

УДК 537.87

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.29.2.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.29.2.025)

Инженерная модель расчёта уровней сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов с учётом высот поднятия излучающей и приёмной антенн

А.Л. Ханис¹, С.В. Беспалько², В.А. Ханис², А.А. Ханис²

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация.

² Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация.

Резюме: Актуальность статьи обусловлена практическими потребностями расчёта уровней сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн при отсутствии детальных данных о состоянии тропосферы и поверхности земли. В настоящее время существует ряд численных компьютерных моделей расчётов уровней сигналов в условиях загоризонтного распространения радиоволн с учётом высот поднятия излучающей и приёмной антенн, но они требуют большого объема исходной информации в виде детальных данных метеонаблюдений, прогнозов состояния атмосферы, а также данных о рельефе и состоянии поверхности Земли, которые обычно недоступны. Существующие приближённые инженерные модели не требующие детальных данных об условиях распространения радиоволн разработаны применительно к расположению излучающей и приёмной антенн на поверхности Земли. Предлагаемая в данной работе модель основана на введении усредненного множителя ослабления для стандартных условий в тропосфере, передающей и приёмной антенн, размещенных на лётно-подъемных средствах и разбиении трассы распространения на участки прямой видимости и загоризонтного распространения. Цель исследования заключается в разработке и описании модели расчёта уровней сигнала (множителя ослабления) в условиях загоризонтного тропосферного распространения радиоволн, применительно к случаю размещения излучающей и приёмной антенн на лётно-подъемных средствах. Задачи, решаемые для достижения цели, состоят в анализе трассы распространения радиоволн и оценки множителя ослабления на трассе в виде суммы множителей, характеризующих потери на участках трассы различного вида – прямой видимости, зоны дифракции и дальнего тропосферного распространения. Метод оценки множителя ослабления на трассе заключается в использовании в качестве базовой модели расчёта известного инженерного метода для стандартных условий дальнего тропосферного распространения. Результатом работы являются математические выражения для инженерного расчёта уровней сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн с учётом высот поднятия излучающей и приёмной антенн. Предложенная модель основана на введении усредненного множителя ослабления для стандартных условий в тропосфере, передающей и приёмной антенн, размещенных на лётно-подъемных средствах и разбиении трассы распространения на участки прямой видимости и загоризонтного распространения и может быть использована для приближённой оценки уровней принимаемых сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн без детальных данных о состоянии тропосферы и поверхности Земли.

Ключевые слова: множитель ослабления радиоволн, загоризонтное тропосферное распространение радиоволн, расчёт уровней сигналов на трассах распространения радиоволн, передающая антенна, приёмная антенна, лётно-подъемные средства, рефракция, дифракция, прямая видимость.

Для цитирования: Ханис А.Л., Беспалько С.В., Ханис В.А., Ханис А.А. Инженерная модель расчёта уровней сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов с учётом высот поднятия излучающей и приёмной антенн. *Моделирование,*

оптимизация и информационные технологии. 2020;8(2). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/KhanisSoavtors_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.025

An engineering model for calculating signal levels for trans-horizon tropospheric propagation of VHF and microwave ranges taking into account the elevation heights of the emitting and receiving antennas

