

УДК 621.395.7, 535.14

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539

EDN: AOZOOU

PACS: 42.79.Sz, 03.67.Hk



Применения атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики

С. Ю. Казанцев, С. Н. Кузнецов, А. Ю. Максимов, Н. В. Пчелкина

Проведен анализ перспектив применения на объектах использования атомной энергии атмосферных оптических линий связи. Показано, что современные российские терминалы атмосферной связи позволяют реализовать высокоскоростной обмен данными внутри периметра атомных и тепловых электростанций, а также обеспечить внешний резервный канал связи, защищенный по технологии квантового распределения ключей. Представлена методика для оценки целесообразности использования атмосферной оптической связи на объектах использования атомной энергии, и на основе многолетних метеорологических наблюдений в районе размещения Курской АЭС построены графики доступности атмосферной лазерной связи. Показана высокая перспективность применения атмосферной лазерной связи на объектах использования атомной энергии и промышленных комплексах, расположенных в центральном и южных ФО России.

Ключевые слова: оптическая связь в свободном пространстве, квантовое распределение ключей, безопасность атомной электростанции, коэффициент доступности линий связи.

Введение

Сегодня высокоскоростные и надежные системы передачи данных для современных

промышленных объектов являются важнейшим элементом с точки зрения безопасности и эффективной эксплуатации объекта [1–3]. Общие для всех отраслей промышленности тенденции к максимальной автоматизации производственных процессов и использование систем видеонаблюдения приводят к росту объемов передаваемой информации и предъявляют высокие требования к системам связи на объектах промышленности и энергетики. В дополнение к традиционным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), предусмотренным на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), необходимо всегда иметь резервные каналы передачи информации, способные обеспечить высокую скорость передачи, надежность и защищенность передаваемой информации, которая будет устойчива к различным внешним воздействиям, в том числе к террористическим угрозам.

В современных условиях многие специалисты повышенное внимание уделяют системам атмосферной и спутниковой оптической связи [4–6]. На атмосферных оптических ли-

Казанцев Сергей Юрьевич¹, профессор кафедры НТС, д.ф.-м.н.

E-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru

Кузнецов Сергей Николаевич², директор по ИТ, к.т.н.

E-mail: ksn@mocckom.ru

Максимов Александр Юрьевич³, нач. отдела, к.ф.-м.н.

E-mail: mayu@proryv2020.ru

Пчелкина Наталия Владимировна¹, доцент кафедры, к.т.н.

E-mail: n.v.pchelkina@mtuci.ru

¹ МТУСИ.

Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, 8а.

² АО МОСТКОМ.

Россия, 390000, Рязанская обл., г. Рязань, ул. Урицкого, 35.

³ АО «Прорыв».

Россия, 107140, Москва, Малая Красносельская ул., 2/8, к. 7.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023

Принята к публикации 17.10.2023

© Казанцев С. Ю., Кузнецов С. Н., Максимов А. Ю., Пчелкина Н. В., 2023

ниях связи (АОЛС) сегодня реализуется технология квантового распределения ключа, позволяющая закрыть канал связи от злоумышленника, независимо от того какой вычислительной мощностью он будет располагать [7, 8]. Поэтому предметом настоящей работы являлся анализ перспектив реализации АОЛС на ОИАЭ, создание методики для оценки целесообразности использования данного типа связи и проработка основных сценариев развертывания АОЛС при нештатных ситуациях и в условиях регулярного использования. Поскольку характеристики канала связи АОЛС зависят от погодных условий, для большей определенности в качестве примера анализа эффективности АОЛС был выбран «обобщенный» объект использования атомной энергии, в качестве которой условно принята площадка Курской АЭС. Лидером в области создания перспективных систем АОЛС, которые уже сейчас могут работать в тандеме с оборудованием квантового распределения ключей [8], является фирма АО МОСТКОМ, поэтому параметры серийных изделий этой фирмы и были использованы для выполнения тестовых расчетов доступности в выбранном районе. В качестве характеристик «обобщенного» ОИАЭ (размеры промплощадки, протяженность линий связи и т. п.) были взяты характеристики перспективного промышленного энергокомплекса с реакторами на быстрых нейтронах с пристанционными производствами по фабрикации и переработке ядерного топлива. Такие комплексы создаются в рамках проектного направления «Прорыв» Госкорпорации «Росатом» и предполагаются к сооружению на временном горизонте 2035–2040 гг. Выбор перспективного промышленного энергокомплекса для анализа эффективности АОЛС обусловлен тем, что для повышения безопасности таких объектов на предпроектных стадиях рассматриваются различные оптимизационные решения, направленные на повышение экономической эффективности и безопасности, в том числе и не апробированные предыдущим опытом эксплуатации на объектах ОИАЭ, но имеющие промышленные референции [9]. В то же время, полученные выводы будут во многом применимы для любой современной АЭС большой мощности (с одним или несколькими

энергоблоками электрической мощностью свыше 1 ГВт), в силу подобия технологий, размеров объекта и количества зданий и сооружений, наличия градиентов, влияющих на состояние атмосферы и т. п.

