 по 2024 год. Исходя из графиков, показанных на рисунках 3-5, видно, что для всех регионов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов параметр МДВ:

- повышается в зимний период (ноябрь, декабрь, январь, февраль) в районе 13-18 часов дня, в остальные периоды времени стабильно имеет наименьшие значения;

- снижается в летний период (май, июнь, июль, август) в районе 4-6 часов ночи, а с 10 до 20 часов принимает максимальные значения;

- в зависимости от сезона, принимает минимальные значения в зимний период, а максимальные, в летний.

Такие выводы, а именно, по конкретному потенциальному району расположения приемо-передающих терминалов атмосферной связи, должны, однозначно, учитываться на этапе проектирования такой системы.

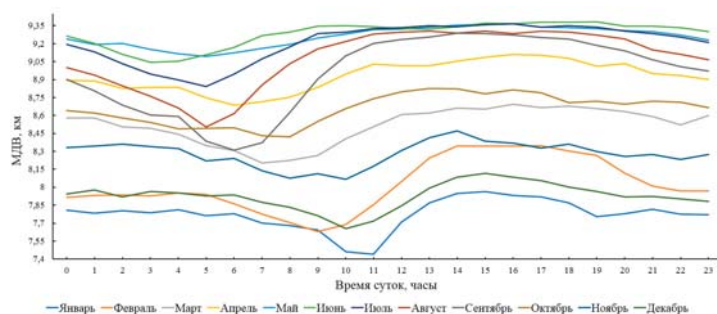


Рис. 3. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых ТЭС на территории Российской Федерации

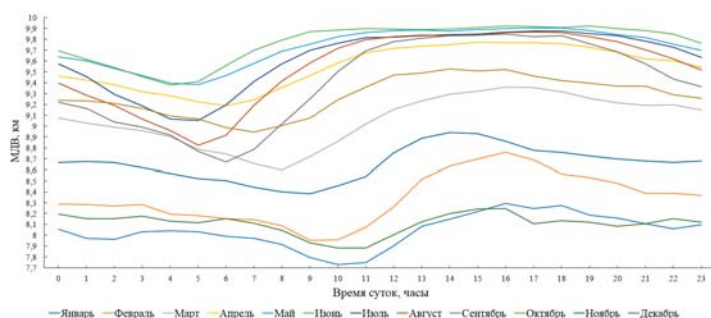


Рис. 4. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых НПЗ на территории Российской Федерации

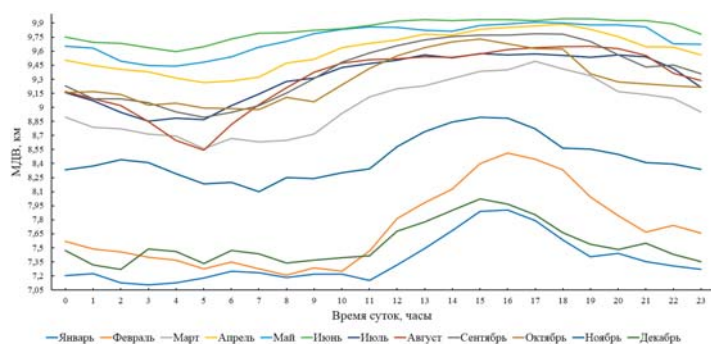


Рис. 5. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток во всех регионах расположения исследуемых ГЭС на территории Российской Федерации

Однако, в указанные периоды, усредненный параметр МДВ все равно принимает приемлемые значения (в районе 7 км), что существенно не должно сказаться на общем параметре доступности системы АОЛС в исследуемых районах, однако, графики, представленные на рисунках 3-5, носят оценочный характер, так как усреднялись по объектам в разных географических регионах.

Очевидно, что для конкретного промышленного объекта необходимо учитывать характерное для данной местности распределение МДВ по времени. Соответствующие особенности распределения параметра дальности видимости с учетом полученных диаграмм зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых крупных промышленных и энергетических комплексов, представлены на рисунках 6-8.

