

Исследование дальности связи радиорелейных линий в диапазонах частот 7-60 ГГц в условиях водных преград

О.Н. Пищин, И.О. Чулков

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – Рассматривается проблема оценки пригодности интервалов радиорелейных линий связи в условиях водных преград без доступа к автоматизированным системам проектирования на цифровых картах. Показано, что для организаций, не имеющих таких систем проектирования, необходимы справочные данные, учитывающие возможности исследуемых систем связи и региональных особенностей мест реализации проектов. Для решения этой проблемы авторы используют программный комплекс ONEPLAN RPLS-DB для планирования и оптимизации радиорелейной связи в простом и понятном интерфейсе. Отмечается, что точность математической модели сети зависит от того, насколько полно в нее включены исходные данные о местности, и что использование автоматизированных систем проектирования беспроводных сетей позволяет повысить качество передачи информации в сети и оптимизировать ее показатели электромагнитной совместимости с беспроводными сетями других стандартов.

Ключевые слова – РРЛ, радиорелейная связь, телекоммуникационные сети, радиопланирование, SESR, интерференция, дальность связи, водные преграды.

I. ВВЕДЕНИЕ

Среди технических средств, применяемых при построении телекоммуникационных сетей, радиорелейные станции (РРС) занимают особое место. Довольно часто их применение остается единственным средством, обеспечивающим строительство высокоскоростных транспортных сетей связи там, где прокладка кабеля невозможна или нецелесообразна по экономическим соображениям. В последнее время востребована реализация линий уровня «последней мили» для предоставления абонентам услуг голосовой телефонной связи, Интернет и кабельного телевидения. В пригородных и сельских районах с недостаточной степенью проникновения современной телекоммуникационной инфраструктуры применение радиорелейных станций решает такую проблему за счет скорости развертывания, относительно быстрой окупаемости и высокой пропускной способности.

Достаточно распространена схема применения радиорелейных станций в составе интегрированной системы абонентского радиодоступа, когда с помощью РРС обеспечивается транспортное соединение для

передачи данных от опорной транспортной сети на точку доступа, к которой подключается оборудование доступа. Такая схема находит свое применение при телефонизации коттеджных поселков и пригородных районов.

Современные системы проектирования радиорелейных систем в большинстве случаев используют программы радиопланирования на основе цифровых карт местности. Но для организаций, не имеющих таких систем проектирования, необходим предварительный выбор оборудования. Решения об организации видов связи и способов их строительства должны базироваться на справочных данных, учитывающих возможности исследуемых систем связи и региональных особенностей мест реализации проектов [1].

II. АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время не существует справочных материалов для оценки пригодности интервалов РРЛ без доступа к автоматизированным системам проектирования на цифровых картах [2]. Тем не менее, потребность в таких данных определяется необходимостью максимально оперативного принятия решений об организации соединительных линий между подразделениями компаний, привязке узлов связи к системам общего доступа и т.д. Справочные материалы (СМ) для оценки пригодностей интервалов РРЛ позволят упростить принятия решений о предварительном проектировании радиорелейных линий связи без доступа к автоматизированным системам проектирования на цифровых картах. Подготовка СМ будет реализовываться на точных расчетах систем предварительного проектирования с использованием цифровой карты Астраханской области (АО). Расчеты будут затрагивать радиопролеты над водной поверхностью.

Для решения задач планирования и оптимизации радиорелейной связи был выбран программный комплекс ONEPLAN RPLS (ООО «ИНФОТЕЛ») и его функциональный модуль RPLS-DB Link [3]. Программный комплекс обладает полным набором функциональных возможностей, позволяющих решать задачи планирования и оптимизации радиорелейной связи в простом и понятном интерфейсе. Кроме того,

программный комплекс позволяет расширить функциональные возможности для решения специфических задач в сжатые сроки, обеспечивает высокую надежность и точность результатов [4].

III. ПРИМЕР РАСЧЁТА

Для реализации проекта была выбрана методика расчета радиорелейных интервалов на базе ГОСТ Р 53363-2009 [5], т.к. она является сертифицированной методикой для расчета радиорелейных интервалов на территории РФ.

