

УДК: 621.3.091.1

DOI: 10.53816/23061456\_2021\_7-8\_70

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН  
СВЕРХДЛИННОВОЛНОВЫХ И ДЛИННОВОЛНОВЫХ ДИАПАЗОНОВ  
С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**METHOD FOR CALCULATING THE ATTENUATION OF RADIO WAVES  
OF THE ULTRA-LONGWAVE AND LONGWAVE BANDS, TAKING INTO  
ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE UNDERLYING SURFACE**

*В.А. Сафаралеев, канд. техн. наук А.В. Наговицын, А.Н. Наговицына*

*V.A. Safaraleev, Ph.D. A.V. Nagovitsyn, A.N. Nagovitsyna*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

При решении задач построения карт распределения мощности электромагнитного излучения (ЭМИ) в длинноволновой части спектра основным фактором, определяющим дополнительное ослабление, является поглощение энергии волны подстилающей поверхностью. Но в открытых источниках для случая электрически неоднородной поверхности приводится только качественное описание зависимости, к тому же требующее в значительном объёме участие оператора. Последнее крайне затрудняет процесс автоматизации подобных расчётов, что особенно важно при построении карт распределения напряженности электромагнитного поля.

В данной работе предлагается методика расчёта мощности электромагнитного поля в сверхдлинноволновых (СДВ) и длинноволновых (ДВ) диапазонах, в которой учитывается не только смешанный характер участков с разной проводимостью, но и взаимное расположение этих участков относительно точек передачи и приёма.

**Ключевые слова:** ослабление радиоволн, земная волна, влияние подстилающей поверхности.

When solving problems of constructing maps of the power distribution of electromagnetic radiation (EMR) in the long-wave part of the spectrum, the main factor determining additional attenuation is the absorption of wave energy by the underlying surface. But in open sources, for the case of an electrically inhomogeneous surface, only a qualitative description of the dependence is given, which also requires a significant amount of operator participation. The latter makes it extremely difficult to automate such calculations, which is especially important when constructing maps of the distribution of the electromagnetic field strength.

In this paper, we propose a method for calculating the power of the electromagnetic field in the ultra-longwave (ULW) and longwave (LW) ranges, which takes into account not only the mixed nature of the sections with different conductivity, but also the relative location of these sections relative to the transmission and reception points.

**Keywords:** attenuation of radio waves, ground wave, influence of the underlying surface.

Цель работы: разработать методику построения карт распределения мощности ЭМИ на основе данных об электрической проводимости подстилающей поверхности, заданных в виде растровых изображений.

При решении задач прогнозирования каналов радиосвязи в сверхдлинноволновом и длинноволновом (СДВ и ДВ) диапазонах большое значение имеет ослабление электромагнитной волны (ЭМВ) при её распространении над полупроводящей поверхностью<sup>1</sup>. Ослабление ЭМВ определяется проводимостью и диэлектрической проницаемостью подстилающей поверхности, причём значения диэлектрической проницаемости в длинноволновой части спектра на величину ослабления влияют незначительно. Поэтому для решения таких задач в первую очередь нужны данные о проводимости грунта. Такая информация доступна в виде растровых монохромных изображений с разными системами координат (например, в Рекомендациях МСЭ R-REC-P.832-4 «Мировой атлас проводимости почвы» [1]). Так как усреднённое значение проводимости в конкретной области указано числом, изображение необходимо предварительно подготовить: определить (для себя и для программы) цвета для каждого использованного на карте значения и осуществить заливку в графическом редакторе выбранными цветами соответствующие области.

Карта распределения мощности ЭМВ представляет собой массив точек, для которых рассчитываются значения мощности. Передатчик располагается в определённой точке. Следовательно, необходимо провести гипотетическую радиолинию от передатчика к каждой точке массива. На этой радиолинии необходимо определить длину трассы, приходящейся на каждый тип грунта. При расчёте одной трассы человек прикладывает к карте линейку и определяет точки пересечения трассы с границами зон, с разной проводимостью. Для автоматического расчёта необходимо определить условия, которые позволят программе найти эти точки на растровом изображении. Основную трудность при этом составляет тот факт, что обсчитываемая трасса далеко не всегда проходит через центры пиксе-

лов. Шаг дискретизации по площади определяется требованиями точности и для задач визуализации целесообразно определить массив в соответствии с пикселями.

При расчёте веерно расположенных трасс на участках вблизи передатчика появляется возможность использовать рассчитанные ранее значения на соседних трассах, что позволит существенно уменьшить потребляемые ресурсы персонального компьютера (ПК).

