

РАЗРАБОТКА КАРТЫ ПРИМЕНИМОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2025 г. С. Ю. Казанцев^а, *, М. В. Сапожников^а, **, Д. Н. Терехин^а, ***

^аМосковский технический университет связи и информатики, Москва, 111024 Россия

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

**E-mail: m.v.sapozhnikov@mtuci.ru

***E-mail: d.n.terehin@mtuci.ru

Поступила в редакцию 02.07.2024 г.

После доработки 08.07.2024 г.

Принята к публикации 15.07.2024 г.

Представлен анализ возможностей использования атмосферной оптической линии связи на объектах использования атомной энергетики Российской Федерации в качестве резервного канала связи, а также для регулярного использования. Представлена методика оценки целесообразности использования такого вида связи, и на основе многолетних метеорологических наблюдений во всех районах размещения объектов атомной энергетики на территории Российской Федерации показано, что использование современных российских терминалов атмосферной связи позволит реализовать высокоскоростной обмен данными внутри периметра данных объектов и обеспечит высокую круглогодичную доступность такого канала связи. Разработана карта применимости атмосферной оптической связи, демонстрирующая эффективность применения различных оптических терминалов связи на объектах использования атомной энергетики на территории России.

Ключевые слова: безопасность атомных станций, промышленные энергетические комплексы, оптическая связь в свободном пространстве, атмосферные оптические линии связи, доступность канала связи

DOI: 10.56304/S2079562924060162

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время из-за существенного роста объемов передаваемой информации (передача видеонаблюдения, IP-телефония и т.д.) на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) необходимо всегда иметь резервные каналы передачи информации, которые, в том числе, должны соответствовать высоким требованиям безопасности, поскольку обеспечивают связь на объектах повышенного риска [1]. 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 [2, 3]. Технология квантового распределения ключей сегодня реализована в технических устройствах связи, работающих в телекоммуникационном диапазоне длин волн, которые уже выпускаются серийно в

ряде стран, имеющих научный потенциал для развития квантовых технологий [4]. Наиболее перспективной технологией связи для ОИАЭ, позволяющей обеспечить высокую скорость передачи данных и защиту передаваемой информации, в том числе от квантовых угроз, может являться атмосферная оптическая связь [5].

К преимуществам использования атмосферных оптических линий связи (АОЛС) относят: беспроводная технология — не требуется выполнения специальных работ по прокладке кабелей связи; не требуется получать разрешение на использование частот радиодиапазона; высокий уровень защищенности каналов связи, поскольку данные передаются с помощью узконаправленного луча в оптическом диапазоне; работа со скоростями современной кабельной сети (порядка 10 Гбит/с); отсутствуют задержки при передаче информации как у радиолиний; организация связи через трудно преодолимые преграды (железнодорожные переезды/пути, энергетические объекты создающие сильные электромагнитные помехи, плотную городскую застройку, промышленные зоны, водные преграды, горы и т.п.) небольшое время раз-

вертывания сети (порядка нескольких часов) и простота установки терминалов [6]. Следует также отметить возможность реализации технологии квантового распределения ключей на основе модульного подхода [7] и невосприимчивость АОЛС к электромагнитным помехам, порождаемых грозowymi явлениями, которые могут оказывать деструктивное влияние на передачу данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) [8].

К существенным недостатком АОЛС относят: необходимость обеспечения прямой видимости между приемным и передающим терминалами, ограниченная дальность связи, зависимость от погодных условий (туман, снег, сильный дождь), что особенно сильно сказывается при реализации технологии квантового распределения ключей [9, 10].

Лидером в области создания перспективных систем АОЛС, которые уже сейчас могут работать с оборудованием квантового распределения ключей, является фирма АО МОСТКОМ [1], поэтому параметры серийных изделий этой фирмы использованы для выполнения расчетов доступности канала связи АОЛС для всех регионов расположения объектов атомной энергетики на территории Российской Федерации. Для качественной оценки целесообразности выбора АОЛС или другого типа связи может использоваться методология матрицы применимости [9]. Подход [9] хоть и является более гибким, позволяющим за счет настройки функций принадлежности и правил нечеткого вывода, сформировать оптимальную стратегию развертывания системы связи на данной местности, но при этом требует определения большого количества параметров модели, многие из которых сами являются нечеткими переменными, поэтому нами использовался подход, предложенный в [1, 5].