A.L. Khanis¹, S.V. Bepalko², V.A. Khanis², A.A. Khanis²

¹ *Southwest State University, Kursk, Russian Federation.*

² *Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russian Federation.*

Abstract: The relevance of the article is due to the practical needs of calculating signal levels for over-horizon tropospheric propagation of radio waves in the absence of detailed data on the state of the troposphere and the earth's surface. Currently, there are a number of numerical computer models for calculating signal levels in conditions of over-the-horizon propagation of radio waves, taking into account the elevation of the transmitting and receiving antennas, but they require a large amount of initial information in the form of detailed meteorological observations, forecasts of the state of the atmosphere, as well as data on the terrain and the state of the Earth's surface, which are usually unavailable. The existing approximate engineering models that do not require detailed data about the conditions of radio wave propagation are developed in relation to the location of the transmitting and receiving antennas on the Earth's surface. The model proposed in this paper is based on the introduction of an average attenuation multiplier for standard conditions in the troposphere, transmitting and receiving antennas placed on flight-lifting vehicles and splitting the propagation route into sections of line of sight and over-horizon propagation. The purpose of the study is to develop and describe a model for calculating signal levels (attenuation multiplier) in the conditions of over-horizon tropospheric propagation of radio waves, in relation to the case of placement of radiating and receiving antennas on flight-lifting vehicles. The tasks that are solved to achieve this goal consist in analyzing the radio wave propagation path and estimating the attenuation factor on the route as a sum of factors that characterize losses on sections of the route of various types – line of sight, diffraction zone and far tropospheric propagation. The method for estimating the attenuation factor on the track is to use a well-known engineering method for standard conditions of long-range tropospheric propagation as the base model for calculating the coefficient. The result of this work is a mathematical expression for engineering calculation of signal levels for over-horizon tropospheric propagation of radio waves, taking into account the elevation of the radiating and receiving antennas. The proposed model is based on the introduction of an average attenuation multiplier for standard conditions in the troposphere, transmitting and receiving antennas placed on flight-lifting facilities and splitting the propagation route into sections of line of sight and over-horizon propagation. It can be used for approximate estimation of the received signal levels during over-horizon tropospheric propagation of radio waves without detailed data on the state of the troposphere and the Earth's surface.

Keywords: radio wave attenuation factor, horizontal tropospheric propagation of radio waves, calculation of signal levels on the propagation paths of radio waves, transmitting antenna, receiving antenna, flight-lifting equipment, refraction, diffraction, line of sight.

For citation: Khanis A.L., Bepalko S.V., Khanis V.A., Khanis A.A. An engineering model for calculating signal levels for trans-horizon tropospheric propagation of VHF and microwave ranges taking into account the elevation heights of the emitting and receiving antennas. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(2). Available from: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/KhanisSoavtors_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.025 (In Russ).

Введение

При решении задач электромагнитной совместимости, радиоконтроля и радиосвязи требуется расчёт уровней сигналов в условиях загоризонтного распространения радиоволн с учетом высот поднятия излучающей и приемной антенн, размещенных на летно-подъемных средствах. В настоящее время существует ряд численных компьютерных моделей подобных расчетов, позволяющих найти множитель ослабления радиоволн и, соответственно, уровни принимаемых сигналов с точностью до 1 – 2 дБ [1]. Однако они требуют большого объема исходной информации в виде детальных данных метеонаблюдений, прогнозов состояния атмосферы, а также данных о рельефе и состоянии поверхности Земли, которые обычно недоступны. При отсутствии детальных данных для применений, допускающих меньшую точность, целесообразно использовать эвристические модели, основанные на обобщении результатов наблюдений распространения радиоволн.

Материалы и методы

Применительно к рассматриваемой задаче оценки множителя ослабления при загоризонтном распространении в тропосфере радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов в качестве базовой может быть использована известная модель инженерного расчета уровня сигналов в условиях стандартной тропосферы [2-5]. Модель основана на введении усредненного множителя ослабления для стандартных условий в тропосфере, передающей и приемной антенн на высоте 5-10 м над поверхностью Земли, направленных горизонтально, с суммарным коэффициентом усиления до 60 дБ.

Стандартный множитель ослабления рассчитывается по зависимостям, установленным по данным многочисленных экспериментальных исследований трасс распространения радиоволн. Расчет усредненного множителя ослабления для других условий предусматривает ряд уточняющих поправок к стандартному значению [2-5], учитывающих отклонения от стандартных условий.

Предлагаемая в данной работе модель является расширением указанной модели на случай излучающей и приемной антенн, размещенных на летно-подъемных средствах. Модель строится на основе разбиения трассы распространения радиоволн на участки прямой видимости, дифракции и дальнего тропосферного распространения радиоволн (ДТР). Принято, что длина трассы распространения много меньше радиуса Земли и можно считать, что все расстояния по прямой практически равны расстояниям вдоль дуг на сферической поверхности Земли. Распространение радиоволн до радиогоризонта определяется рефракцией в тропосфере, а за радиогоризонтом - дифракцией и различными механизмами ДТР [2-6]. Для расчета стандартного множителя ослабления на участке ДТР используется приближенный инженерный метод [2-4].

