

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.10>

УДК 621.396.96

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ VHF ДИАПАЗОНА С ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

А. Ю. Ветлужский

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

Статья поступила в редакцию 18 мая 2020 г., после доработки – 19 июня 2020 г.

Аннотация. Описывается математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения VHF диапазона с лесной растительностью, представляемой в виде совокупностей случайно расположенных цилиндрических элементов, имеющих геометрические и электрофизические характеристики, случайно распределенные в пределах некоторого интервала значений. Обсуждаются основные особенности прохождения волн через лесную среду, выявляемые в рамках предлагаемой модели. Проводится сопоставление результатов вычислительных и натурных экспериментов.

Ключевые слова: лесные среды, погонное ослабление, рассеяние, спектр пропускания, численный эксперимент.

Abstract. A mathematical model of the interaction of electromagnetic radiation of the VHF range with forest vegetation is described. The forest medium is represented in the form of two-dimensional collections of randomly arranged cylindrical elements with random values of geometric parameters and permittivity. The calculation is carried out by the method of self-consistent equations. The main features of wave propagation in the forest environment in this range at small distances between antennas are discussed: the dependence of attenuation mainly on the density of the forest, a decrease in attenuation with increasing frequency, the possibility of resonant interaction of radiation with vegetation elements. A comparison of the results of computational and field experiments is carried out.

Key words: forest media, specific attenuation, scattering, transmission spectrum, numerical experiment.

Введение

В последние несколько десятилетий интенсивное развитие систем радиосвязи различного назначения, а также методов и средств дистанционного зондирования земной поверхности обуславливает неослабевающий интерес к изучению влияния лесных покровов на распространение электромагнитных волн различных диапазонов. Ключевым вопросом, который, так или иначе, рассматривается практически во всех работах, связанных с этой проблематикой, является оценка ослабления излучения, приносимого элементами лесной растительности [1 - 3]. Данная оценка необходима как для прогнозирования затухания радиосигналов в наземных радиоканалах, так и для разработки эффективных алгоритмов интерпретации данных дистанционного зондирования.

Величина ослабления поля может быть достоверно определена только при проведении натуральных экспериментов. Однако лес – это гетерогенная, многокомпонентная среда, отличающаяся существенной неоднородностью внутренней структуры. При этом на характеристики волн, распространяющихся в такой среде, наряду с биометрическими показателями древостоя, существенное влияние оказывают и сезонные вариации электрофизических параметров элементов растительности, наличие хвойно-листового опада, а также параметры почвенного покрова. Все это приводит к тому, что измерения, даже хорошо статистически обеспеченные и проведенные в пределах одних и тех же тестовых участков леса, но на разных трассах распространения, могут приводить к отличающимся результатам. Поэтому, в целом, влияние лесных покровов на распространение волн обычно описывается в значительной степени усредненными характеристиками, к числу которых относится погонное ослабление поля, определяемое для лесов с учетом их видового состава и внутренней структуры, а также поляризации излучения.

Для нахождения приближенных значений погонного ослабления наряду с постановкой экспериментов, целью которых является получение регрессионных зависимостей между этими значениями и характеристиками

растительности, возможно использование теоретических построений. Базой для их разработки является выявление одного или нескольких физических механизмов, определяющих, в основном, процесс распространения излучения в лесной среде при заданных условиях.

В VHF и низкочастотной части UHF диапазонов при вертикальной поляризации излучения таким механизмом, на наш взгляд, является рассеяние волн стволами деревьев. В наибольшей степени это относится к хвойным лесам без подлеска и низко расположенных ветвей, характеризующимся преимущественно вертикальной ориентацией стволов деревьев и широко распространенным на территории Сибири и Дальнего Востока. При этом на небольших дистанциях между корреспондирующими антеннами, погруженными в растительность, составляющем несколько десятков длин волн, возникновение боковых волн, распространяющихся вдоль верхней кромки растительности, еще невозможно, а отражение от верхней границы леса мало. На дистанциях свыше нескольких длин волн при незначительном перепаде высот установки антенн также невелико и влияние на амплитудные характеристики поля в описанной лесной среде процессов отражения излучения от земной поверхности. Следовательно, при теоретическом анализе возможно ограничиться двумерной моделью леса. Целью настоящей работы является выявление особенностей распространения излучений указанного диапазона в лесах рассматриваемого типа путем численного анализа такой модели.