1. Постановка задачи и методика анализа

1.1 Оценка уровня развития технологий АОЛС

В настоящее время для проверки зрелости технологии, выявления основных тенденций в конкретной научной области с успехом применяются методики наукометрического анализа [10]. Для оценки общего потенциала технологий АОЛС был проведен анализ потока научно-технической литературы на временном отрезке с 2010 по 2022 годы с использованием инструментов анализа базы данных SCOPUS. При этом в область поиска включались рецензируемые издания и патенты, индексируемые в БД SCOPUS (<https://www.scopus.com>). Поиск проводился по ключевым словам, в которых должна содержаться фраза «free space optical communication» (оптическая связь в свободном пространстве). В дальнейшем, были использованы инструменты анализа БД для выделения публикаций с наибольшим числом цитирований, а также авторов, организаций и стран с наибольшим вкладом в публикационную активность по тематике АОЛС. Анализ обзорных и исследовательских статей с наибольшим уровнем цитирований за последние 5 лет позволил выделить основные платформы, на которых строятся наиболее эффективные АОЛС. На рис. 1 показана динамика числа научных статей и патентов (за год), в которых в ключевых словах была указана фраза «free space optical communication» от года публикации. Из этого рисунка видна общая тенденция роста публикаций по этой тематике с незначительным провалом, обусловленным пандемией Ковид. Из рис. 1 виден более заметный рост числа регистрируемых патентов, что говорит о зрелости технологии и поступательном развитии этого типа связи (замедление роста публикаций на рис. 1 в период 2019–2022 годы обусловлено пандемией Ковид).

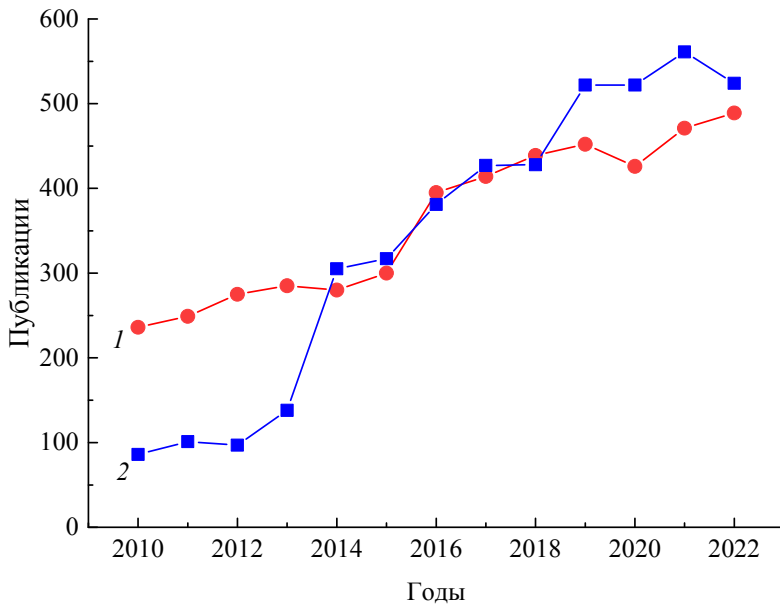


Рис. 1. Количество научно-технических публикаций, индексируемых в БД SCOPUS по тематике АОЛС от года публикации: 1 – статьи; 2 – патенты

Распределение публикаций по странам показано на рисунке 2, из которого видно, что тематика АОЛС активно развивается в странах со сложным рельефом или с плотной застройкой городов, где местные особенности затрудняют прокладку ВОЛС между зданиями и микрорайонами. Анализ последних работ показывает, что значительный интерес вызывает АОЛС также в связи с развитием сетей 5G, как способ реализо-

вать сегмент сети от терминалов сотовой связи до узлов ВОЛС [5]. При этом основное внимание уделяется АОЛС, работающим в спектральной области 1550 нм, что позволяет осуществлять максимально простое подключение к сетям ВОЛС, а также имеет целый ряд других преимуществ [11]. Поэтому при выборе терминалов АОЛС следует ориентироваться на оборудование этого спектрального диапазона.