В модели не учитываются отражения от подстилающей поверхности, приводящие к интерференционным колебаниям уровня сигнала около среднего значения, а также их быстрые и медленные замирания при ДТР [2-6]. Указанные явления могут, как уменьшать, так и увеличивать уровни принимаемых сигналов относительно средних значений и определяют точность расчета.

Дальность до радиогоризонта в условиях сферической поверхности Земли и нормальной рефракции приближенно определяется соотношением [1-5]

$$R_{\text{ПРВ}}(\text{км}) = R_{\Gamma_1} + R_{\Gamma_2} = C_{\text{ПРВ}} \sqrt{H_1(\text{км}) + H_2(\text{км})} \quad (1)$$

где H_1 , H_2 – высоты над поверхностью Земли точек излучения и приема,

$C_{\text{ПРВ}} \approx 115$ км – постоянная, характеризующая нормальную рефракцию радиоволн в

тропосфере;

$R_{\Gamma_1} = C_{ПРВ} \sqrt{H_1(\text{км})}$, $R_{\Gamma_2} = C_{ПРВ} \sqrt{H_2(\text{км})}$ – дальности до радиогоризонта для точки расположения ИРИ и точки приема соответственно.

Если расстояние между ИРИ и точкой приема R удовлетворяет условию

$$R_{ЗГР} = R - R_{ПРВ} > 0 \quad (2)$$

то имеет место загоризонтное распространение радиоволн. При этом можно условно выделить три области распространения: прямой видимости длиной R_{Γ_1} от точки 1 расположения ИРИ до радиогоризонта – точки Γ_1 , загоризонтного распространения длиной $R_{ЗГР}$ между точками Γ_1 и Γ_2 , прямой видимости длиной R_{Γ_2} от точки Γ_2 до точки приема (Рисунок 1).

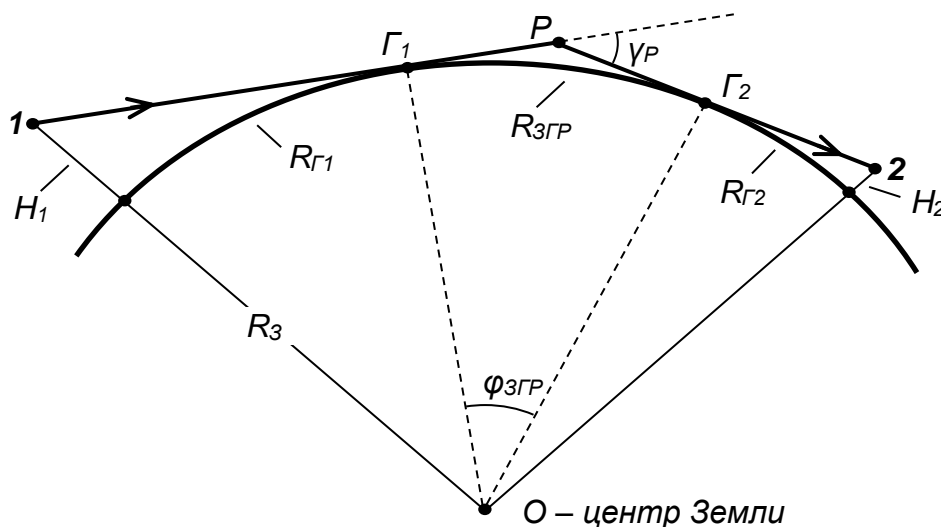


Рисунок 1. Области распространения радиоволн в тропосфере
 Figure 1. Areas of radio wave propagation in the troposphere