Приведем пример расчёта для одного случая (мощность передатчика – 18 дБм, частота передачи – 18 ГГц), который подтвердит правильность методики [6].

Перед началом расчета пригодности радиointервала рассмотрим первую зону Френеля. Большая часть энергии радиорелейного луча присутствует именно в этой зоне. Поэтому критически необходимо, чтобы в этой зоне не находилось никаких оптических преград. Радиус 1-й зоны Френеля [м] рассчитывается по формуле:

$$r_{1F} = \sqrt{\frac{c}{f} \frac{d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}}, \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света;

f – частота (Гц);

d_1 – расстояние первой антенны до точки расчета радиуса первой зоны Френеля [м];

d_2 – расстояние от второй антенны до точки расчета радиуса первой зоны Френеля [м].

Максимальный радиус первой зоны Френеля всегда находится ровно по центру радиолуча, следовательно формула (1) принимает вид:

$$r_{1F \max} = \sqrt{\frac{c}{f} \frac{\frac{d}{2} \frac{d}{2}}{\frac{d}{2} + \frac{d}{2}}} = \sqrt{\frac{c}{f} \frac{d}{4}} = 9,1 \text{ м}, \quad (2)$$

где $f = 18 \cdot 10^9$ Гц – частота;

$d = 20000$ м – расстояние радиointервала, взятое с большим запасом. В дальнейшем покажем, что реально допустимое для данной частоты и мощности передачи расстояние значительно меньше.

Как видно, даже при такой большой протяжённости радиолуча радиус первой зоны Френеля составляет 9.1 м. Следовательно в ходе последующих расчетов выберем такую высоту подвеса антенны, чтобы никакие неровности рельефа точно не попали в первую зону Френеля.

Рассчитаем зависимость (3) потерь [дБ] при распространении в свободном пространстве от расстояния [км] и отобразим на графике (Рис. 1):

$$L_0(R) = 92,45 + 20 \log(f) + 20 \log(R), \quad (3)$$

где $f = 18$ ГГц – частота;

R – протяженность интервала [км].

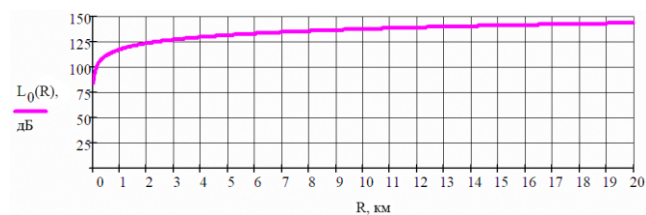


Рис. 1. Зависимость потерь [дБ] при распространении в свободном пространстве от расстояния [км]

Для расчета зависимости ослабления [дБ] радиосигнала в атмосферных газах от расстояния [км] необходимо рассчитать удельное ослабление сигнала в кислороде воздуха и удельное ослабление сигнала в водяном паре [7].

Рассчитаем удельное ослабление сигнала в кислороде воздуха:

$$\gamma_o = \left(\frac{7,2 r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62 \xi_3}{(54 - f)^{1,16 \xi_1} + 0,83 \xi_2} \right) \times f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3} = 9,123 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}, \quad (4)$$

где $t = 29^\circ \text{C}$ – максимальная среднемесячная температура воздуха в АО;

$p = 1021$ мбар – максимальная среднемесячное атмосферное давление в АО;

$$r_t = \frac{288}{273 + t} = 0,954;$$

$$r_p = \frac{p}{1013} = 1,008;$$

$$\xi_1 = r_p^{0,17} r_t^{-1,8132} \times$$

$$\times \exp[0,0156(1 - r_p) - 1,6515(1 - r_t)] = 1,015;$$

$$\xi_2 = r_p^{0,5146} r_t^{-4,6368} \times$$

$$\times \exp[0,1921(1 - r_p) - 5,7416(1 - r_t)] = 0,957;$$

$$\xi_3 = r_p^{0,3414} r_t^{-6,585} \times$$

$$\times \exp[0,2130(1 - r_p) - 8,5854(1 - r_t)] = 0,919$$

Рассчитаем удельное ослабление сигнала в водяном паре:

$$\gamma_{H_2O} = \left[\frac{3,98 \eta_1 \exp[2,23(1 - r_t)]}{(f - 22,235)^2 + 9,42 \eta_1^2} g(f, 22) + \right. \\ + \frac{11,96 \eta_1 \exp[0,7(1 - r_t)]}{(f - 183,31)^2 + 11,13 \eta_1^2} + \\ + \frac{0,081 \eta_1 \exp[6,44(1 - r_t)]}{(f - 321,226)^2 + 6,29 \eta_1^2} + \\ + \frac{3,66 \eta_1 \exp[1,6(1 - r_t)]}{(f - 325,153)^2 + 9,22 \eta_1^2} + \\ \left. + \frac{25,37 \eta_1 \exp[1,09(1 - r_t)]}{(f - 380)^2} + \right]$$

$$\begin{aligned} & + \frac{17,4\eta_1 \exp[1,46(1-r_i)]}{(f-448)^2} + \\ & + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_i)]}{(f-557)^2} g(f, 557) + \\ & + \frac{290\eta_1 \exp[0,41(1-r_i)]}{(f-752)^2} g(f, 752) + \\ & + \frac{83328\eta_2 \exp[0,99(1-r_i)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \Big] \times \\ & \times (f^2 \rho r_i^{2,5} \cdot 10^{-4}) = 0,141 \text{ дБ/км}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\rho = 20$ г/см³ – абсолютная влажность, рассчитанная для средней относительной влажности и максимальных среднемесячных температуры и влажности;

$$\eta_1 = 0,955r_i^{0,68} + 0,006\rho = 1,052;$$

$$\eta_2 = 0,735r_i^{0,5} + 0,0353r_i^4 \rho = 1,307;$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2.$$

Наконец, рассчитаем зависимость ослабления [дБ] радиосигнала в атмосферных газах от расстояния [км] и отобразим на графике (Рис. 2):

$$A_a(R) = (\gamma_o + \gamma_{H_2O})R. \quad (6)$$

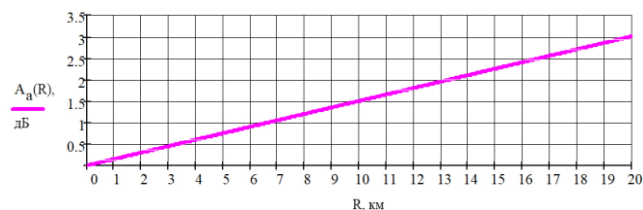


Рис. 2. Зависимость ослабления [дБ] радиосигнала в атмосферных газах от расстояния [км]

Рассчитаем зависимость мощности сигнала на входе приёмника [дБм] от расстояния [км]:

$$\begin{aligned} P_{ПРМ}(R) = & P_{ПРД} + G_1 + G_2 - \\ & - L_0(R) - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - A_a(R), \end{aligned} \quad (7)$$

где $P_{ПРД} = 18$ дБм – мощность передатчика; $G_1 = G_2 = 44,8$ дБ – коэффициенты усиления антенн; $L_{\phi 1} = L_{\phi 2} = 0,5$ дБ – потери в фидерах.

Рассчитаем зависимость запаса на замирания [дБ] от расстояния [км]:

$$F(R) = P_{ПРМ}(R) - P_{ПРМ.порог}, \quad (8)$$

где $P_{ПРМ.порог} = -75$ дБм – пороговый уровень сигнала на входе приёмника.

Рассчитаем зависимость параметра SESR (Severely Errored Second Ratio – доля времени в секундах с

критическими ошибками) [%], обусловленного влиянием осадков от расстояния [км] и отобразим на графике (Рис. 3):

$$SESR_o(R) = P_o(R)Q(R), \quad (9)$$

где $P_o(R)$ – вероятность отказа, вызванная дождём, %; $Q(R)$ – коэффициент для расчета, зависящий от $P_o(R)$.