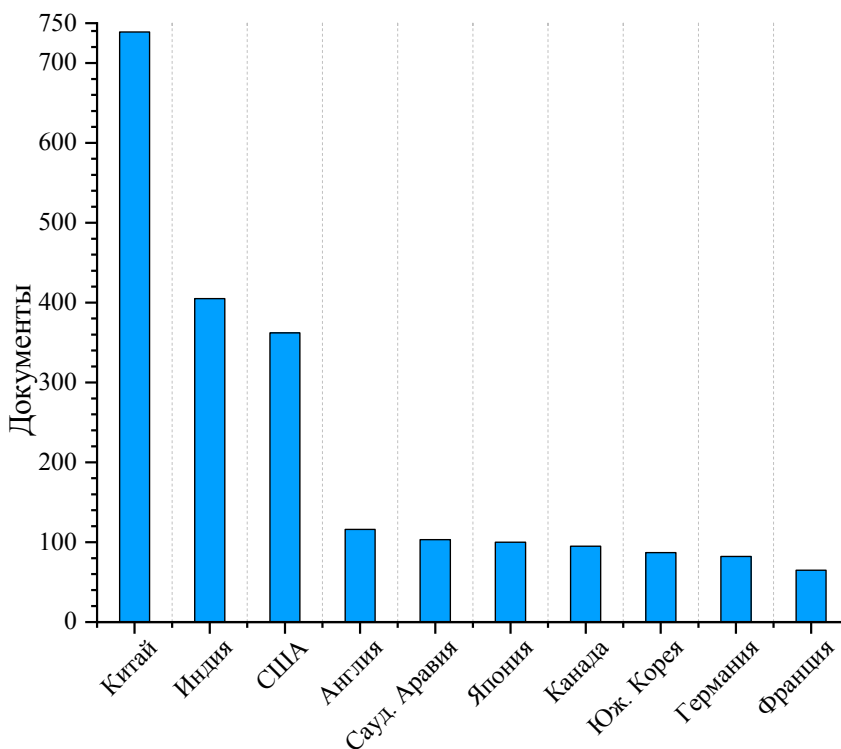


Рис. 2. Распределение стран лидеров по числу публикаций в области АОЛС на основе данных, указанных в аффилиации авторов

1.2 Сравнение различных типов связи для применения в районах ОИАЭ

В таблице 1 для сравнения приведены характеристики различных видов связи, где показаны главные преимущества и недостатки систем связи: по волоконно-оптическим линиями связи (ВОЛС); радиоканалу (на примере радиорелейной линии связи); атмосферной лазерной связи. Из таблицы 1 видны основные преимущества АОЛС: это низкое энергопотребление, быстрота развертывания, высокая защищенность канала связи от внешнего прослушивания или подавления, относительно низкая стоимость развертывания и обслуживания, не требуется получение разрешения на частотный диапазон. Анализ типичных ОИАЭ показывает, что характерный размер площадки объекта не превышает 1 км, на таких дистанциях серийные модули АОЛС, приведенные в табл. 1 могут обеспечить скорости передачи данных 1 Гбит/с и выше.

По нашему мнению, оптимальный сценарий использования АОЛС, когда в ограниченное время нужно обеспечить на локальном участке местности, к которому еще не подве-

дены ВОЛС (либо они повреждены), доступ к сети интернет или локальной сети предприятия. Это достигается установкой терминала АОЛС и подключение к нему WiFi маршрутизатора, обеспечивающего в здании или рабочей площадке (в радиусе до 100 м), доступ к высокоскоростному каналу связи зарегистрированных пользователей. Второй сценарий – необходимость обеспечить резервный канал связи, АОЛС может работать на постоянной основе, чему способствует низкое энергопотребление этой системы. Установка терминала АОЛС вблизи центра объекта теоретически позволяет обеспечить канал связи до любого участка в зоне прямой видимости на территории АЭС. Погодные условия не оказывают заметного влияния на ВОЛС, проложенных под землей, это одно из основных их преимуществ, однако современные АОЛС на указанных дистанциях также устойчиво работают при дожде, в снег и турбулентной атмосфере [12]. Для АОЛС критичен только густой туман, пылевые облака, плотный дым или смог, поэтому для местности, где в атмосфере часто присутствует смог, пыль или туман – АОЛС будут не эффективны.

Таблица 1

Характеристики каналов связи

Характеристика / параметр канала связи	ВОЛС	Радиоканал (РРЛ)	АОЛС	
			ARTOLINK M1 40-GE [10]	ARTOLINK M1 GE-SL [10]
Время на подготовку выполнения монтажа	Подготовка работ и прокладка ВОЛС 1–2 месяца	Подготовка работ 2–3 месяца; установка – несколько часов	Подготовка работ – 1–3 дня; установка – 1–3 часа	Подготовка работ – 1–3 дня; установка – 1–3 часа
Максимальная пропускная способность	До 100 Гбит/с	0,01–1 Гбит/с	40 Гбит/с	1 Гбит/с
Максимальная дальность без усилителя (повторителя)	Не менее 50–70 км	до 80 км	1200 м	15 км
Стоимость, включая НДС	от 1,7 млн руб./км при траншейной прокладке до 570 млн руб./км при прокладке на открытых кабельных эстакадах	От 1,5 до 80 млн руб. за комплект	3 035 796,00 руб. за комплект	Комплект, включающий резервный радиочастотный канал на частоте 5,6 ГГц: 2 501 985,00 руб.
Необходимость аренды частотного диапазона	Не нужно	Нужно	Не нужно	Не нужно
Влияние погоды	нет	есть	есть	практически нет
Возможность саботажа на трассе	Возможно	Маловероятно	Практически исключено	Практически исключено
Энергопотребление	Низкое (100 Вт)	Высокое (1 кВт)	Низкое (50 Вт)	Низкое (50 Вт)