Множитель ослабления $b_R(R, f)$ может быть рассчитан как сумма отдельных составляющих для участков прямой видимости и загоризонтного распространения радиоволн:

$$b_R(R, f) = b_R(R_{ПРВ}, f) + b_R(R_{ЗГР}, f) \quad (3)$$

Для участков прямой видимости общей длиной $R_{ПРВ} = R_{\Gamma_1} + R_{\Gamma_2}$

$$b_R(R_{ПРВ}, f) = \mu_{ПРВ}(f) \cdot R_{ПРВ} \quad (4)$$

где $\mu_{ПРВ}(f)$ – величина погонного ослабления радиоволн в нижних слоях тропосферы, зависящая от их частоты и метеоусловий, которая обычно пренебрежимо мала для волн дециметрового диапазона.

На основе данных [2-4] для участка загоризонтного распространения длиной $R_{ЗГР}$ средний множитель ослабления может быть аппроксимирован кусочно-линейными зависимостями:

$$b_R(R_{ЗГР}, f) = b_R'(R_{ЗГР}, f) + b_R''(R_{ЗГР}, f) \quad (5)$$

$$b_R'(R_{ЗГР}, f) = \mu_{ЗГР}(f) \cdot R_{ЗГР} \quad (6)$$

где $\mu_{ЗГР}(f)$ – величина погонного ослабления радиоволн в верхних слоях тропосферы, зависящая от их частоты и метеоусловий;

$$b_R''(R_{ЗГР}, f) = \begin{cases} \beta_d(f) \cdot R_{ЗГР}, & \text{если } 0 \leq R_{ЗГР} < R_{ДТР1} \\ B_1(f) + \beta_1(f) \cdot R_{ЗГР}, & \text{если } R_{ДТР1} \leq R_{ЗГР} < R_{ДТР2} \\ B_2(f) + \beta_2(f) \cdot R_{ЗГР}, & \text{если } R_{ДТР2} \leq R_{ЗГР} < R_{ДТР3} \end{cases} \quad (7)$$

Содержание параметров, входящих в выражение (7), раскрыто далее.

Расчет составляющей $b_R''(R_{ЗГР}, f)$ производится в соответствии с инженерным методом.

Область дифракционного распространения радиоволн ограничивается расстояниями $R_{ЗГР} < R_{ДТР1} \approx 100$ км, далее располагаются первая зона ДТР до расстояния примерно $R_{ДТР2} \approx 200 - 250$ км и вторая зона ДТР до расстояния примерно $R_{ДТР3} \approx 700 - 800$ км [2-4].

На Рисунке 2 представлен стандартный множитель ослабления при ДТР для радиоволн различных диапазонов [2-4].