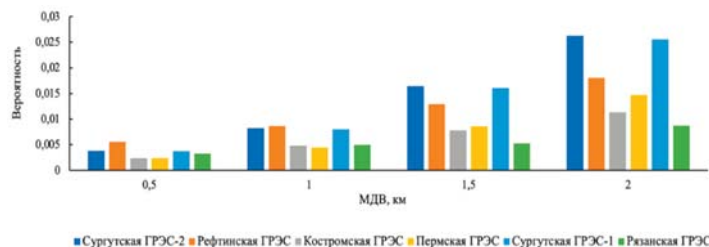


Рис. 6. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых ТЭС на территории Российской Федерации

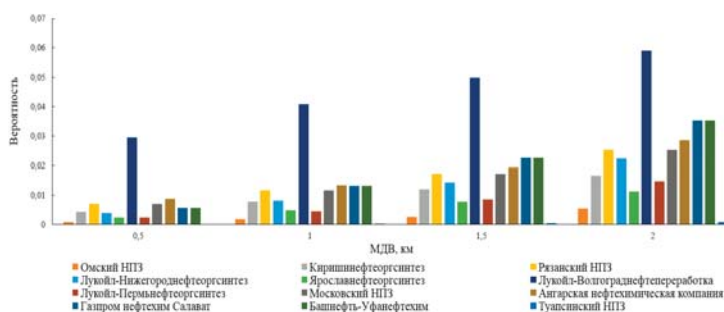


Рис. 7. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых НПЗ на территории Российской Федерации

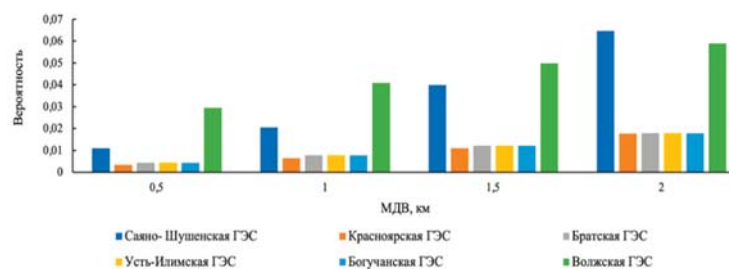


Рис. 8. Диаграмма зависимости МДВ от вероятности МДВ во всех регионах расположения исследуемых ГЭС на территории Российской Федерации

Основываясь на полученных диаграммах (рис. 6-8), можно сделать вывод, что параметр МДВ, в исследуемых регионах, исходя из статистики за 12 лет опускался ниже значения 1 км с максимальной вероятностью 4% с учетом регионов расположения НПЗ Лукойл-Волгограднефтепереработка и Волжской ГЭС, в остальных случаях вероятность не превышала 2%, что говорит о высоких перспективах использования систем связи на основе АОЛС в рассматриваемых регионах. Таким образом, районы расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации достаточно благоприятны для реализации атмосферной оптической связи.

4. Оценка целесообразности использования АОЛС в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации

Доступность канала АОЛС зависит от допустимого ослабления мощности сигнала между передатчиком и приемником на заданном расстоянии между терминалами, климатических особенностей местности и суммарных потерь. Таким образом, доступность канала АОЛС ($A\theta$) можно оценивать исходя из метеорологических условий района установки и параметров терминалов АОЛС. $A\theta$ можно рассчитать по формуле [4]:

$$A\theta = 1 - P_{Vfm},$$

где P_{Vfm} – вероятность снижения МДВ ниже предельной дальности V_{fm} , определяемой запасом усиления оборудования FM на дистанции L (в км).

При этом, V_{fm} (в км) определяется по формуле [4]:

$$V_{fm} = \frac{17}{FM} L,$$

где V_{fm} – предельная дальность в км.

Запас усиления оборудования (FM) является «паспортной» величиной любого терминала АОЛС, и зависит, помимо таких параметров как: общая мощность излучателя, чувствительности приемника и протяжённость трассы, от потерь, обусловленных расходимостью оптического излучения (геометрических потерь).

Потери, обусловленные расходимостью оптического излучения, возникают при распространении сигнала в свободном пространстве от источника к получателю, и обусловлены дифракцией вблизи апертуры приемника, поскольку некоторая часть переданного луча не будет собрана приемником. Расходимость луча является очень важным параметром при проектировании систем АОЛС. В общем случае, предпочтительнее оптический источник с малой расходимостью луча, но, в то же время, диаметр пятна в зоне, нахождения приемника должен быть достаточно большой, чтобы апертура приемника находилась внутри данного пятна при случайных перераспределениях мощности, вызванных турбулентностью атмосферы [35].