При расчете $P_o(R)$ используются следующие параметры:

$I = 16$ мм/ч – средняя интенсивность дождей в АО;

$h_1 = h_2 = 20$ м – высоты подвеса антенн;

$k_z = 0,07078$, $k_g = 0,07708$, $\alpha_z = 1,0818$, $\alpha_g = 1,0025$ – коэффициенты, зависящие от частоты передачи (см. рекомендацию МСЭ-R P.838-3); $\tau = 0^\circ$ – угол наклона оси поляризации по отношению к горизонтали. 0° , если поляризация линейная, 45° если круговая.

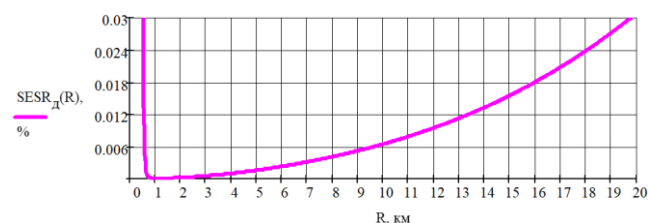


Рис. 3. Зависимость параметра SESR [%], обусловленного влиянием осадков, от расстояния [км]

Рассчитаем зависимость параметра SESR [%], обусловленного интерференционными замираниями, от расстояния [км] и отобразим на графике (Рис. 4):

$$SESR_{инт}(R) = T_{инт}(R) \cdot 10^{-0,1F(R)}, \quad (10)$$

где $T_{инт}(R) = Q_{инт} T_{\Delta\epsilon}(R)$ – процент времени, в течение которого в системе будут интерференционные замирания [%]; $Q_{инт} = 1$ – фактор влияния условий земной поверхности, учитывающий наличие отраженных волн от поверхности Земли. Он принимается равным 1, если отсутствуют значительные неровности рельефа; $T_{\Delta\epsilon}(R) = KcR^d f^b$ – вероятность появления гладких интерференционных замираний [%]; $K = 2 \cdot 10^{-3}$, $c = 0,5$, $d = 2$, $b = 1,5$ – коэффициенты, учитывающие климатические особенности района;

$F(R)$ – запас на замирания [дБ].

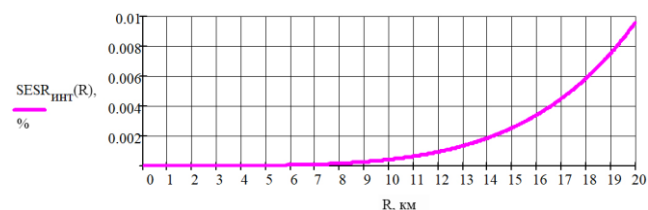


Рис. 4. Зависимость параметра SESR [%], обусловленного интерференционными замираниями, от расстояния [км]

Рассчитаем зависимость общего (суммарного) параметра SESR [%] от расстояния [км]:

$$SESR(R) = SESR_o(R) + SESR_{инт}(R). \quad (11)$$

На Рис. 5 показаны все рассчитанные зависимости параметров SESR, пунктиром показан уровень допустимого значения параметра SESR – 0,006%.



Рис. 5. Рассчитанные зависимости параметров SESR с пересечением на уровне его допустимого значения

Построим зависимость (Рис. 6) пригодности трассы от расстояния [км] (таким образом найдем максимальную дальность связи).

Учитывая, что норма по параметру SESR = 0.006% [6], получаем, что дальность связи для частоты 18 ГГц и мощности передатчика 18 дБм – 9,3 км.

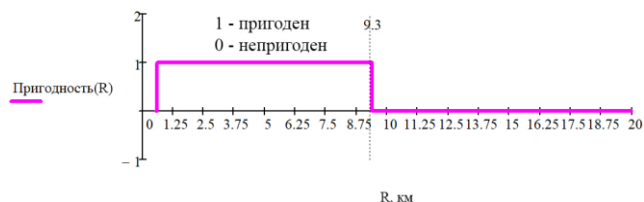


Рис. 6. Зависимость пригодности трассы от расстояния [км] с отметкой на дальности связи.

IV. ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Промоделируем рассмотренный в разделе III случай и проверим правильность расчетов.

Построим в ONEPLAN RPLS-DB Link радиорелейный интервал (Рис. 7) над Волгой с рассчитанной длиной 9,3 км, частотой передачи 18 ГГц, мощностью передатчика 18 дБм, а также остальными параметрами, указанными в расчетах.