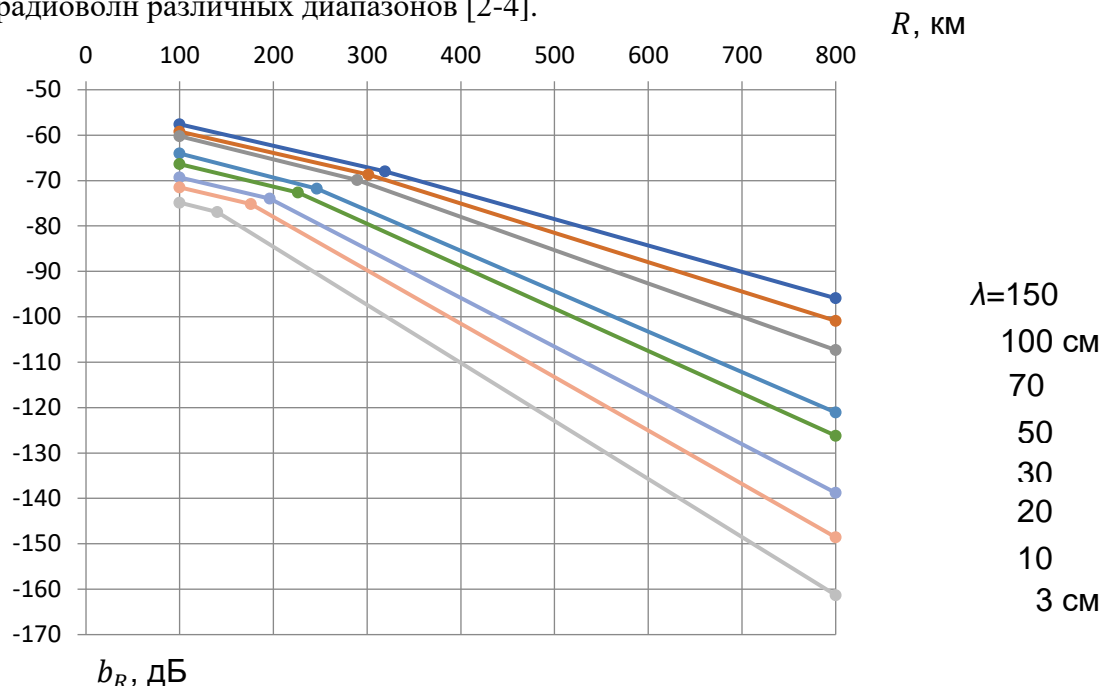


Рисунок 2. Стандартный множитель ослабления в зависимости от расстояния
Figure 2. A standard multiplier of attenuation depending on the distance

По данным Рисунка 2 найдены параметры кусочно-линейной аппроксимации стандартного множителя ослабления при ДТР, представленные в Таблице 1.

Таблица 1. Зависимости параметров линейной аппроксимации стандартного множителя ослабления для ближней и дальней зон ДТР от частоты
Table 1. Dependences of linear approximation parameters of the standard attenuation multiplier for the near and far zones of the DTR on the frequency

λ , см/ cm	f, МГц/ MHz	$R_{ДТР1}$, км/ $R_{ДТР1}$, km	$R_{ДТР2}$, км/ $R_{ДТР2}$, km	$R_{ДТР3}$,км/ $R_{ДТР3}$, km	Ближняя зона-1/ Near zone-1		Дальняя зона-2/ Far zone-2	
					B1 дБ/ dB	β_1 дБ/км/ dB / km	B2 дБ/ dB	β_2 дБ / km
150	200	100	319	800	-57,6	0,047	-68,0	0,058
100	300	100	301	800	-59,2	0,047	-68,7	0,065
70	429	100	289	800	-60,2	0,051	-69,9	0,073
50	600	100	264	800	-62,4	0,050	-70,6	0,078
30	1000	100	246	800	-64,0	0,053	-71,8	0,089
20	1500	100	226	800	-66,4	0,050	-72,7	0,093
10	3000	100	196	800	-69,3	0,049	-74,0	0,107
6	5000	100	176	800	-71,5	0,048	-75,2	0,118

3	10000	100	140	800	-74,9	0,051	-76,9	0,128
---	-------	-----	-----	-----	-------	-------	-------	-------

В Таблице 1 приняты обозначения:

$R_{ДТР1}$ – начало ближней зоны ДТР;

$R_{ДТР2}$ – граница между ближней и дальней зонами ДТР;

$R_{ДТР3}$ – конец дальней зоны ДТР,

V, β – коэффициенты линейной аппроксимации множителя ослабления для ближней (индекс 1) и дальней (индекс 2) зон ДТР.

Поправка на метеоусловия к стандартному множителю имеет вид [3]:

$$\Delta b_{RM}(\text{дБ}) = \begin{cases} (0,93 - 1,63 \cdot 10^{-3}R)(N - 310) & \text{для } R = 100 - 350 \text{ км} \\ (0,5 - 0,4 \cdot 10^{-3}R)(N - 310) & \text{для } R = 350 - 800 \text{ км} \end{cases} \quad (8)$$

где N – индекс рефракции у поверхности Земли.