Для оценки применимости АОЛС в конкретной местности предварительно собираются данные о ландшафте и погодных условиях для периода в 10 лет, где анализируются статистики по температуре, влажности, данные об осадках и, наиболее важному параметру, метеорологической дальности видимости [4]. На основании этих данных по методике [13] может быть рассчитана доступность канала оптической связи. Фактически, это параметр надежности связи, который оценивают по проценту времени в году, когда канал связи с заявленными характеристиками скорости будет работать. Для качественной оценки целесообразности выбора АОЛС предлагается следующая методика: строится граф сети, где для каждого сегмента сети рассчитывается целевая функция P_s . В качестве сегмента сети может выступать один из типов связи, указанных в таблице 1. Например, при сравнении АОЛС и ВОЛС, чтобы определить наиболее эффективный тип связи с учетом конкретного запроса потребителем связи, вычисляется квадратичная форма:

$$P_s = K_t^2 \left(\frac{t_{FOL}}{t_{FSO}} \right)^2 + K_{Pw}^2 \left(\frac{P_{w_{FOL}}}{P_{w_{FSO}}} \right)^2 + K_S^2 \left(\frac{S_{FOL}}{S_{FSO}} \right)^2 + K_{Av}^2 \left(\frac{Av_{FSO}}{Av_{FOL}} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь P_s – целевая функция, представляющая собой квадрат модуля радиуса вектора в конфигурационном пространстве параметров, отражающих: время запуска сегмента связи (t_{FOL} и t_{FSO} – время создания сегмента ВОЛС и АОЛС, соответственно); потребляемую оборудованием электрическую мощность ($P_{w_{FOL}}$ и $P_{w_{FSO}}$ – соответственно, электрическая мощность оборудования ВОЛС и АОЛС); стоимость оборудования и его обслуживание (S_{FOL} и S_{FSO} – стоимость сегмента ВОЛС и АОЛС); Av_{FOL} и Av_{FSO} – надежность связи (доступность) для ВОЛС и АОЛС. В формуле (1) с помощью весовых коэффициентов учитывается значимость соответствующей переменной в конфигурационном пространстве, K_t – значимость времени построения сегмента связи; K_{Pw} – значимость величины потреб-

ления электрической мощности сегмента связи; K_S – значимость параметра стоимости сегмента связи; K_{Av} – значимость параметра надежность (доступности) сегмента связи. Если какой-то параметр связи не имеет существенного значения для реализации сегмента связи в текущих условиях, то соответствующий коэффициент значимости принимается равным нулю, а в первом приближении можно проводить оценки P_s , полагая все коэффициенты значимости равными единице. Целесообразность построения сегмента связи на основе АОЛС принимается при выполнении критерия (2):

$$P_s > K_t^2 + K_{Pw}^2 + K_S^2 + K_{Av}^2. \quad (2)$$

Доступность канала атмосферной оптической связи R оценивается исходя из метеорологических условий района установки и параметров оборудования АОЛС. Av можно рассчитать по формуле:

$$Av = 1 - P_{Vfm}, \quad (3)$$

где P_{Vfm} – вероятность снижения метеорологической дальности видимости ниже предельной дальности Vfm , определяемой запасом усиления оборудования ФМ на дистанции L . При этом Vfm (в км) определяется по формуле [13]:

$$Vfm = \frac{17}{FM} L \quad (4)$$

где Vfm – предельная дальность в км. Величина запаса усиления оборудования, ФМ, зависит от характеристик применяемых моделей АОЛС и дистанции. В настоящей работе для тестовых расчетов использовались модели АОЛС: M1-10GE; M1-GE-L; M1-GE-SL [10].