Методика расчетов

Для проведения численных экспериментов воспользуемся методом самосогласованных уравнений [4, 5]. Суть его применительно к системе N параллельных диэлектрических цилиндров кругового сечения для произвольной поляризации излучения сводится к следующему.

Поле, рассеянное произвольным j -ым цилиндром ($j = 1, 2, \dots, N$) запишем в виде разложения по азимутальным гармоникам:

$$u_{\text{рас}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_{mj} H_m^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) e^{in\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_j}}, \quad (1)$$

где P_{mj} – неизвестные амплитудные коэффициенты, \mathbf{r} – радиус-вектор, определяющий положение точки наблюдения поля, \mathbf{r}_j – произвольного j -ого цилиндра, $H_m^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода m -ого порядка, $\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_j}$ – угол, образованный вектором $\mathbf{r} - \mathbf{r}_j$ и осью x системы координат. Полное падающее на некоторый i -ый цилиндр поле ($i = 1, 2, \dots, N, i \neq j$) представим в виде суммы поля источника и полей, рассеянных остальными элементами системы:

$$u_{\text{пад}}^i(\mathbf{r}) = u_0(\mathbf{r}) + \sum_{j=1, j \neq i}^N u_{\text{рас}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j). \quad (2)$$

Это же поле можно описать в виде разложения, аналогичного (1):

$$u_{\text{пад}}^i(\mathbf{r}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_{mj} J_m(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) e^{in\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_j}}. \quad (3)$$

где B_{mj} – вновь неизвестные коэффициенты спектрального разложения. Радиальная зависимость поля здесь выражена через функцию Бесселя J_m m -ого порядка, поскольку она не имеет особенностей при $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_j$.

Для определения коэффициентов P_{mj} и B_{mj} выразим рассеянное поле $u_{\text{рас}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j)$ для каждого j -ого цилиндра через волновые функции i -ого элемента ($i \neq j$). Для этого используем теорему сложения для цилиндрических функций [6] (рис. 1):

$$Z_m(\alpha d) e^{im\psi} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Z_{m+k}(\alpha \rho_1) J_k(\alpha \rho_2) e^{ik(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (4)$$

где $\rho_1 > \rho_2$, Z – произвольная цилиндрическая функция, α – произвольный множитель.

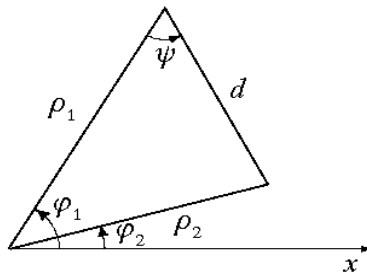


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация к теореме сложения.

Применяя (4) к (1) получаем:

$$u_{\text{рас}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_j) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{mj,i} J_m(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|) e^{in\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_i}}, \quad (5)$$

где

$$C_{mj,i} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} P_{lj} H_{l-m}^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) e^{i(l-n)\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_j}}. \quad (6)$$

Для дальнейших преобразований поле источника представим в аналогичной формулировке – в виде разложения по волновым функциям i -ого цилиндра:

$$u_0(\mathbf{r}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D_{mi} J_m(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|) e^{in\varphi_{\mathbf{r}-\mathbf{r}_i}}, \quad (7)$$

где коэффициенты D_{mi} связаны с известной амплитудой поля источника A_0 и местоположением последнего, определяемым вектором \mathbf{r}_s :

$$D_{mj} = A_0 H_m^{(1)}(k|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_s|) e^{im\varphi_{\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_s}}.$$

Подставляя выражения (3), (5) и (7) в (2), получим:

$$B_{mi} = D_{mi} + \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{mj,i}. \quad (8)$$