В соответствии с описанной методикой оценки доступности АОЛС использовалась программа для ЭВМ «Программный комплекс FSO» [34] для получения зависимостей доступности связи от дистанции (к примеру, изображенные на рис. 8 зависимости доступности от дистанции в регионе расположения Ангарской нефтехимической компании для моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)) при загруженных параметрах терминалов АОЛС (<https://moctkom.ru/mobile-terminals>) и значений метеорологической дальности видимости (Архив погоды, METAR (rp5.ru)) в период с 2013 по 2024 год, с близлежащих аэропортов для исследуемых районов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов.

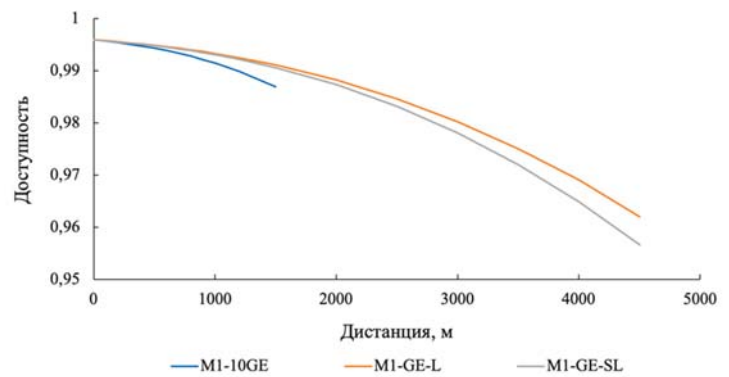


Рис. 9. Зависимости доступности от дистанции в регионе расположения Ангарской нефтехимической компании для моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)

Полученные диаграммы доступностей терминалов атмосферной связи ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) (<https://moctkom.ru/mobile-terminals>) на дистанции до 1 км в районах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации представлены на рисунках 10-12.

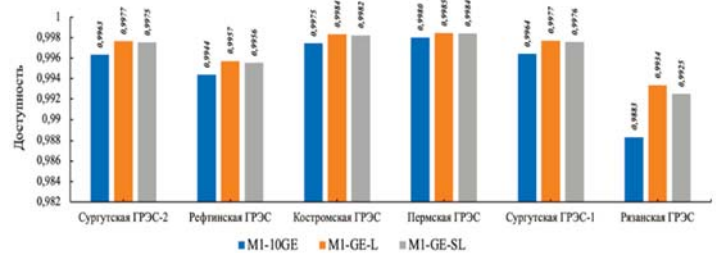


Рис. 10. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения ТЭС Российской Федерации

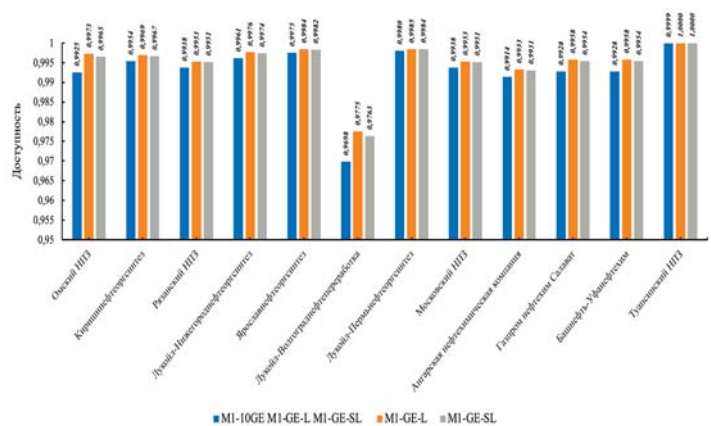


Рис. 11. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения НПЗ Российской Федерации

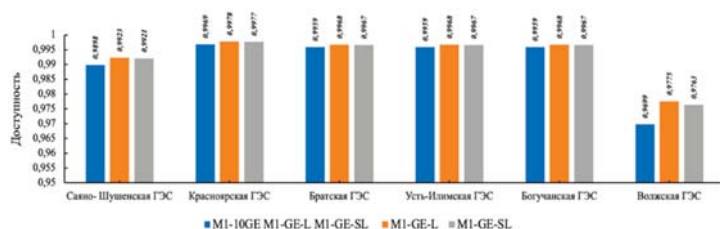


Рис. 12. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах расположения ГЭС Российской Федерации

Из рисунков 10-12 получена сводная диаграмма средних доступностей по каждому приемо-передающему терминалу АОЛС ARTOLINK, представленная на рисунке 13.