При анализе перспектив применения АОЛС на АЭС важно учитывать, что в системе технического водоснабжения атомных станций повсеместно используются градирни, которые (при мощности энергоблока около 1 ГВт) испаряют в атмосферу порядка 1 т воды в секунду каждая [14, 15]. Конечно, строительство градирен производится с учетом розы ветров, чтобы испаряемая влага пре-

имущественно относилась в направлении от зданий и сооружений на промышленной площадке [15]. Тем не менее, повышенная влажность может привести к ослаблению информационных импульсов, поэтому делались оценки ослабления лазерного излучения, используемого для передачи данных, парами воды. Для оценки поглощения лазерного излучения водяным паром рассчитывается количество осажденной воды ω , представляющее собой толщину слоя воды в мм, которое получится, если при заданном сечении слоя весь содержащийся в атмосфере водяной пар превратить в воду. Величина ω может быть рассчитана по формуле [16]:

$$\omega = \frac{2,167 \times 10^4}{T} f e D. \quad (5)$$

Ослабление лазерного излучения парами воды, τ_{wp} , и коэффициент пропускания атмосферы, k_{wp} , связаны зависимостью:

$$k_{wp} = -\lg(\tau_{wp})/D, \quad (6)$$

где T – температура воздуха, К; f – относительная влажность, относительные единицы; e – упругость насыщенных паров, Па (таблица 2); D – дистанция, км.

Таблица 2

Упругость насыщающих паров в зависимости от температуры воздуха

$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$
-30	$5,088 \times 10^{-5}$	5	$8,719 \times 10^{-4}$
-25	$8,070 \times 10^{-5}$	10	$1,227 \times 10^{-3}$
-20	$1,254 \times 10^{-4}$	15	$1,704 \times 10^{-3}$
-15	$1,912 \times 10^{-4}$	20	$2,337 \times 10^{-3}$
-10	$2,863 \times 10^{-4}$	25	$3,167 \times 10^{-2}$
-5	$4,215 \times 10^{-4}$	30	$4,243 \times 10^{-2}$
0	$6,108 \times 10^{-4}$	35	$5,624 \times 10^{-2}$

В таблице 3 приведены значения ослабления парами воды для количества осажденной воды от 0,1 до 1000 мм для длины волны излучения 1,55 мкм.

Таблица 3

Спектральные коэффициенты пропускания и ослабления лазерного излучения парами воды

1,5 мкм	Толщина слоя осажденной воды, мм												
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
$\tau_{ВП}$	0,997	0,994	0,991	0,988	0,982	0,972	0,960	0,944	0,911	0,874	0,823	0,724	0,616
$k_{ВП}, \text{дБ/км}$	0,001	0,003	0,004	0,005	0,008	0,012	0,018	0,025	0,040	0,058	0,085	0,140	0,210

Как видно из таблицы 3, при максимальном значении слоя осажденной воды в 1 м коэффициент ослабления излучения с длиной волны 1,5 мкм не превышает 0,616 дБ/км.

2. Анализ перспектив применения АОЛС применительно к условному ОИАЭ

2.1 Расчет доступности АОЛС в районе Курской АЭС

Расчеты доступности каналов АОЛС проводились для условий г. Курска. Метеоданные по Курску с 01.05.2005 по настоящее время [17] позволили определить вероятность снижения метеорологической дальности видимости (МДВ) на дистанциях начиная с 0,5 км, полученная зависимость показана на рис. 3.

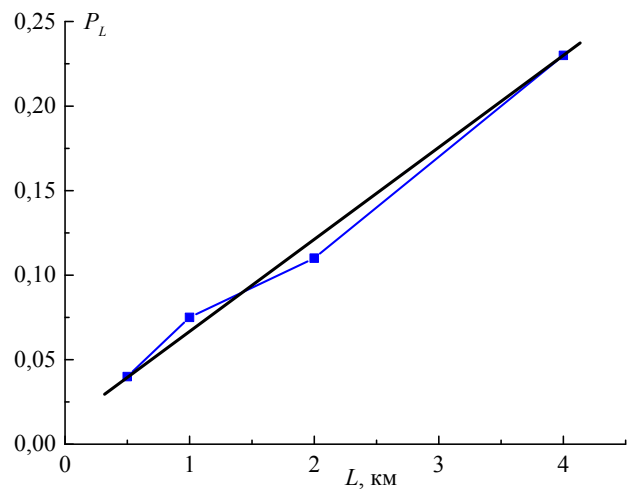


Рис. 3. Зависимость вероятности того, что МДВ будет равна или меньше L

Зависимости FM от дистанции L для моделей АОЛС M1-GE-L, M1-GE-SL и M1-10GE

представлены на графике, показанном на рис. 4. Используя линейную аппроксимацию P_L от МДВ для Курска и кривые $FM(L)$, нетрудно получить зависимости $Av(L)$ по трем моделям АОЛС для Курского региона. Зависимости $Av(L)$ приведены на рис. 5, при этом следует иметь в виду, что рабочие дистанции для моделей M1-GE-L, M1-GE-SL и M1-10GE

ограничены расстояниями 4,5, 15 и 1,2 км соответственно [11]. Как видно из рисунка 5 для трех моделей АОЛС на дистанции до 1 км в районе Курской АЭС доступность будет выше 95 %, что является приемлемым для использования АОЛС в качестве резервного канала связи, а также для регулярного использования этого типа связи.