1. РАСЧЕТ ДОСТУПНОСТИ И ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АОЛС

При прохождении сигналов через атмосферу часть распространяющихся фотонов поглощается молекулярными составляющими воздуха. Для расчета потерь излучения на частицах (аэрозолях) на практике пользуются понятием метеорологической дальности видимости (МДВ) [11, 12]. МДВ — это такое предельное расстояние, на котором в дневное время виден черный предмет на фоне неба, если угловые размеры этого предмета не меньше 15 угловых минут [11]. При расчете энергетического бюджета канала АОЛС определяется оптимальное значение протяженности атмосферной линии связи с учетом климатических особенностей местности и суммарных потерь. Таким образом, доступность канала АОЛС ($A\theta$) можно оценивать исходя из метеорологических условий географического

района и параметров терминалов АОЛС. $A\theta$ можно рассчитать по формуле [1]:

$$A\theta = 1 - P_{V_{fm}},$$

где $P_{V_{fm}}$ — вероятность снижения МДВ ниже предельной дальности V_{fm} , определяемой запасом усиления оборудования FM на дистанции L [км]. При этом V_{fm} [км] определяется по формуле [12]:

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

где V_{fm} — предельная дальность [км]. Величина запаса усиления оборудования FM [дБ] зависит от характеристик применяемых моделей терминалов АОЛС и дистанции.

В соответствии с описанной методикой оценки доступности АОЛС, для облегчения процесса расчетов (поскольку необходимо проанализировать метеоданные со всех городов расположения ОИАЭ на территории Российской Федерации в среднем с 2016 г.) использовалась программа для ЭВМ “Программный комплекс FSO” [13].

В части расчета доступности программа позволяет построить следующие зависимости: вероятности того, что метеорологическая дальность видимости будет равна или меньше дистанции L ; запаса усиления оборудования на дистанции L для введенных параметров моделей АОЛС; доступности связи от дистанции L для введенных параметров моделей АОЛС.

Следует отметить, что при анализе целесообразности и перспектив применения АОЛС на ОИАЭ учитывались достижения в области моделирования работы перспективных ядерных установок [14, 13], методики анализа их характеристик [15, 16], в частности, мощные радиационные и электромагнитные поля, возникающие при работе экспериментальных установок [17–19]. Сильные электромагнитные поля могут оказывать существенные влияния на работу ВОЛС [8, 20], поэтому АОЛС более предпочтительнее использовать, когда линии связи проходят вблизи атомных реакторов или термоядерных установок [5].

2. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АОЛС НА ОИАЭ

Концепция использования АОЛС, изображенная на рис. 1–3, обусловлена следующими факторами, подчеркивающими целесообразность использования такого вида связи на ОИАЭ:

1. Оптическая связь — единственный рентабельный вид связи на участках, где между двумя точками в пределах прямой видимости имеются различные препятствия [9] (водная преграда, железнодорожные пути, автостреды, и т.п.), позволяющая, в перспективе, полностью отказаться от кабелей, соответственно исключив расходы на