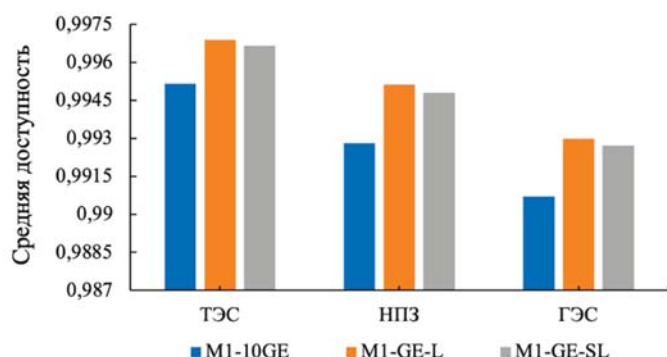


Рис. 13. Диаграмма средних доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL)

Как видно из рисунка 13, для трех моделей АОЛС ARTOLINK (<https://mостком.ru/mobile-terminals>), на дистанции до 1 км, лучший показатель средней доступности у модели ARTOLINK M1-GE-L, минимальное значение которой соответствует исследуемым объектам ГЭС и составляет более 99,3%.

Исходя из рисунков 10-12, можно сделать вывод, что минимальное значение доступности у любых терминалов АОЛС в регионах расположения НПЗ Лукойл-Волгограднефтепереработка и Волжской ГЭС было в районе 97%, поскольку, так как основываясь на рисунках 7-8, в данных регионах параметр МДВ, исходя из статистики за 12 лет, опускался ниже значения 1 км с максимальной вероятностью 4%. Доступность, при использовании терминала ARTOLINK M1-GE-L, в случае остальных районов расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, превышала 98,8%, что является приемлемым, в соответствии с [36], для использования такого вида канала в качестве резервного, а также для регулярного использования этого типа связи. Стоит отметить, что [36] не является единым требованием к функционированию сетей связи, заказчики систем связи могут устанавливать к таким системам свои требования, обусловленные различными факторами. К таким факторам могут относиться: планируемая максимальная нагрузка на проектируемую коммуникационную сеть, ее сложность и необходимость повышенной защищенности передаваемой в сети информации, возможность масштабирования данной сети т.п.

Полученные результаты, несомненно, должны учитывать при проектировании сети, с учетом интеграции в нее систем АОЛС, исходя из конкретного региона расположения объекта.

5. Заключение

Таким образом, численное моделирование характеристик работы атмосферной оптической связи с использованием программного комплекса [34] в регионах расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации, с учетом архива климатических условий региона за 12 лет и параметров современных российских терминалов атмосферной связи подчеркивает, что технология атмосферной связи обладает высоким потенциалом на таких объектах. Дополнительно следует отметить возможность реализации технологии КРК через терминалы АОЛС, которые серийно производит компания АО МОСТКОМ [37]. Оптические терминалы АОЛС располагаются в зоне прямой видимости, а в силу возможности постоянно визуально контролировать линию оптической трассы, это позволяет регистрировать попытки несанкционированного сбора информации с терминалов и заблаговременно пресекать их, что является дополнительным фактором защиты информации, передаваемой в АОЛС.

Полученные результаты моделирования сеанса связи, для рассматриваемых в статье атмосферных терминалов, позволяют определить, какие из предложенных терминалов атмосферной связи подходят под конкретные условия региона расположения крупных промышленных и энергетических комплексов Российской Федерации.

Благодарности. Мироновым Ю.Б. работа выполнялась в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках государственного задания по теме FNEF-2024-0014.