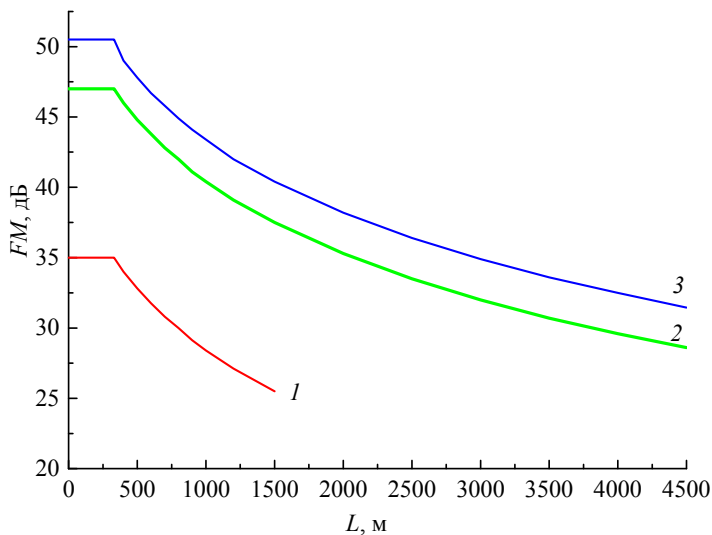


Рис. 4. Зависимости запаса усиления оборудования FM на дистанции L для различных моделей АОЛС [11]: 1 – M1-10GE; 2 – M1-GE-L; 3 – M1-GE-SL

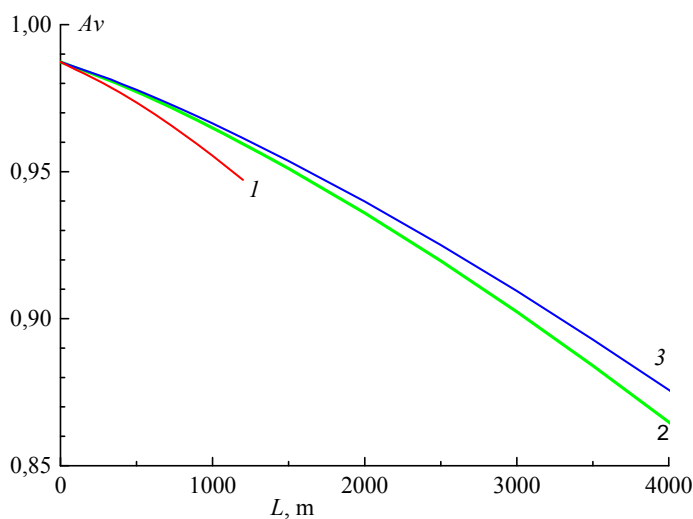


Рис. 5. Зависимости доступности Av от дистанции L для трех разных моделей АОЛС [10]: 1 – M1-10GE; 2 – M1-GE-L; 3 – M1-GE-SL

2.2 Влияние испарений от градиент на работу АОЛС

По метеоданным Курска среднее значение относительной влажности за период с 01.06.2015 г. по настоящее время составляет 72 %. Расчёт количества осаждаемой воды производился по формуле (5) для температуры воздуха +25 °С, влажности 72 % и 100 % и дистанции 1 км. В результате было получено:

$$\omega_1 = \frac{2,167 \times 10^4}{273 + 25} \times 0,72 \times 3,167 \times 10^{-2} \times 1 = 1,658 \text{ мм.}$$

$$\omega_2 = \frac{2,167 \times 10^4}{273 + 25} \times 1 \times 3,167 \times 10^{-2} \times 1 = 2,302 \text{ мм.}$$

Данные об упругости водяных паров для разных температур брались из таблицы 2.

На основе данных таблицы 3, где приведены спектральные коэффициенты пропуска-

ния излучения парами воды для количества осажженной воды, меняющейся от 0,1 до 1000 мм для длины волны излучения 1,55 мкм [16], по формуле (6) были рассчитаны ослабление лазерного излучения парами воды и коэффициент пропускания атмосферы. В частности, для полученных выше значений количества осажженной воды имеем спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды для 1,55 мкм: $\tau_{\text{ВП}_1} = 0,982$ и $\tau_{\text{ВП}_2} = 0,982$, а также значения ослабления лазерного излучения для длины трассы 1 км – 0,008 дБ/км, что пренебрежимо мало по сравнению другими типами потерь на оптической трассе. Запас по усилению на 1 км для всех моделей АОЛС не меньше 27 дБ, поэтому влиянием градиен в случае, если сам аэрозоль не попадает на трассу, можно пренебречь.