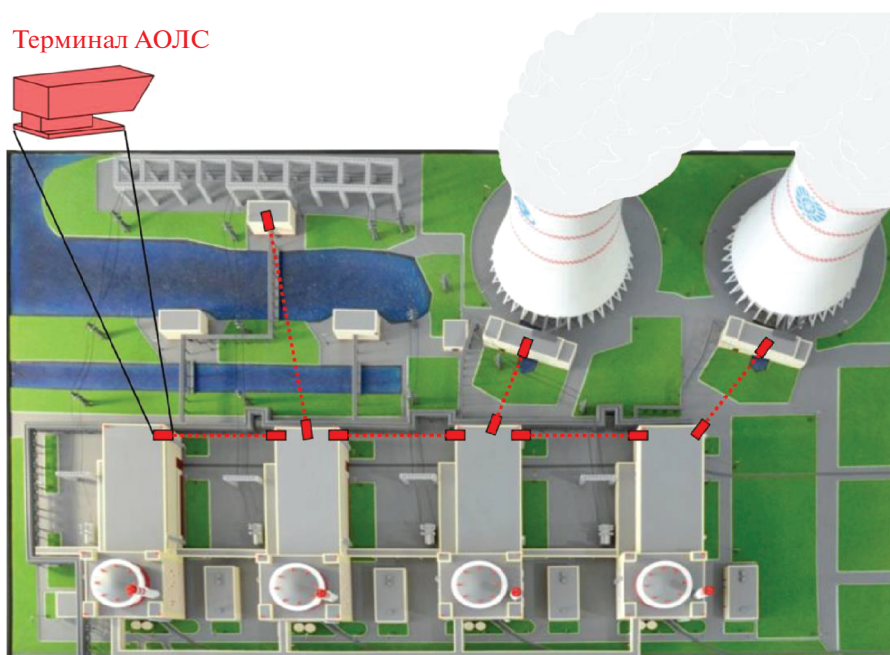


Рис. 1. “Классическая” концепция применения АОЛС на типичном ОИАЭ.



Рис. 2. Концепция применения АОЛС совместно с терминалами круговой диаграммы направленности на макете ОИАЭ.

строительство телефонной канализации и обслуживание кабелей, до минимума сократить сроки и затраты на проектирование [21].

2. Относительно простая организация резервного канала в случае аварий на основном канале

связи, обусловленная простотой монтажа аппаратуры, который способны выполнить 1–2 монтажника из персонала предприятия.

3. Организация связи между двумя узлами внутри крупного промышленного комплекса при

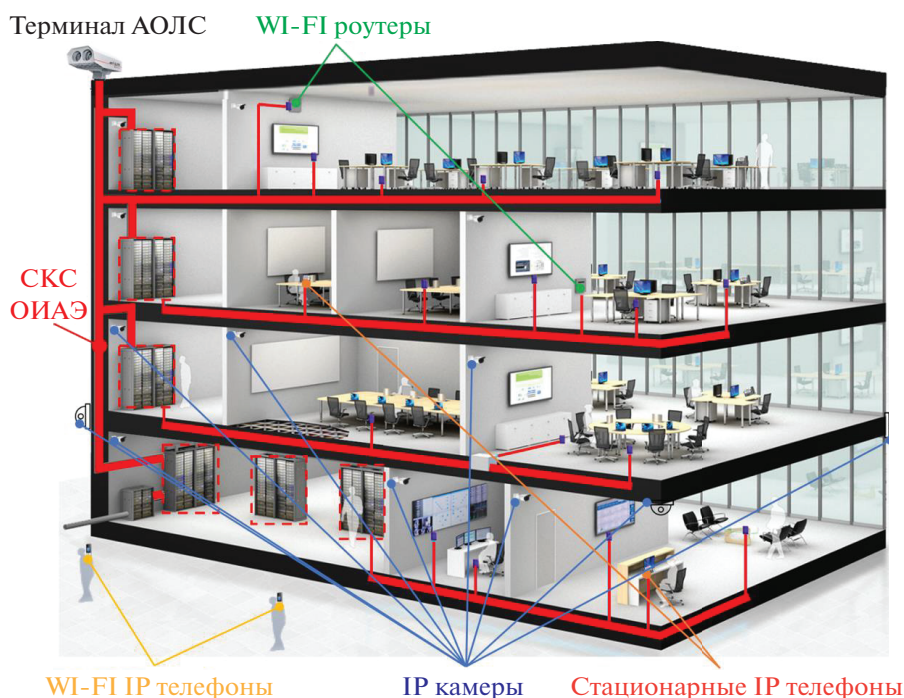


Рис. 3. Концепция применения АОЛС на макете одиночного здания ОИАЭ.