Литература

1. Антонова В.М., Бужин И.Г., Гайфутдинов Э.А. и др. Система управления трафиком в перспективных мобильных сетях на основе технологий SDN/NFV // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 1. С. 113-125. DOI 10.53921/18195822-2023-23-1-113.
2. Antonova V.M., Buzhin I.G., Gayfudinov E.A. et al. Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol. 68, No. 12, pp. 1506-1514. DOI 10.1134/s1064226923120033.
3. Buzhin I., Bessonov M., Mironov Y., Farkhadov M.P. Integrity, Resilience and Security of 5G Transport Networks Based on SDN/NFV Technologies. // In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2021. Communications in Computer and Information Science, 2022, Vol 1552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_9
4. Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В. Применения атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики // Успехи прикладной физики, 2023. Т. 11, №6/ С. 530-539. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539>
5. Kazantsev S.Y., Kuznetsov S.N., Maksimov A.Y., Pchelkina N.V. Prospects for the Use of Atmospheric Optical Communication at Nuclear and Fusion Facilities // Fusion Science and Technology. 2024. Vol. 80, No. 7, pp. 893-903. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2339662>
6. Buzhin I.G., Derevyankin A.Yu., Antonova V.M. et al. Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 50-55. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55.
7. Buzhin I., Mironov Y., Gorodnichev M., Sheremetev A. Comprehensive Assessment of the Quality of Telecommunication Services of Software-Defined Networks // Lecture Notes in Information Systems and Organisation: 3rd, 2022, pp. 207-219. DOI 10.1007/978-3-030-94252-6_15.

8. Buzhin I.G., Antonova V.M., Gaifutdinov E.A., Mironov Yu.B. Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies // T-Comm. 2022. Vol. 16, No. 12, pp. 40-45. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-12-40-45
9. Varlamov O.V., Dymkova S.S. New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. Vol. 6, No. 1, pp. 445-449. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10147930>
10. Dymkova S.S. and 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), Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946.
11. Алевшин В.С. Оценка реализуемости активной фазированной антенной решётки терминала системы спутниковой связи "Экспресс-РВ" // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 8. С. 13-21. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-8-13-21.
12. Bush S.F., Challenger W.A., Mantelet G. A perspective on industrial quantum networks // AVS Quantum Science, 2021. Vol. 3. No. 3. P. 030501. <https://doi.org/10.1116/5.0051881>
13. Велихов В.Е., Ковальчук М.В., Кулик С.П. и др. О межуниверситетской квантовой сети // Электросвязь. 2024. № 11. С. 2-11. DOI 10.34832/ELSV.2024.60.11.001
14. Tang Z., Zhang P., Krawec W. O. and Wang L. Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation // IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 2, pp. 1189-1204, March 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3172374>
15. Paudel H.P., Crawford S.E., Lee Y.-L., Shugayev R.A., Leuenberger M.N., Syamlal M., Ohodnicki P.R., Lu P., Mollot D., Duan Y. Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective // Advanced Quantum Technologies, 2023. Vol. 6, No. 10. P. 2300096. <https://doi.org/10.1002/qute.202300096>
16. Kong P.-Y. A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security // IEEE Systems Journal, 2022. Vol. 16, No. 1, pp. 41-54. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3024956>
17. 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
18. 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