Отдельное внимание требует задача нахождения координат промежуточных точек радиотрассы, которая представляет собой проекцию на поверхность Земли прямой линии, соединяющей передатчик и рассматриваемую точку. Изображение этой трассы на картах в общем случае не является прямой линией.

В настоящее время средства расчёта радиолиний, находящиеся в свободном доступе, работают в коротковолновом, ультракоротковолновом и дециметровом диапазонах, где главными причинами затухания являются поглощение в атмосфере и ослабление на препятствиях. ЭМВ указанных диапазонов вследствие отсутствия рефракции в виде земной волны распространяются только на расстояние прямой видимости.

#### Расчёт множителя ослабления электромагнитной волны над полупроводящей поверхностью

Земная поверхность не является идеальным проводником и обладает конечной проводимостью  $\sigma$  и отличной от нуля диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . В этом случае возникает дополнительное ослабление, обозначаемое в формуле Шулейкина – Ван-дер-Поля как множитель ослабления  $F_1$ .

$$E_{\text{д}}[\text{мВ/м}] = \frac{245\sqrt{P_1[\text{кВт}]D_1}}{r[\text{км}]} F_1(x). \quad (1)$$

Множитель ослабления является функцией некоторого безразмерного параметра, называемого «численным расстоянием» и определяемого путём деления действительного расстояния  $r$

<sup>1</sup>Солёная вода океанов приближается по своим электрическим параметрам к проводнику, а сухая и каменистая почва — к диэлектрику.

на так называемый масштаб расстояний  $S$ , который выражается формулой  $S = \lambda \epsilon_k^2 / \pi(\epsilon_k - 1)$ , где

$$\epsilon_k = \epsilon - i60\lambda\sigma \quad (2)$$

— комплексная диэлектрическая проницаемость.

В практических ситуациях обычно используется модуль этой величины

$$s = |S| = \lambda / \pi \left| \frac{\epsilon_k^2}{\epsilon_k - 1} \right|. \quad (3)$$

Тогда

$$x = \frac{r}{s} = \frac{\pi r}{\lambda} \left| \frac{\epsilon_k - 1}{\epsilon_k^2} \right|. \quad (4)$$

Подставляя в (4) значение (2) получим

$$x = \frac{\pi r}{\lambda} \frac{\sqrt{(\epsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}}{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента ослабления от численного расстояния  $x$  при разных значениях параметра  $Q = \epsilon/60\lambda\sigma$ , а в табл. 1 приведены Типовые значения электрических параметров наиболее распространённых типов земной поверхности.

Усреднённый для разных значений  $Q$  график можно аппроксимировать формулой:

$$F_1(x) = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2}. \quad (6)$$

В рассматриваемых диапазонах значение параметра  $Q$  меняется от  $10^{-6}$  до 1,67 ( $\lambda = 1$  км, для

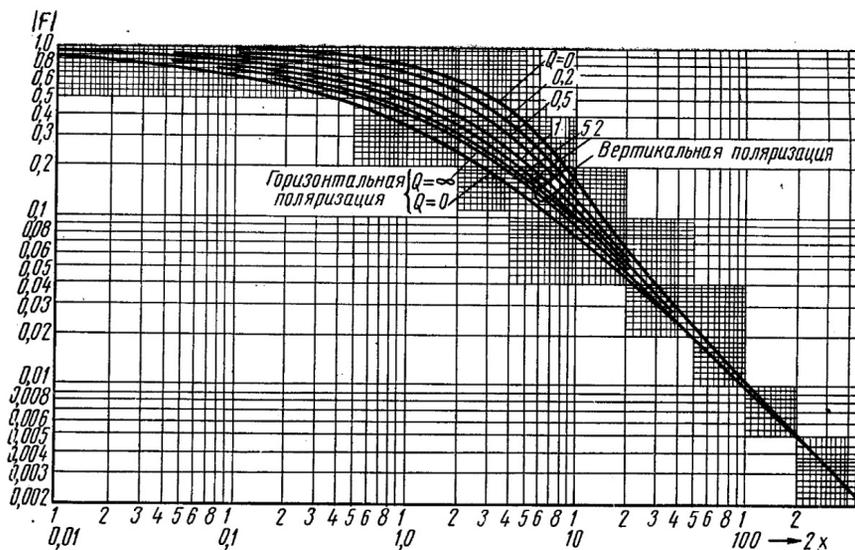


Рис. 1. Зависимость множителя ослабления от численного расстояния  $x$  при разных значениях параметра  $Q$