наличии больших объемов трафика (IP-телефония, телеконференция, видеоконференция, видеонаблюдение, служебный трафик и т.п.).

Концепция применения АОЛС, представленная на рис. 2, принципиально отличается от изображенной на рис. 1, тем, что в отличие от “классической” схемы, когда для организации оптической связи между каждым корпусом зданий системы ОИАЭ необходима отдельная пара терминалов, используются оптические терминалы круговой диаграммы направленности [22], обеспечивающие перенаправление оптического излучения в зависимости от требуемого направления на необходимый терминал оптической связи, сокращая тем самым количество терминалов на объектах атомной энергетики.

На рис. 3 представлен возможный вариант интеграции системы АОЛС, на макете одиночного здания ОИАЭ, к существующей структурированной кабельной системе (СКС) объекта энергетики (ЛВС, ВОЛС, Wi-Fi) в случае необходимости резервирования основного канала связи или при полном переходе на атмосферный оптический канал связи.

3. КАРТА ПРИМЕНИМОСТИ АОЛС НА ОИАЭ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В соответствии с методикой оценки целесообразности использования АОЛС [5], при использовании программы для ЭВМ “Программный

комплекс FSO” [13], после проведенного анализа архивов метеоданных, а именно, значений МДВ (к примеру, изменение МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток в регионе расположения Нововоронежской АЭС представлено на рис. 4), со всех городов расположения ОИАЭ на территории Российской Федерации в среднем с 2016 года [23], была получена сводная диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах действующих ОИАЭ РФ (рис. 5).

Из рис. 5 получена сводная диаграмма средних доступностей по каждой модели АОЛС ARTOLINK, представленная на рис. 6.

Как видно из рис. 5, 6 для трех моделей АОЛС на дистанции до 1 км лучший показатель средней доступности у модели ARTOLINK M1-GE-L и составляет 99.42%. Исходя из рис. 6, можно сделать вывод, что доступность, при использовании модели АОЛС M1-GE-L, на всех действующих ОИАЭ Российской Федерации варьируется в пределах 98.1%—99.82% в зависимости от района расположения ОИАЭ, с учетом того, что самое низкое значение доступности на Билибинской АЭС, и составляет 98.1%. Без учета этих данных по данному ОИАЭ, при использовании модели M1-GE-L, доступность на остальных объектах энергетики Российской Федерации варьируется в пределах 99.26—99.82% что является приемлемым, в соответствии с [24], для использования такого вида канала в качестве резервного, а также для регулярного исполь-