19. 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. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70>
20. Pchelkina N.V., Zhukovsky D.D., Nanidzhanyan A. K., Bushuev E.Y. and Chizhin D.D. 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, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486>
21. Белова О.С. и др. Влияние электрического поля от облака заряженного водного аэрозоля на волоконно-оптические линии связи // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. Т. 50, № 10. С. 21-28. <https://doi.org/10.3103/S1068335623100032>
22. Rabenandrasana J., Kolesnikov O.V., Bolotov D.V., Belova O.S. and Temnikov A.G. The Effect of Pulsed Electromagnetic Fields on the Transmission of Information Over an Optical Cable // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617776>
23. Белова О.С., Болотов Д.В., Бушуев Э.Ю., и др. Влияние атмосферных разрядов на скорость генерации криптографического ключа в системах квантовой коммуникации // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 1. С. 13-20. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-01-13-20>
24. Fahey T. et al. Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications // Atmosphere. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos12070918>
25. Uysal M., Capsoni C., Ghassemloooy Z., Boucouvalas A., Udvary E., "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0>
26. Кузнецов С., Огнев Б., Поляков С. FSO на последней (и не только) миле. Практические результаты // Первая миля. 2009. Т. 10, № 1. С. 30-33.
27. Пронин А.А., Пчелкина Н.В., Усачев К.П., Чиж С.А. Перспективы применения коммерческих атмосферных оптических линий связи // Сб. тр. XII междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. 1-3 февр. 2023, Москва. 2023. Москва: НИЯУ МИФИ. С. 526-527.
28. Пронин А.А., Чиж С.А., Пчелкина Н.В. Исследование возможностей применения атмосферных оптических линий связи в регионах России // Наука, техника, педагогика в высшей школе: материалы всероссийской научно-практической конференции, Москва, 20-27 февраля 2023 г. М.: МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ, 2023. С. 569-575.
29. Зебзеев А.Г., и др. Разработка карты применимости технологий связи для объектов нефтегазовой отрасли // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 5 (37). С. 19-22.
30. Гришин А.И., Крючков А.В. Измерения характеристик атмосферы лидарным и нефелометрическим методами // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, No. 2. С. 156-159. DOI: 10.15372/A0020180212
31. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Издательство Московского университета, 2012. 584 с.
32. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Уч. 2012. СПб.: РГГМУ.
33. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Никишков П.Я., Солонин А.С. Видимость для аэронавигации. Монография, ISBN 978-5-86813-337-4, СПб, 2012, 331с.
34. Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Казанцев С.Ю. Программный комплекс FSO. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024618934. Заявка от 17.04.2024.
35. Керносов М.Ю., Кузнецов С.Н., Огнев Б.И., Паршин А.А. Снижение уровня ошибок при передаче высокочастотных оптических сигналов в условиях турбулентной атмосферы за счет использования статистики уровня приемного сигнала // Фотоника. 2020. Т. 14, № 5. С. 424-437. DOI 10.22184/1993-7296
36. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 25.11.2021 No 1229 "Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования" (Зарегистрирован 28.02.2022 No 67548).
37. Bolotov D.V., et al. 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.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATIONS IN LARGE INDUSTRIAL AND ENERGY COMPLEXES OF THE RUSSIAN FEDERATION