В последнем выражении неизвестными являются два коэффициента: B_{mi} и P_{lj} . Для их определения необходимо установить между ними дополнительное соотношение, что достигается решением простейшей задачи дифракции волн на одиночном цилиндре. Удовлетворяя граничным условиям на его поверхности, получаем хорошо известное выражение (ограничимся его формулировкой для E (TM) волн, т.е. для параллельной ориентации вектора \mathbf{E} относительно цилиндров):

$$\frac{P_{mi}}{B_{mi}} = \frac{nJ_m(ka)J'_m(nka) - J'_m(ka)J_m(nka)}{J_m(nka)H_m^{(1)'}(ka) - nH_m^{(1)}(ka)J'_m(nka)}. \quad (9)$$

Здесь n – показатель преломления материала цилиндра.

Применяя последовательно описанную процедуру ко всем цилиндрам и учитывая (6) и (9), получаем систему N самосогласованных линейных

неоднородных уравнений (8), в которой каждый неизвестный коэффициент P_{mi} , описывающий возбуждение соответствующего цилиндра, определяется через коэффициенты, характеризующие состояние других цилиндров системы. Разрешая систему стандартными методами, окончательно находим поле в произвольной точке пространства с использованием следующего выражения:

$$u(\mathbf{r}) = u_0(\mathbf{r}) + \sum_{i=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_{mi} H_m^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|) e^{in\varphi_{r-r_i}} .$$

Достоинствами описанного метода является простота программной реализации и получение сколь угодно высокой точности расчетов при учете соответствующего числа пространственных гармоник.

Обсуждение результатов

В данной работе методом самосогласованных уравнений было выполнено строгое численное моделирование прохождения плоских волн через двумерные системы диэлектрических цилиндров, описывающих стволы деревьев и распределенных в пространстве по закону Пуассона. Рассматривалась ТМ поляризация излучения. Моделирование проводилось в предположении малой глубины проникновения поля в среду (небольшого пространственного разнеса антенн), не предполагающего формирования боковых волн. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Полученные зависимости демонстрируют весьма близкое поведение в рассматриваемом частотном диапазоне. Отсюда следует несколько выводов. Во-первых, основным фактором ослабления волн в рассматриваемой модели лесной среды является ее плотность, поскольку все другие параметры структуры, включая проводимость, обуславливающую тепловые потери в элементах среды, а также значительный разброс геометрических и электрофизических характеристик рассеивателей, несущественно влияют на спектральные характеристики излучения.

Во-вторых, в основной части исследуемого диапазона наблюдается монотонное уменьшение ослабления поля с ростом частоты. Это заключение требует обсуждения, поскольку обычно полагается, что рост частоты приводит

к увеличению уровня затухания поля в лесу (см. например, [1] и библиографию к ней). Отметим, что наблюдаемая спектральная зависимость поля предполагается в лесах без подлеска и низко расположенных ветвей, т.е. в постановке модельного эксперимента, поскольку эти факторы существенно меняют картину поведения поля с частотой.