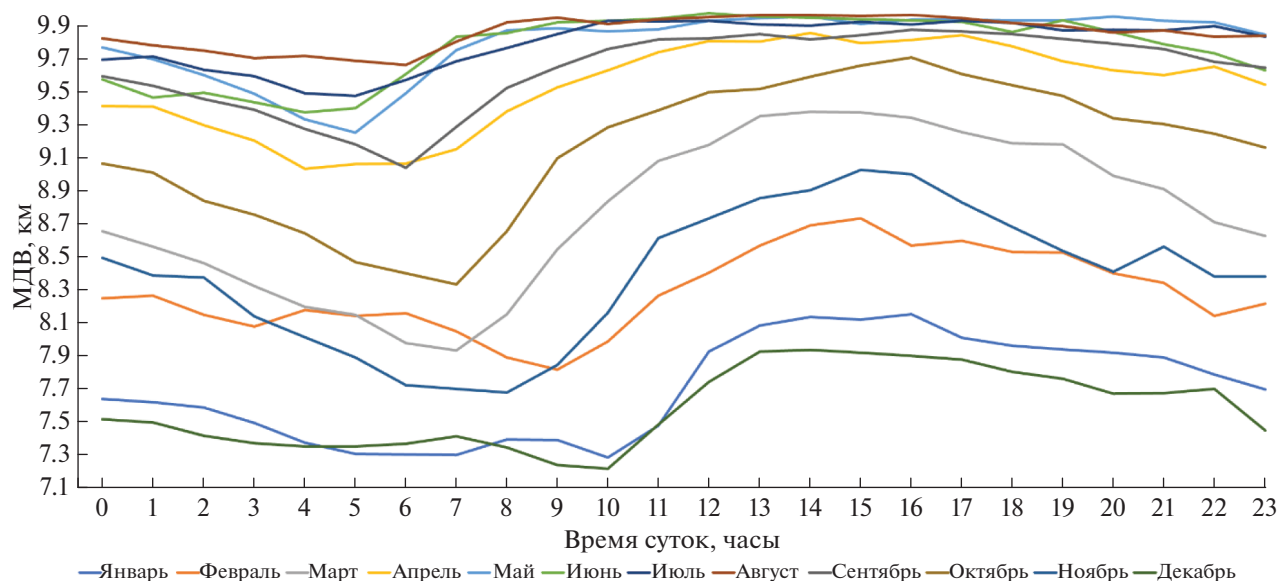


Рис. 4. МДВ в зависимости от месяца в году и времени суток в регионе расположения Нововоронежской АЭС.

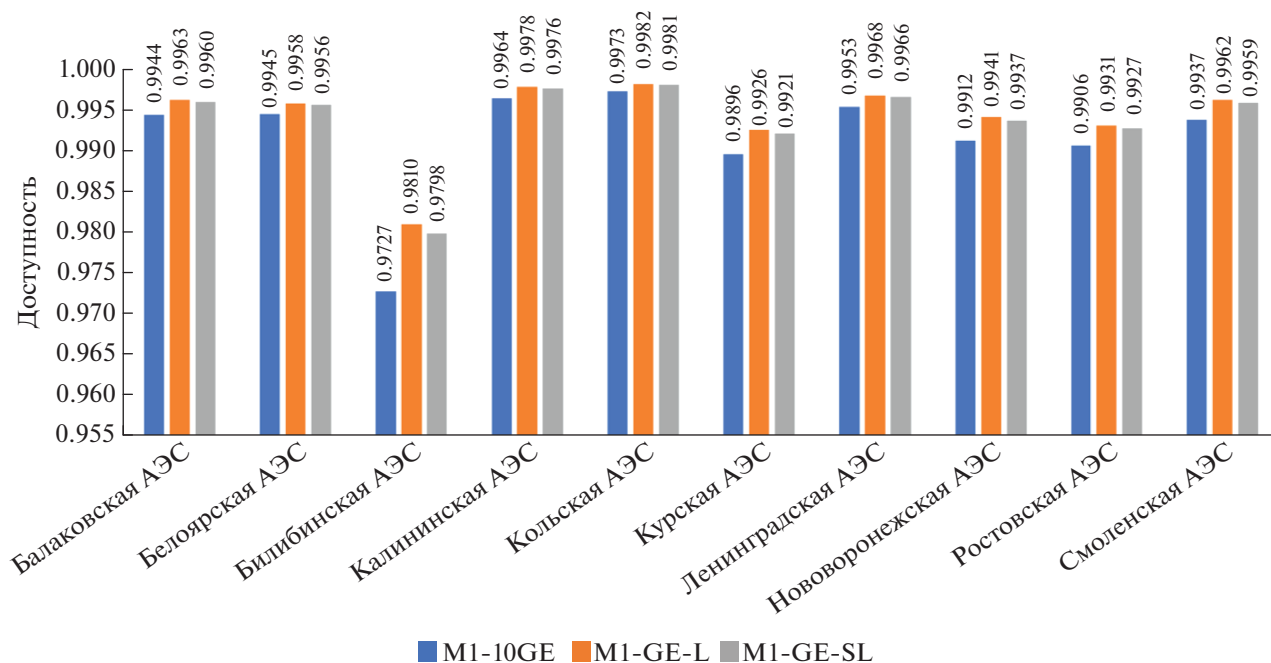


Рис. 5. Диаграмма доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на дистанции до 1 км в районах действующих ОИАЭ Российской Федерации.