Согласно [18], выбросы тепла и влаги градиен Курской АЭС-2 с проектными физическими характеристиками не будут оказывать существенного влияния на микроклимат прилегающей к ним территории, поскольку прирост наземной температуры и удельной влажности воздуха от выбросов градиен незначителен: так, среднегодовые значения приращения наземной удельной влажности воздуха в окрестностях двух градиен (на расстоянии до 1000 м) составят не более $3,4 \times 10^{-4}$ г/кг. Таким образом, доступность канала связи АОЛС в случае любого расположения градиен относительно розы ветров [19], на АЭС не окажет существенного влияния на доступность связи. Поэтому применение АОЛС в результате расчетов целевого параметра целесообразности использования АОЛС дает значение выше критического при типичных затратах на прокладку ВОЛС по территории станции (или организации радиоканала) с учетом диапазона времени, который для этого требуется, что дополнительно свидетельствует на примере Курской АЭС о перспективности использования АОЛС в условиях европейской части России.

Заключение

В статье представлены результаты анализа потока научно-технической информации в области создания АОЛС. Установлено, что этот тип связи активно развивается, техноло-

гия находится в состоянии зрелости, когда появляется много коммерческих разработок для различных практических приложений. На рынке систем АОЛС большие перспективы имеют разработки АО МОСТКОМ [11], которые уже сегодня произвели доработку своих серийных устройств для реализации технологии квантового распределения ключей в свободном пространстве [8]. Таким образом, сегодня АОЛС, обеспечивая повышенную безопасность канала связи, имеют высокую скорость развертывания, достаточно низкую стоимость и дают возможность надежного, высокоскоростного обмена данными на расстояниях до 1 км.

В условиях возможности реализации нескольких типов связи, методика расчета целевого параметра, описанная в настоящей статье, будет полезна для оценки целесообразности использования АОЛС в целях организации стабильной и надежной связи на ОИАЭ. За счет выбора численного значения критерия значимости обеспечивается высокая гибкость оценки целесообразности с учетом конкретных требований. При этом могут вводиться дополнительные слагаемые за счет расширения размерности конфигурационного пространства параметров, например можно учесть по такому же принципу скорость передачи данных, дальность или площадь зоны покрытия, где будет реализована стабильная связь. Анализ влияния градиен показал, что в районе АЭС наличие повышенной влажности от них не оказывает существенного влияния на доступность канала атмосферной оптической связи. На основании проведенных исследований можно констатировать, что в условиях террористических угроз на ОИАЭ или прилегающей территории реализация резервных каналов связи на основе АОЛС представляется самым оптимальным решением для обеспечения высокоскоростного и защищенного канала связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghorbanian M. et al. / IEEE Systems Journal. 2019. Vol. 13. № 4. P. 4001–4014.
2. Abrahamsen F. E., Ai Y., Cheffena M. / Sensors. 2021. Vol. 21. № 23. P. 8087.
3. Xi W. et al. / Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 580–587.

4. Trichili A. et al. / JOSA B. 2020. Vol. 37. № 11. P. A184–A201.
5. Chowdhury M. Z. et al. / IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22. № 2. P. 930–966.
6. Sangeetha R. G., Hemanth C., Jaiswal I. / Optik. 2022. Vol. 254. P. 168675.
7. Боев А. А., Воробей С. С., Казанцев С. Ю., Керносов М. Ю., Колесников О. В., Кузнецов С. Н., Миронов Ю. Б., Паршин А. А., Рудавин Н. В. / Письма в журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 15. С. 15–18.
8. Bolotov D. V., Kazantsev S. Y., Pchelkina N. V., Kuznetsov S. N., Kernosov M. Y. / 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – St. Petersburg, 2023. P. 1–5. doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017
9. Petrenko A., Maksimov A., Katalevich A. / Nuclear Engineering and Design. 2022. Vol. 386. P. 111547.
10. Машиковцева Л. С., Болотов Д. В., Казанцев С. Ю., Колесников О. В., Миронов Ю. Б., Селюков А. С. / Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2022. № 1. С. 22–31.
11. <http://www.moctkom.ru/optical-ground-stations>
12. Kernosov M. Yu., Kuznetsov S. N., Ognev B. I., Parshin A. A. / Photonics. 2020. Vol. 14. № 5. P. 424–437.
13. Uysal M. Optical Wireless Communications. – Springer, 2016.
14. Ayoub A., Gjorgiev B., Sansavini G. / Energy. 2018. Vol. 160. P. 1133–1143.
15. Wang X. et al. / Scientific Reports. 2023. Vol. 13. № 1. P. 11171.
16. Криксунов Л. З. Справочник по основам ИК-техники. – М.: Советское радио, 1978.
17. Архив погоды в Курске / Восточном (аэропорт), METAR (rp5.ru)
18. Материалы обоснования лицензии на осуществление деятельности в области использования атомной энергии «размещение энергоблока № 3 Курской АЭС-2» Книга 3 Предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду энергоблока № 3. KUR34-MOLR03-BDB0003, <https://курчатовский-район.рф/board/650-materialy-ovos-i-mol-i-oprosnyi-list-ro-energobloku-4-kurskoi-aes-2.html>
19. Zargar A., Kodkani A., Peris A., Clare E. et al. / International Journal of Thermofluids. 2022. Vol. 14. P. 100139.