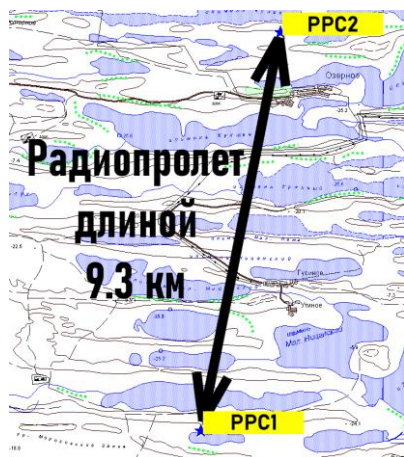


Рис. 7. Моделируемый в ONEPLAN RPLS-DB Link радиорелейный интервал

Проведем расчет пригодности (Рис. 8) этого интервала и подтвердим правильность проделанных расчетов.

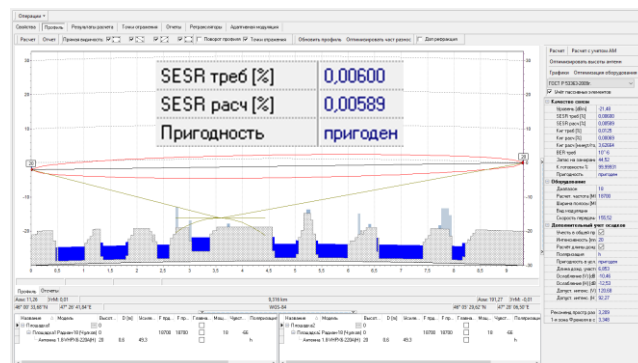


Рис. 8. Расчет пригодности радиорелейного интервала в ONEPLAN RPLS-DB Link.

Как видно из Рис. 8, расчеты оказались верны. Следовательно, можно провести аналогичные расчеты дальности связи для частотных диапазонов 7-62 ГГц и мощностей передатчика 16-30 дБм.

Итоговые результаты расчетов приведены в Табл. I

ТАБЛИЦА I

ИТОГОВАЯ СПРАВОЧНАЯ ТАБЛИЦА С РАССЧИТАННЫМИ ДАЛЬНОСТЯМИ СВЯЗИ НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, КМ				
Частота	Мощность передачи			
	16 дБм	18 дБм	20 дБм	22 дБм
7 ГГц	14,20	16,10	18,40	20,60
10 ГГц	12,23	13,86	15,84	17,74
12 ГГц	11,06	12,55	14,34	16,05
14 ГГц	10,01	11,35	12,98	14,53
18 ГГц	8,20	9,30	10,63	11,90
27 ГГц	5,24	5,94	6,78	7,59
32 ГГц	4,08	4,63	5,29	5,92
42 ГГц	2,48	2,81	3,21	3,59
62 ГГц	0,91	1,04	1,18	1,32
Частота	Мощность передачи			
	24 дБм	26 дБм	28 дБм	30 дБм
7 ГГц	22,70	25,20	27,80	29,80
10 ГГц	19,54	21,70	23,94	25,66
12 ГГц	17,69	19,64	21,66	23,22
14 ГГц	16,01	17,77	19,61	21,02
18 ГГц	13,11	14,56	16,06	17,21
27 ГГц	8,37	9,29	10,25	10,99
32 ГГц	6,52	7,24	7,99	8,56
42 ГГц	3,96	4,40	4,85	5,20
62 ГГц	1,46	1,62	1,79	1,92

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ходе работы была выбрана методика расчета радиорелейных интервалов на базе ГОСТ Р 53363-2009.

По этой методике для случая частоты передачи 18 ГГц и мощности передатчика 18 дБм были рассчитаны:

- потери при распространении в свободном пространстве;

- ослабление радиосигнала в атмосферных газах от расстояния;
- мощность сигнала на входе приёмника;
- запас на замирание;
- параметр SESR, обусловленный влиянием осадков;
- параметр SESR, обусловленный интерференционными замираниями;
- общий (суммарный) параметр SESR;
- дальность связи.