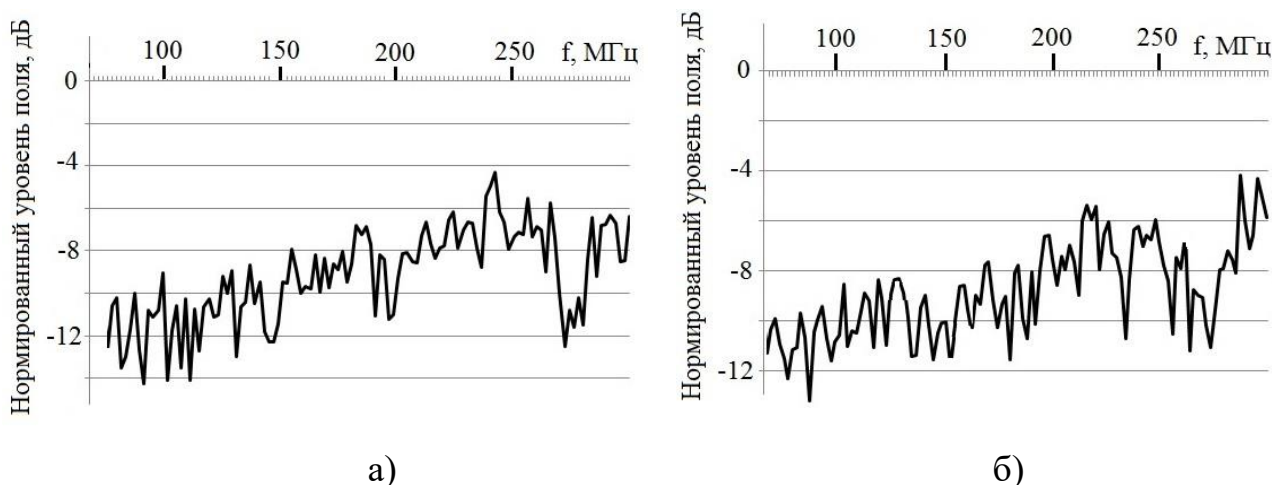


Рис. 2. Усредненное спектральное представление нормированного (по отношению к полю в свободном пространстве) уровня поля, прошедшего через двумерную систему из 150 параллельно расположенных цилиндров, распределенных в пространстве с плотностью 0.12 м^{-2} . Глубина погружения поля в систему 35 м. (а) – диаметр элементов 0.28 м, диэлектрическая проницаемость 15. (б) – поперечные размеры элементов равномерно-случайно распределены в интервале $0.14 \div 0.42$ м, диэлектрическая проницаемость – в интервале $12 \div 18$, проводимость – $0.0025 \div 0.0035$ см/м. Усреднение выполнено по ансамблям из 20 реализаций случайных величин.

Физически полученные результаты объясняются тем, что рост частоты в рассматриваемом случае эквивалентен уменьшению плотности системы рассеивателей, что и приводит к уменьшению ослабления поля. При этом поперечник рассеяния цилиндрических элементов указанных размеров в анализируемом диапазоне частот имеет тенденцию к уменьшению с ростом частоты. Это также может служить аргументом в пользу адекватности полученных результатов реальной картине влияния леса на распространение радиоизлучения, поскольку основным фактором ослабления поля на малых дистанциях служит именно рассеяние волн стволами деревьев. Интересно, что с ростом частоты в отдельных реализациях случайных структур возникают

каналы прохождения излучения, в пределах которых может наблюдаться даже относительное усиление поля (рис. 3).

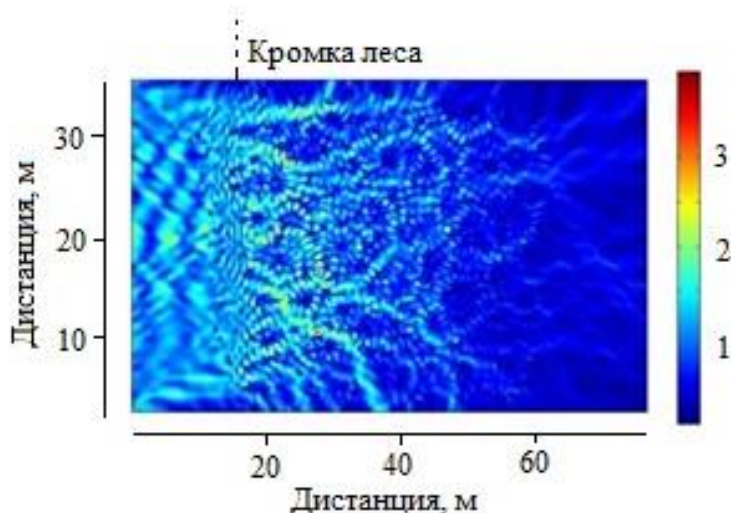


Рис. 3. Пространственное распределение поля в одной из реализаций исследуемой среды на частоте 220 МГц. Видны своеобразные каналы, свидетельствующие о глубоком проникновении поля в среду. Направление прихода волны – слева направо.