зования этого типа связи. Для повышения параметра доступности, на Билибинской АЭС необходимо использовать терминалы с большим значением запаса по усилению, по сравнению с описанными.

Из рис. 5 получена карта применимости атмосферной оптической связи (моделей АОЛС ARTOLINK: M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на ОИАЭ Российской Федерации и представлена на рис. 7.

Следует заметить, что полученные в настоящей работе карты применимости атмосферной оптической связи на ОИАЭ позволяют производить оперативную экспертную оценку наиболее оптимальных решений при выборе данной технологии связи. Исходя из анализа разработанной карты видно, что применение АОЛС обеспечивает надежный, высокоскоростной обмен данными

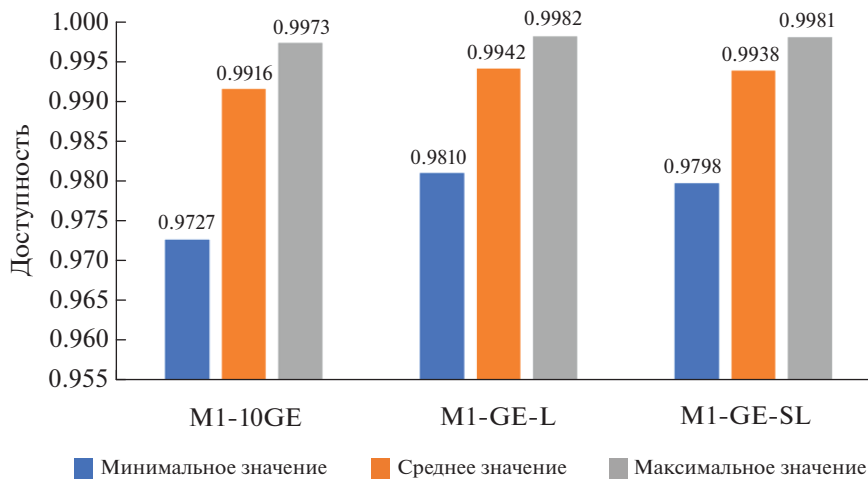


Рис. 6. Диаграмма средних доступностей моделей АОЛС ARTOLINK (M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL).