Расчеты проверены моделированием в программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB Link. Модель подтвердила правильность расчетов.

Аналогичные действия проведены для всех случаев (частоты передачи 7-62 ГГц, мощности передатчика 16-30 дБм).

На основании этих действий составлена справочная таблица с дальностями связи над водой для всех частот и мощностей передатчика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи. Учебное пособие для вузов / М. А. Быховский, Ю. М. Кирик, В. И. Носов и др.; Под ред. профессора М. А. Быховского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 332 с: ил. ISBN 978-5-9912-0309-9.
- [2] Голиков А.М. Сети и системы радиосвязи и средства их информационной защиты: учеб. пособие / А.М. Голиков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 392 с. ISBN 978-5-86889-393-3.
- [3] Пищин О. Н., Перова К. В. Новые возможности в современном радиопланировании IV Межрегиональный вебинар «Радиочастотное планирование и электромагнитная совместимость» Материалы IV Межрегионального вебинара. Сборник трудов конференции. Саранск, 2021 С. 18-23.
- [4] Link – InfoTel: [Электронный ресурс]. // InfoTel – ONEPLAN – планирование сетей связи. URL: https://www.rpls.ru/ru/_products/oneplan-rpls-db/link/. (дата обращения: 10.05.2025).
- [5] ГОСТ Р 53363-2009. [Электронный ресурс] // <https://docs.cntd.ru/document/1200073884>. (дата обращения: 10.05.2025).
- [6] ITU-R Recommendations. Radiowave propagation: P-Series. P.525-5 (11/2024). Calculation of free-space attenuation.
- [7] ITU-R Recommendations. P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.

Информация об авторах

Пищин Олег Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, ул. Татищева, 16. Email: o.pishin@yandex.ru

Чулков Илья Олегович – магистрант 2-го года обучения специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, ул. Татищева, 16. Email: gothic061001@yandex.ru

Investigation of the communication range of radio relay lines in the frequency band 7-60 GHz in conditions of water barriers

O.N. Pishchin, I.O. Chulkov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – The article considers the problem of assessing the suitability of radio relay communication line intervals in conditions of water barriers without access to automated design systems on digital maps. It is shown that for organizations that do not have such design systems, reference data is needed that takes into account the capabilities of the communication systems being studied and the regional characteristics of the project implementation sites. To solve this problem, the authors use the ONEPLAN RPLS-DB software to plan and optimize radio relay communication in a simple and intuitive interface. They also note that the accuracy of the mathematical model of a network depends on how fully the initial terrain data is included in, and that the use of automated wireless network design systems makes it possible to improve the quality of information transmission in the network and optimize its electromagnetic compatibility with wireless networks of other standards.

Keywords – RFL, radio relay communication, telecommunication networks, radio planning, the coefficient of strongly affected seconds errors, interference, communication range, water barriers.

References

- [1] Fundamentals of the design of digital radio relay communication lines. Textbook for universities / M. A. Bykhovsky, Yu. M. Kirik, V. I. Nosov and others; Edited by Professor M. A. Bykhovsky. Moscow: Hotline – Telecom, 2014. 332 p.: ill. ISBN 978-5-9912-0309-9.
- [2] Golikov A.M. Radio communication networks and systems and means of their information protection: textbook. / A.M. Golikov. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2007. 392 p. ISBN 978-5-86889-393-3.
- [3] Pishchin O. N., Perova K. V. New opportunities in modern radio planning IV Interregional webinar "Radio frequency planning and electromagnetic compatibility" Materials of the IV Interregional webinar. Proceedings of the conference. Saransk, 2021, pp. 18-23.
- [4] Link – InfoTel: [electronic resource]. // InfoTel – ONEPLAN – communication network planning. URL: https://www.rpls.ru/ru/_products/oneplan-rpls-db/link/. (date of access: 05/10/2025).
- [5] GOST R 53363-2009. [Electronic resource] // <https://docs.cntd.ru/document/1200073884>. (date of access: 05/10/2025).
- [6] ITU-R Recommendations. Radiowave propagation: P-Series. P.525-5 (11/2024). Calculation of free-space attenuation.
- [7] ITU-R Recommendations. P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.