В-третьих, на рис. 2 следует отметить характерный минимум зависимостей, расположенный в районе 270 ÷ 280 МГц. Оценка длины волны в элементах среды на этих частотах $\lambda_{\text{эле}} = c/f n$, где c – скорость света, f – частота, n – показатель преломления элементов, приводит к величинам 0.275 – 0.285 м, что совпадает с диаметром цилиндрических рассеивателей. Таким образом, следует полагать, что минимумы характеристик обусловлены резонансами поля в элементах среды. Подтверждением сказанного может служить картина распределения поля на частоте 275 МГц, свидетельствующая о его локализации в исследуемой системе за счет резонансного взаимодействия с ней (рис. 4). Как следует из рисунка, энергия при этом переносится за счет краевых волн, движущихся вдоль границ области размещения рассеивателей (ср. с рис. 3).

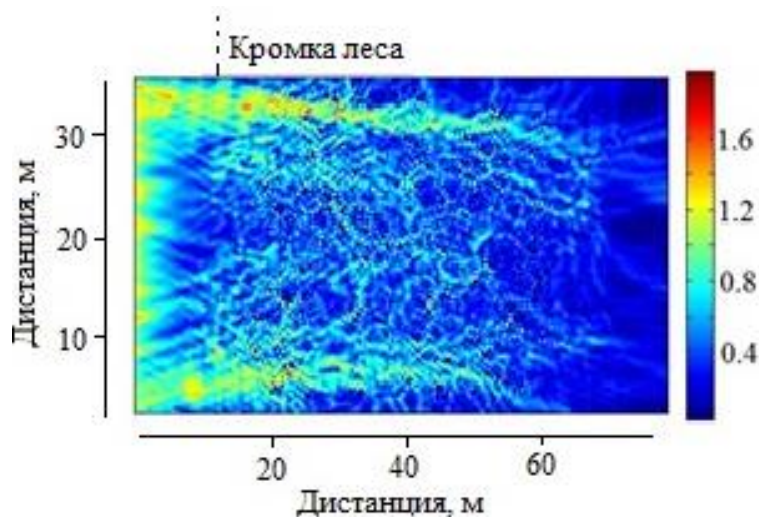


Рис. 4. Пространственное распределение поля на частоте 275 МГц, указывающее на возможность локализации поля за счет резонансов в отдельных рассеивателях.

Верификация теоретической модели

Для проверки работоспособности предлагаемой модели оценивалось погонное ослабление волн в описываемой ею лесной среде. Для леса с плотностью древостоя 0.12 м^{-2} из рис. 2 (б) в низкочастотной части VHF диапазона следует величина $0.25 - 0.3 \text{ дБ/м}$. Непосредственное сопоставление этих результатов с литературными данными, описывающими результаты натуральных экспериментов, (например, [1, 7]) демонстрирует хорошее их согласие при малом пространственном разноре антенн. Тем не менее, следует иметь в виду, что в большинстве подобных работ анализируется абсолютное ослабление, включающее в себя убывание амплитуды излучения из-за расходимости волнового фронта, а также учитывающее влияние земной поверхности, не рассматривающиеся в нашей модели.

Поэтому нами были проведены эксперименты по оценке ослабления поля в лесных массивах, состоящих из деревьев хвойных пород, в сопоставлении с ослаблением поля на открытой местности, характеризующейся тем же характером подстилающей поверхности. Результаты измерений, демонстрирующие дистанционные зависимости поля на разных частотах, представлены на рис. 5.