Таблица 1

Значения электрических параметров наиболее распространённых типов земной поверхности для длины волны более 1 метра, значения, принятые для расчётов указаны в скобках

Тип поверхности	$\epsilon$	$\sigma$ , мСм/м	при $\lambda = 1000$ м			при $\lambda = 10\,000$ м		
			$60\lambda\sigma$	$s$	$Q$	$60\lambda\sigma$	$s$	$Q$
Морская вода	75	1000÷6000 (4000)	$2,4 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{-5}$
Пресная вода	80	10÷30 (20)	1200	1200	0,067	12000	12000	0,007
Влажная почва	20÷30 (25)	20÷300 (100)	6000	6000	0,004	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	0,0004
Сухая почва	3÷6 (5)	0,01÷2 (0,5)	30,4	30,6	0,167	300	300	0,017
Лёд	4÷5 (5)	10÷100 (30)	1800	1800	0,003	$1,8 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	0,0003
Снег	1,2	$10^{-3}$	0,06	6,9	20	0,6	2,85	2
Лес	1,004	$10^{-3} \div 10^{-2}$ ( $10^{-2}$ )	0,6	2,3	1,67	6	6,2	0,167

леса). Численное расстояние  $x$  может составлять до 10 000 ( $\lambda=1$  км, для леса). Для трасс над однородной подстилающей поверхностью расчёт множителя ослабления на этом этапе заканчивается. Но при анализе распространения волн по всей поверхности Земли неизбежно прохождение трасс над участками с различными электрическими параметрами.

### Существующие способы оценки ослабления электромагнитной волны над кусочно-однородной поверхностью

Для расчёта трассы над неоднородной поверхностью существуют различные методики. Однако все они используют интегральные выражения и достаточно сложны. Достаточно простым для практических задач является метод Миллингтона, в котором неоднородная трасса представляется кусочно-однородной и в пределах каждого участка осуществляется расчёт напряжённости поля. Например, для трассы «суша-море-суша», расчёт заключается в следовании кривой напряженности поля земной волны для первого участка суши. На границе берега кривая напряженности поля над морем совпадает со значением напряженности поля над сушей в данной точке. Затем кривая для моря прослеживается до следующего берега и совмещается с соответствующей кривой для суши в этом диапазоне.

Однако в описаниях этих методов нет количественных соотношений. В частности нет

привязки к длине волны, не указан порядок определения положения асимптот и характера переходного участка (вблизи границ различных зон), а также отсутствуют более сложные ситуации (например море-суша1-суша2-суша1). На графиках (рис. 2) представлены зависимости напряжённости поля для некоторых ситуаций, но все они выполнены для численных расстояний  $x \gg 1$ . Таким образом алгоритмизировать процесс нахождения профиля напряжённости поля вдоль выбранной трассы на основании имеющихся зависимостей не представляется возможным.

### Методика расчёта ослабления электромагнитной волны с учётом разнородной поверхности

В данной работе предлагается методика расчёта коэффициента ослабления ЭМВ при прохождении над неоднородной подстилающей поверхностью. Особое внимание в предлагаемой методике уделено учёту взаимного расположения точек передачи, приёма и анализируемых точек трассы (эффект площадок «взлёта» и «посадки»).

Предлагаемая методика включает в себя решение следующих задач:

- определение координат промежуточных точек трассы;
- определение электрических параметров подстилающей поверхности в каждой промежуточной точке;