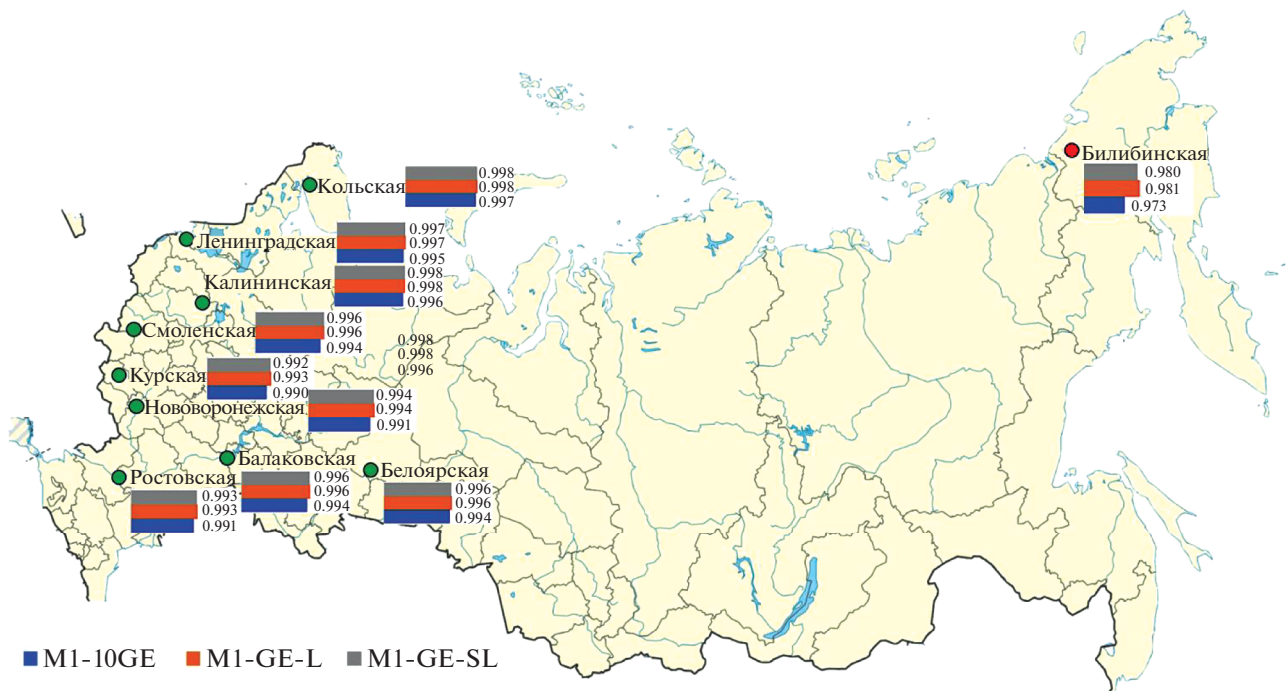


Рис. 7. Карта применимости атмосферной оптической связи (моделей АОЛС ARTOLINK: M1-10GE, M1-GE-L и M1-GE-SL) на ОИАЭ Российской Федерации.

на расстояниях до 1 км на всех ОИАЭ Российской Федерации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом численное моделирование характеристик работы атмосферной оптической связи в географических районах, где располагаются основные ОИАЭ в Российской Федерации,

позволило создать карту применимости АОЛС. Данная карта помогает сделать обоснованный выбор в пользу наиболее оптимального типа связи для использования на ОИАЭ. Следует отметить работы [6, 9], где также рассматривались варианты составления карт применимости типов связи для различных регионов РФ, в том числе для объектов нефтегазового комплекса [6], но в отличие от настоящего исследования большое число па-