Sergey Yur. 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, National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia, ymironov@jscc.ru
Dmitry N. Terekhin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, o.d.n.terehin@mtuci.ru
Anton V. Burdin, Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I., Saint Petersburg, Russia, bourdine@yandex.ru

Abstract

The concept of implementing hybrid communication lines at industrial and energy complexes of the Russian Federation based on the use of atmospheric optical communication is proposed. Scenarios for deploying a communication network based on the use of atmospheric optical communication line terminals operating in the 1550 nm spectral band are considered. It is shown that significant advances in the development of quantum technologies stimulate research in the field of implementing quantum networks to protect energy grid control systems, for which it is advisable to use hybrid communication lines with data transmission over an optical communication channel, which can be implemented through commercial optical terminals. The possibility of using atmospheric optical communication as a primary and backup channel for data transmission in the regions where large industrial and energy complexes of the Russian Federation are located is analyzed; thermal power plants (TPPs), oil refineries (ORs), and hydroelectric power plants (HPPs) are consistently considered. Based on statistics of climatic conditions in the regions where such facilities are located for 12 years and technical parameters of modern Russian terminals, the efficiency of using optical terminals at large industrial and energy facilities of the Russian Federation is shown.

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

References

- [1] V. M. Antonova, I. G. Buzhin, E. A. Gayfutdinov et al., "Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies," *Information Processes*. 2023. Vol. 23. No. pp. 113-125. DOI 10.53921/18195822_2023_23_1_113.
- [2] V. M. Antonova, I. G. Buzhin, E. A. Gayfutdinov et al., "Traffic Management System in Promising Mobile Networks Based on SDN/NFV Technologies," *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2023. Vol. 68. No. 12, pp. 1506-1514. DOI 10.1134/s1064226923120033
- [3] I. Buzhin, M. Bessonov, Y. Mironov, M. P. Farkhadov, "Integrity, Resilience and Security of 5G Transport Networks Based on SDN/NFV Technologies," *DCCN 2021. Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_9
- [4] S. Yu. Kazantsev, S. N. Kuznetsov, A. Yu. Maksimov, N. V. Pchelkina, "Applications of atmospheric optical communication at nuclear power facilities," *Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances in Applied Physics)*. 2023. Vol. 11. No. 6, pp. 530-539. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539>
- [5] S. Yu. Kazantsev, S. N. Kuznetsov, A. Yu. Maksimov, N. V. Pchelkina, "Prospects for the Use of Atmospheric Optical Communication at Nuclear and Fusion Facilities," *Fusion Science and Technology*. 2024. Vol. 80. No. 7, pp. 893-903. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2339662>
- [6] I. G. Buzhin, A. Yu. Derevyankin, V. M. Antonova et al., "Comparative analysis of the rest and GRPC used in the monitoring system of communication network virtualized infrastructure," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 4, pp. 50-55. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-50-55
- [7] I. Buzhin, Y. Mironov, M. Gorodnichev, A. Sheremetev, "Comprehensive Assessment of the Quality of Telecommunication Services of Software-Defined Networks," *Lecture Notes in Information Systems and Organisation: 3rd, Virtual*, Online. 2022, pp. 207-219. - DOI 10.1007/978-3-030-94252-6_15
- [8] I. G. Buzhin, V. M. Antonova, E. A. Gaifutdinov, Yu. B. Mironov, "Methodology for a comprehensive assessment of the telecommunication services quality of transport networks using SDN/NFV technologies," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 12, pp. 40-45. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-12-40-45.
- [9] O. V. Varlamov, S. S. Dymkova, "New Directions and Trends in the Development of Wave Electronics at the International Conference WECONF," *Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems*. 2023. Vol. 6. No. 1, pp. 445-449. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10147930>
- [10] 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)*, Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4. doi: 10.1109/EMCTECH58502.2023.10296946
- [11] V. S. Aleshin, "Evaluation of the feasibility of an active phased array antenna in the terminal of the express-rv satellite communication system," *T-Comm*, 2021. Vol. 15. No.8, pp. 13-21. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-8-13-21 (in Russian)
- [12] S. F. Bush, W. A. Challenger, G. Mantelet, "A perspective on industrial quantum networks," *AVS Quantum Science*, 2021. Vol. 3. No. 3. P. 030501. <https://doi.org/10.1116/5.0051881>
- [13] V. E. Velikhov, M. V. Kovalchuk, S. P. Kulik et al., "The interuniversity quantum network," *Electrosvyaz*. 2024. No 11, pp. 2-11. DOI 10.34832/ELSV.2024.60.11.001
- [14] Z. Tang, P. Zhang, W. O. Krawec, L. Wang, "Quantum Networks for Resilient Power Grids: Theory and Simulated Evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 38, No. 2, pp. 1189-1204, March 2023, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3172374>
- [15] H. P. Paudel, S. E. Crawford, Y.-L. Lee, R. A. Shugayev, M. N. Leuenberger, M. Syamlal, P. R. Ohodnicki, P. Lu, D. Mollot, Y. Duan, "Quantum Communication Networks for Energy Applications: Review and Perspective," *Advanced Quantum Technologies*, 2023. Vol. 6. No. 10. P. 2300096. <https://doi.org/10.1002/qute.202300096>.
- [16] P.-Y. Kong, "A Review of Quantum Key Distribution Protocols in the Perspective of Smart Grid Communication Security," *IEEE Systems Journal*, 2022. Vol. 16, no. 1, pp. 41-54. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3024956>
- [17] S. Yu. Kazantsev, M. V. Sapozhnikov, D. N. Terekhin, "Development of a map of the applicability of atmospheric optical communications at nuclear power facilities in the Russian Federation," *Nuclear Physics and Engineering*. 2025. Vol. 16. No. 1, pp. 5-12. DOI: 10.56304/S2079562924060162