PACS: 42.79.Sz, 03.67.Hk

Prospects for the use of atmospheric optical communication at nuclear power plants

S. Y. Kazantsev¹, S. N. Kuznetsov², A. Y. Maksimov³ and N. V. Pchelkina¹

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics
8a Aviamotornaya st., Moscow, 111024, Russia
E-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru

² JSC MOSTCOM
35 Uritskogo st., Ryazan, 390000, Russia
E-mail: ksn@moctkom.ru

³ JSC Proryv
Bd. 7, 2/8 Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia
E-mail: mayu@proryv2020.ru

Received 25.09.2023; accepted 17.10.2023

The analysis of the prospects for the use of atmospheric optical communication lines on the territory of the nuclear facilities was carried out. It is shown that modern Russian atmospheric communication terminals make it possible to implement high-speed data exchange within the perimeter of a nuclear power plant, as well as to provide an external backup communication channel protected by quantum key distribution technology. A technique for assessing the feasibility of using atmospheric optical communication at nuclear power plants is presented. Based on long-term meteorological observations for the Kursk nuclear power plant, graphs of the availability of atmospheric communication are con-

structured. High prospects for the use of atmospheric laser communication at industrial power complexes located in the central and southern federal districts of Russia are shown.

Keywords: atmospheric optical communication, quantum key distribution, nuclear power plant safety, communication line availability factor.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-530-539

REFERENCES

1. Ghorbanian M. et al., IEEE Systems Journal **13** (4), 4001–4014 (2019).
2. Abrahamsen F. E., Ai Y. and Cheffena M., Sensors **21** (23), 8087 (2021).
3. Xi W. et al., Energy Reports **6**, 580–587 (2020).
4. Trichili A. et al., JOSA B **37** (11), A184–A201 (2020).
5. Chowdhury M. Z. et al., IEEE Communications Surveys & Tutorials **22** (2), 930–966 (2020).
6. Sangeetha R. G., Hemanth C. and Jaiswal I., Optik **254**, 168675 (2022).
7. Boev A. A., Vorobey S. S., Kazantsev S. Y., Kernosov M. Y., Kolesnikov O. V., Kuznetsov S. N., Mironov Y. B., Parshin A. A. and Rudavin N. V., Technical Physics Letters **48**, 11–14 (2022).
<https://doi.org/10.21883/TPL.2022.08.55051.19192>
8. Bolotov D. V., Kazantsev S. Y., Pchelkina N. V., Kuznetsov S. N. and Kernosov M. Y. 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, 2023, pp. 1–5 [in Russian]. doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148017
9. Petrenko A., Maksimov A. and Katalevich A., Nuclear Engineering and Design **386**, 111547 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111547>
10. Mashkovtseva L. S., Bolotov D. V., Kazantsev S. Y., Kolesnikov O. V., Mironov Y. B. and Selyukov A. S., Scientific and technical information. Series 1: Organization and methodology of information work, (2022), pp. 22–31 [in Russian]. doi: 10.36535/0548-0019-2022-01-3
11. <http://www.moctkom.ru/optical-ground-stations>
12. Kernosov M. Yu., Kuznetsov S. N., Ognev B. I. and Parshin A. A., Photonics **14**, 424–437 (2020).
<https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.424.436>
13. Uysal M., Optical Wireless Communications, Springer, 2016.
14. Ayoub A., Gjorgiev B. and Sansavini G., Energy **160**, 1133–1143 (2018).
15. Wang X. et al., Scientific Reports **13** (1), 11171 (2023).
16. Kriksunov L. Z., Handbook on the basics of IR technology, Moscow, Soviet radio, 1978 [in Russian].
17. Kursk / Vostochny (airport) weather archive, METAR (rp5.ru)
18. Materials justifying the licence for activities in the field of atomic energy use. “Nuclear unit № 3 of the Kursk II NPP”. Book 3. Preliminary materials of environmental impact assessment of nuclear unit № 3. KUR34-MOLR03-BDB0003, <https://курчатровский-район.рф/board/650-materialy-ovos-i-mol-i-oprosnyi-list-po-energobloku-4-kurskoi-aes-2.html>
19. Zargar A., Kodkani A., Peris A., Clare E. et al., International Journal of Thermofluids **14**, 100139 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100139>