Индекс рефракции определяется как $N=(n-1) \cdot 10^6$, где n – показатель преломления. Он может быть рассчитан для радиоволн по усредненным метеоданным на основе выражения [1, 3, 6-7]:

$$N(P, T, e) = K_1 \frac{P}{T} + K_2 \frac{e}{T^2}, \quad (9)$$

где P – полное атмосферное давление в мбар;

T – абсолютная температура;

e – парциальное давление водяного пара в мбар;

$K_1 = 77,6 \text{ К/мбар}$;

$K_2 = 3,73 \cdot 10^5 \text{ К}^2/\text{мбар}$.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера рассчитаны множители ослабления для случая:

$\lambda=10 \text{ см}$; $H_1=10 \text{ км}$; $H_2=0,02 \text{ км}$, $0,25 \text{ км}$ и 1 км .

Результаты расчетов представлены на Рисунке 3.

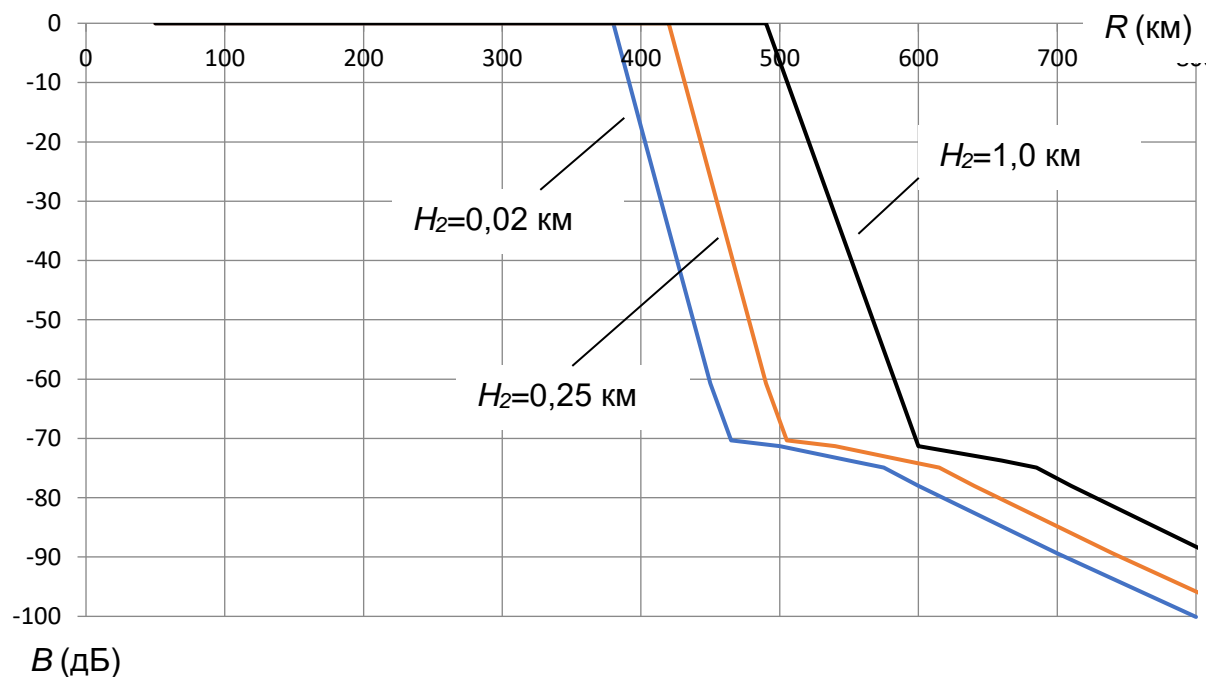


Рисунок 3. Множитель ослабления при подъеме излучающей антенны $H_1=10 \text{ км}$ и различных высотах приемной антенны H_2

Figure 3. The multiplier is weakening with the rise of the radiating antenna $H_1=10 \text{ км}$ and different

heights of the receiving antenna H2

Характер полученных зависимостей объясняется главным образом увеличением дальности прямой видимости при увеличении высоты приемной антенны.