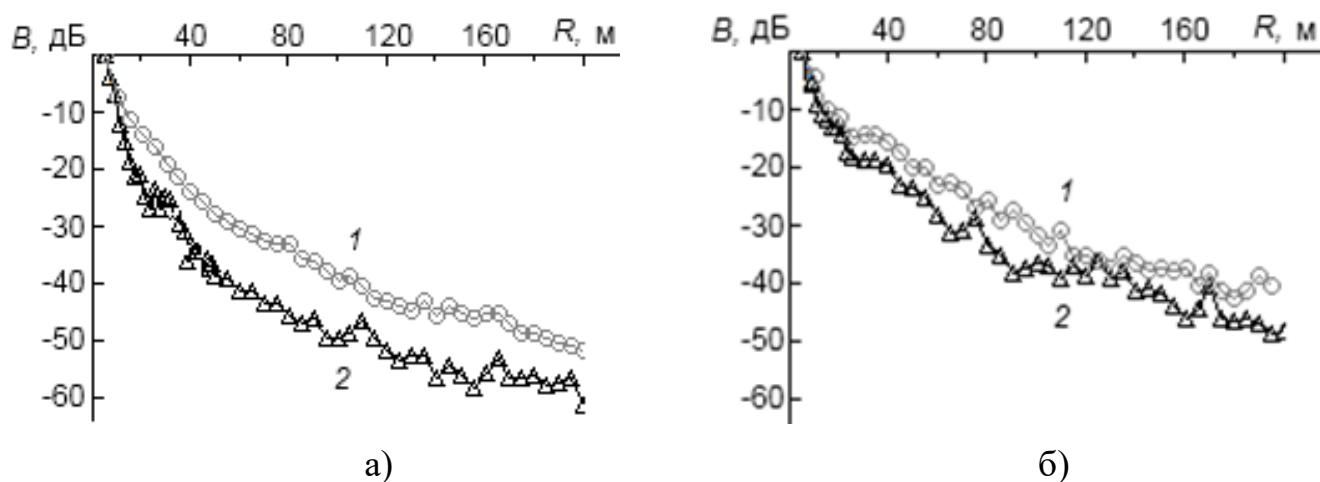


Рис. 5. Дистанционные зависимости ослабления поля на открытой местности (1) и в лесу (2), полученные на частотах 150 МГц (а) и 450 МГц (б). Кривая, описывающая поле в лесу, является результатом усреднения данных, полученных на трех трассах распространения. В свою очередь на каждой дистанционной отметке трассы проводилась серия из пяти измерений при смещении приемной антенны поперек трассы на дистанцию, равную длине волны, результаты которых также усреднялись.

Отсюда следует, во-первых, что относительное влияние рассматриваемых в данной работе лесов на распространение радиоволн, выражающееся в ослаблении излучения, действительно уменьшается с ростом частоты в VHF – низкочастотной части UHF диапазонах. Во-вторых, оценка дополнительного ослабления волн, приносимого именно лесной растительностью, на частоте 150 МГц дает величины $0.15 \div 0.2$ дБ/м, что несколько меньше, чем при численном моделировании. Однако это может быть связано с тем, что при проведении вычислительных экспериментов в данной работе одним из факторов ослабления являлось отражение волн от облучаемой кромки дискретной среды, отсутствующее при погружении антенн в лес при проведении натуральных измерений и могущее быть исключено на этапе обработки результатов расчетов. Поэтому, в целом, следует отметить хорошее соответствие результатов определения погонного ослабления с использованием предлагаемой модели с данными натуральных экспериментов.

Выводы

В работе построена простая модель лесной среды, позволяющая прогнозировать затухание радиоволн на небольших дистанциях между

погруженными в среду антеннами в VHF и низкочастотной части UHF диапазонов. Сопоставление полученных с ее помощью численных оценок ослабления поля с результатами измерений в реальных лесах и литературными данными показало хорошую работоспособность предлагаемой модели.

Литература

1. Чухланцев А.А., Шутко А.М, Головачев С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 1285-1311.
2. Wang F., Sarabandi K. An enhanced millimeter-wave foliage propagation model // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2005. Vol. 53. № 7. P. 2138-2145.
3. Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. Study of propagation loss prediction in forest environment // Progress in Electromagnetics Research B. 2009. Vol. 17. P. 117-133.
4. Astaryan A.A. *et al.* Diffusion and anomalous diffusion of light in two-dimensional photonic crystals // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 67. P. 036605 (1-8).
5. Ветлужский А.Ю., Ломухин Ю.Л. Возбуждение штыревого слоя // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 3. С. 282-287.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
7. Басанов Б.В., Ветлужский А.Ю., Калашников В.П. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2010. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr10/3/text.pdf>.

Для цитирования:

Ветлужский А.Ю. Модель взаимодействия радиоизлучения VHF диапазона с лесной растительностью. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.10>