раметров, учитываемых в этих работах, затрудняет их практическое использование. В настоящем исследовании продемонстрирован удобный для практического применения подход составления карты применимости АОЛС с использованием программного комплекса в различных географических регионах, в частности получена карта применимости на ОИАЭ РФ для следующих моделей АОЛС: ARTOLINK M1-10GE; ARTOLINK M1-GE-L; ARTOLINK M1-GE-SL. Полученная карта применимости позволяет определить, какие из предложенных моделей АОЛС подходят под конкретные условия региона расположения оптических терминалов. Карта будет полезна при проектировании и организации связи данной технологии на ОИАЭ Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Казанцев С.Ю., Кузнецов С.Н., Максимов А.Ю., Пчелкина Н.В. // Усп. прикл. физ. 2023. Т. 11 (6). С. 530–539.
2. Paudel H.P., Crawford S.E., Lee Y.-L., Shugayev R.A., Leuenberger M.N., Syamlal M., Ohodnicki P.R., Lu P., Molloy D., Duan Y. // Adv. Quantum Technol. 2023. V. 6 (10). P. 2300096. <https://doi.org/10.1002/qute.202300096>
3. Mešter M. // Proc. 23rd Int. Sci. Conf. Electric Power Engineering (EPE). Brno, Czech Republic. 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPE58302.2023.10149255>.
4. Martin V. et al. // EPJ Quant. Technol. 2021. V. 8 (1). P. 19.
5. Kazantsev S.Y., Kuznetsov S.N., Maksimov A.Y., Pchelkina N.V. // Fusion Sci. Technol. 2024. V. 80. <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2339662>
6. Зебзеев А.Г., Рыбаков Е.А., Стариков Д.П., Чернов А.Г. // Экспозиция. Нефть. Газ. 2014. Т. 5 (37). С. 19–22.
7. Bolotov D.V., Kazantsev S.Y., Pchelkina N.V., Kuznetsov S.N., Kernosov M.Y. // Proc. Conf. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2023. <https://doi.org/10.1109/WECONF57201.2023.10148017>
8. Belova O.S., Bolotov D.V., Kazantsev S.Y. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023. V. 50. P. 429–433. <https://doi.org/10.3103/S1068335623100032>
9. Пронин А.А., Пчелкина Н.В., Усачев К.П., Чиж С.А. Перспективы применимости коммерческих атмосферных оптических линий связи. Сб. тр. XII междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. 1–3 февр. 2023, Москва. 2023. Москва: НИ-ЯУ МИФИ. С. 526–527.
10. Bolotov D.V., Kuzmin M.S., Nasaraia A.P., Pchelkina N.V., Kuznetsov S.N. // Proc. Conf. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. <https://doi.org/10.1109/WECONF55058.2022.9803408>.
11. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. Уч. 2012. СПб.: РГГМУ.
12. Uysal M., Capsoni C., Ghassemlooy Z., Boucouvalas A., Udvarý E. (Eds.). Optical Wireless Communications. An Emerging Technology. 2016. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30201-0>
13. Сапожников М.В., Миронов Ю.Б., Терехин Д.Н., Казанцев С.Ю. Программный комплекс FSO. Св-во о рег. прог. для ЭВМ RU 2024618934. Заявка от 17.04.2024.
14. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Aerospace. 2023. V. 10. P. 662.
15. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Теплофиз. выс. темп. 2021. Т. 59 (4). С. 492–501.
16. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Mathematics. 2022. V. 10. P. 2130.
17. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // Comp. Therm. Sci. 2021. V. 13. P. 45–56.
18. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // Appl. Sci. 2023. V. 13 (9). P. 5538.
19. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10. С. 263–270.
20. Kazantsev S.Y., Belova O.S., Bolotov D.V., et al. // Russ. Electr. Engin. 2024. V. 95. P. 259–263. <https://doi.org/10.3103/S106837122470024X>
21. Милютин Е.Р., Гумбинас А.Ю. Статистическая теория атмосферного канала оптических информационных систем. 2002. Москва: Радио и связь.
22. <https://moctkom.ru/mobile-terminals>
23. Архив погоды в Гагарине (аэропорт), Кольцово / им. А.Н. Демидова (аэропорт), Анадыре / им. Ю.С. Рытхэу (аэропорт), Череповце (аэропорт), Мурманск (аэропорт), Курске / Восточном (аэропорт), Пулково (аэропорт), Воронеже / им. Петра Первого (аэропорт), Платове (аэропорт), Болбасово (аэропорт), METAR (rp5.ru).
24. Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 25.11.2021 № 1229 “Об утверждении Требований к организационно-техническому обеспечению устойчивого функционирования сети связи общего пользования” (Зарегистрирован 28.02.2022 № 67548).

Development of the Applicability Map of Atmospheric Optical Communication at Nuclear Energy Facilities of the Russian Federation

S. Yu. Kazantsev^{1, *}, M. V. Sapozhnikov^{1, **}, and D. N. Terekhin^{1, ***}

¹ *Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 111024 Russia*

**e-mail: s.i.kazantsev@mtuci.ru*

***e-mail: m.v.sapozhnikov@mtuci.ru*

****e-mail: d.n.terehin@mtuci.ru*

Received July 2, 2024; revised July 8, 2024; accepted July 15, 2024

Abstract—The possibility of using the atmospheric optical communication line at nuclear power facilities of the Russian Federation as a backup communication channel and for regular use has been analyzed. Using the existing methodology for assessing the feasibility of this type of communication and long-term meteorological observations in all areas of location of nuclear power facilities on the territory of the Russian Federation, it has been shown that the use of existing modern Russian atmospheric communication terminals will allow high-speed data exchange within each perimeter of these facilities and will ensure high year-round availability of such a communication channel. The applicability map of the atmospheric optical line has been developed, emphasizing the high efficiency of application of various communication terminals at nuclear power facilities in the territory of Russia.

Keywords: safety of nuclear power plants, industrial energy complexes, optical communication in free space, atmospheric optical communication lines, availability of communication channel