Заключение

Предложенная модель расчета уровней сигналов при загоризонтном тропосферном распространении радиоволн УКВ и СВЧ диапазонов с учетом высот поднятия излучающей и приемной антенн является модификацией известного метода инженерного расчета множителя ослабления для стандартных условий [1-2, 8-9]. Преимущество разработанной модели состоит в возможности расчета для высот поднятия излучающей и приемной антенн до 10-12 км, при которых распространение радиоволн происходит в тропосфере [10-12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сколник М. *Справочник по радиолокации*. М.: Техносфера. 2014.
2. Введенский Б.А., Колосов М.А., Калинин А.И., Шифрин Я.С. *Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн*. М.: Сов. радио. 1965.
3. Черный Ф.Б. *Распространение радиоволн*. М.: Сов. радио. 1972.
4. Долуханов М.П. *Распространение радиоволн*. М.: Связь. 1972.
5. Грудинская Г.П. *Распространение коротких и ультракоротких волн*. М.: Радио и связь. 1981.
6. Шарыгин Г.С. *Радиоклиматический атлас Тихого океана*. Томск: ТУСУР. 2000.
7. Быховский М.А. *Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем*. М.: Эко-Трендз. 2006.
8. Седельников Ю.Е. *Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств*. Казань: ЗАО «Новое знание». 2006.
9. Куприянов А.И. *Радиоэлектронная борьба*. М.: Вузовская книга. 2013.
10. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. 2009.
11. Пермяков В.А., Солодухов В.В., Бодров В.В., Исаков М.В. *Распространение радиоволн: Учебное пособие*. М.: Издательство МЭИ. 2006.
12. Нефедов Е.И. *Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн*. М.: Изд. центр «Академия». 2008.

REFERENCES

1. Skolnik M. *Reference radar*. Moscow: Technosphere. 2014. (In Russ)
2. Vvedensky B.A. Kolosov M.A., Kalinin A.I., Shifrin Y.S. *Long-range tropospheric propagation of ultrashort radio waves*. Moscow: Sov. radio. 1965. (In Russ)
3. Chorny F.B. *Propagation of radio waves*. Moscow: Sov. radio. 1972. (In Russ)
4. Dolukhanov M.P. *Propagation of radio waves*. Moscow: Communication. 1972. (In Russ)
5. Grudinskaya G.P. *Propagation of short and ultrashort waves*. Moscow: Radio and communications. 1981. (In Russ)
6. Sharygin G.S. *Radioclimatic atlas of the Pacific Ocean*. Tomsk: TUSUR. 2000. (In Russ)
7. Bykhovsky M.A. *Radio frequency spectrum management and electromagnetic compatibility of radio systems*. Moscow: Eco-Trends. 2006. (In Russ)
8. Sedelnikov U.E. *Electromagnetic compatibility of radio electronic means*. Kazan: CJSC «Novoe Znanie». 2006. (In Russ)

9. Kupriyanov A.I. *Electronic warfare*. Moscow: University book. 2013. (In Russ)
10. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavelyev A.G. *Propagation of radio waves*. 2009. (In Russ)
11. Permyakov V.A., Solodukhov V.V., Bodrov V.V., Isakov M.V. *Radio wave propagation*. Textbook. Moscow: MEI Publishing house. 2006. (In Russ)
12. Nefedov E.I. *Antenna-feeder devices and radio wave propagation*. Moscow: Publishing House center "Academy". 2008. (In Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ханис Андрей Леонидович, кандидат военных наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Курск, Российская Федерация
e-mail: uinfo2@mail.ru

Andrey L. Hanis, Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Information Security Department, Kursk, Russian Federation

Беспалько Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация
e-mail: besp-alco@yandex.ru

Sergey V. Bespalko, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars and Carriage Facilities Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russian Federation

Ханис Владислав Андреевич, аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация
e-mail: vladkhanis@mail.ru

Vladislav A. Khanis, postgraduate student, Railway Cars and carriage facilities Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russian Federation

Ханис Анна Андреевна, студентка кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация
e-mail: khaniss@mail.ru

Anna A. Khanis, student, Automation, Telemechanics and Communications on the Railway Department, Russian University of Transport (RUT-MIIT), Moscow, Russian Federation