- [18] A. A. Boev, S. S. Vorobey, S. Y. Kazantsev, et al., "Possibility of creating a modular system for quantum key distribution in the atmosphere," *Technical Physics Letters*, 2022. Vol. 48, No. 8, pp. 11-14. <https://doi.org/10.21883/TPL.2022.08.55051.19192>
- [19] K. Yu. Erokhin, S. Yu. Kazantsev, T. V. Kazieva, Yu. B. Mironov, N. V. Pchelkina, "The applicability of quantum key distribution technology in a free atmosphere when constructing segments of modern quantum communication networks," *Opticheskiy Zhurnal*. 2024. Vol. 91. No. 11, pp. 63-70. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-11-63-70>
- [20] N. V. Pchelkina, D. D. Zhukovsky, A. K. Nanidzhanyan, E. Y. Bushuev, 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, Russia, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617486>
- [21] O. S. Belova, et al., "Experimental Study of the Effect of Electric Fields of Thunderclouds on Fiber-Optic Communication Lines," *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2023. Vol. 50, pp. 429-433. <https://doi.org/10.3103/SI068335623I00032>
- [22] J. Rabenandrasana, O. V. Kolesnikov, D. V. Bolotov, O. S. Belova, A. G. Temnikov, "The Effect of Pulsed Electromagnetic Fields on the Transmission of Information Over an Optical Cable," *2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Vyborg, Russian Federation, 2024, pp. 1-7, <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617776>
- [23] O. S. Belova, D. V. Bolotov, E. Yu. Bushuev, S. E. Grychkin, S. Yu. Kazantsev, T. V. Kazieva, O. V. Kolesnikov, E. P. Stroganova, "The atmospheric discharges influence on the rate of cryptographic key generation in quantum communication systems," *Opticheskiy Zhurnal*. 2025. Vol. 92, No. 1, pp. 13-20. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-01-13-20>
- [24] T. Fahey, et al., "Laser beam atmospheric propagation modelling for aerospace LIDAR applications," *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 918. <https://doi.org/10.3390/atmos12070918>
- [25] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemloooy, A. Boucouvalas, E. Udvary, "Optical Wireless Communications: An Emerging Technology," Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0>
- [26] S. Kuznetsov, B. Ognev, S. Polyakov, "FSO on the "Last (and not only) mile". Practical results," *Last Mile*. 2009. Vol. 10, No. 1, pp. 30-33. (in Russian)
- [27] A. A. Pronin, N. V. Pchelkina, K. P. Usachev, S. A. Chizh, "Prospects for applicability of commercial atmospheric optical communication lines," *12th Int. Conf. on Photonics and Information Optics*, Moscow, 2023, Ed. by V. G. Rodin. Nats. Issled. Yadernyi Univ. MIFI, Moscow, 2023, p. 526. <https://elibrary.ru/kjztqg>
- [28] A. A. Pronin, S. A. Chizh, N. V. Pchelkina, "Study of the Possibilities of Using Atmospheric Optical Communication Lines in the Regions of Russia," *Science, Technology, Pedagogy in Higher Education: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*, Moscow, February 20-27, 2023. Moscow: MOSCOW POLYTECH, 2023, pp. 569-575. <https://elibrary.ru/ikopif>. (in Russian)
- [29] A. G. Zebzeev, E. A. Rybakov, D. P. Starikov, A. G. Chernov, "Development of a map of applicability of communication technologies for oil and gas industry facilities," *Ekspozitsiya. Neft'. Gaz*. No. 5, 19. 2014. <https://elibrary.ru/smknqv>. (in Russian)
- [30] 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
- [31] S. P. Khromov, M. A. Petrosyants, "Meteorology and climatology," Moscow: Moscow University Publishing House, 2012. 584 p. (in Russian)
- [32] N. O. Grigorov, A. G. Saenko, K. L. Voskanyan. RGGMU, Uchebnik, 2012. (in Russian)
- [33] T. A. Bazlova, N. V. Bocharnikov, P. Ya. Nikishkov, A. S. Solonin, "Visibility for air navigation," St. Petersburg, 2012, 331 p. ISBN 978-5-86813-337-4. (in Russian)
- [34] M. V. Sapozhnikov, Yu. B. Mironov, D. N. Terekhin, S. Yu. Kazantsev, RF Certificate of State Registration of Software No. 2024618934, Byull. Izobret., No. 4. 2024. <https://elibrary.ru/vudcdt>.
- [35] M. Y. Kernosov, S. N. Kuznetsov, B. I. Ognev, A. A. Parshin, "Reduction of the level of errors in the transmission of high-frequency optical signals in a turbulent atmosphere due to the use of statistics of the received signal level," *Photonics*. 2020. Vol. 14, pp. 424-437. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.424.436>
- [36] Order of the Ministry of Digital Development, Communications, and Mass Media of the Russian Federation of 25.11.2021 No. 1229 On Approval of the Requirements for Organizational and Technical Support of the Stable Functioning of the Public Communications Network, Registered No. 67548 on February 28, 2022. (in Russian)
- [37] D. V. Bolotov, et al., "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. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10148017>

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, leading engineer, National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia

Dmitry N. Terekhin, degree applicant, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Anton V. Bourdin, PhD, Advisor to the CEO for Innovation, Docent, JSC "Scientific Production Association State Optical Institute Named after Vavilov S.I.", St. Petersburg, Russia