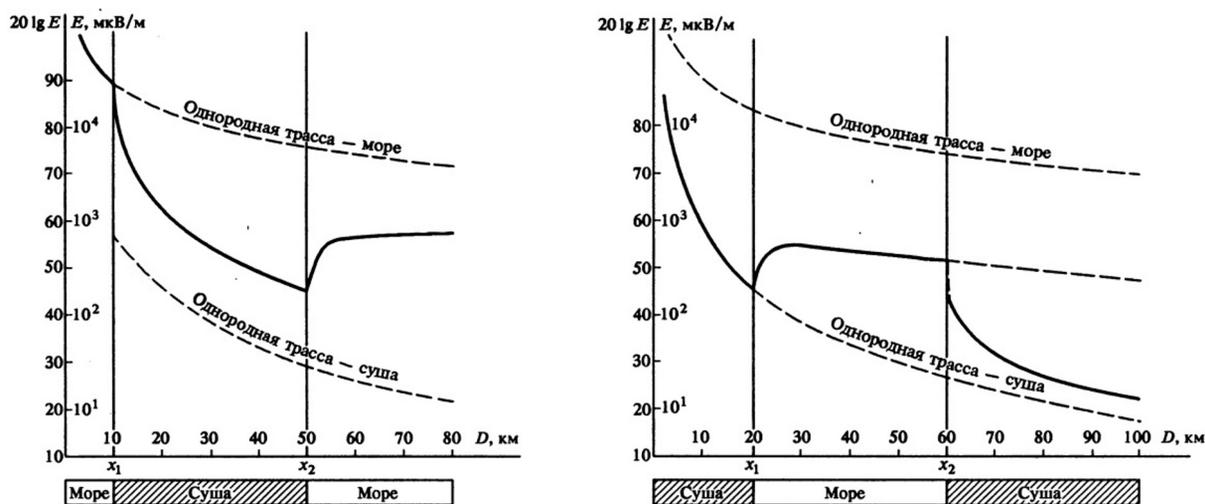


Рис. 2. Зависимость множителя ослабления от численного расстояния  $x$  при разных значениях параметра  $Q$

– расчёт напряжённости поля в конечной точке радиотрассы.

**Определение координат промежуточных точек на трассе распространения электромагнитной волны**

Известно, что ЭМВ распространяется по кратчайшему пути. И для расчёта её ослабления необходимо определить характер подстилающей поверхности именно вдоль этой трассы. Задача осложняется тем, что линия на местности, соответствующая кратчайшему пути, не соответствует прямой линии на карте (для разных типов картографических проекций). Для нахождения координат промежуточных точек (взятых с определённым интервалом) применяется следующий алгоритм:

1. Геоцентрические координаты (широта  $\varphi$ , долгота  $\lambda$ ) начальной и конечной точек (исходные данные) переводятся в прямоугольную систему координат с началом в центре Земли (рис. 3, а, б):

$$X = R_3 \cdot \sin \lambda \cdot \cos \varphi; \quad Y = R_3 \cdot \cos \lambda \cdot \cos \varphi; \\ Z = R_3 \cdot \sin \varphi;$$

2. Вычисляется центральный угол  $\Theta$ :

$$\Theta = \arccos \times \\ \times [\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\lambda_1 - \lambda_2)];$$

3. На отрезке  $MN$  ставятся точки  $Q_i$ , так, чтобы центральные углы  $\varphi_i$  равнялись заданному шагу (рис. 3, в). Для нахождения координат этих точек вычисляются величины отрезков  $d_i$  (по теореме синусов:  $d_i / \sin \gamma = r_{i-1} / \sin \beta_i = r_i / \sin \alpha_i$ ):

$$d_i = r_{i-1} \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_i},$$

где  $\gamma = \frac{\Theta}{N}$ ,  $N$  — целое число, выбирается так, чтобы угол  $\gamma$  был в пределах  $[2,5 \div 4]$  градусов. Такое значение угла соответствует расстоянию до 500 км. При этом отклонениями кратчайшего пути от прямой линии по карте можно пренебречь и находить промежуточные точки (между  $k_i$  и  $k_{i+1}$ ) непосредственно на карте.

$$\beta_i = 180^\circ - (\alpha_i + \gamma); \\ \alpha_i = \alpha_{i-1} + \gamma = \alpha_0 + i \cdot \gamma, \quad \text{где } \alpha_0 = 0,5(180^\circ - \Theta); \\ r_i = r_{i-1} \frac{\sin \alpha_i}{\sin \beta_i} = r_{i-1} \frac{\sin \alpha_i}{\sin (\alpha_i + \gamma)} = \\ = r_{i-1} \frac{\sin (\alpha_0 + i \cdot \gamma)}{\sin (\alpha_0 + (i+1) \cdot \gamma)}, \quad \text{где } r_0 = R_{\text{земли}}.$$

При этом координаты этих точек находятся из пропорции

$$\begin{cases} X_{Q_i} = X_{Q_{i-1}} + (X_N - X_M) \cdot k_i \\ Y_{Q_i} = Y_{Q_{i-1}} + (Y_N - Y_M) \cdot k_i \\ Z_{Q_i} = Z_{Q_{i-1}} + (Z_N - Z_M) \cdot k_i \end{cases}, \quad (7)$$

где  $k_i = \frac{d_i}{|MN|}$ .

4. На каждой прямой от начала координат откладываем расстояние, равное радиусу Земли ( $OM$  или  $ON$ ) и получаем соответствующую промежуточную точку трассы  $k_i$ , координаты

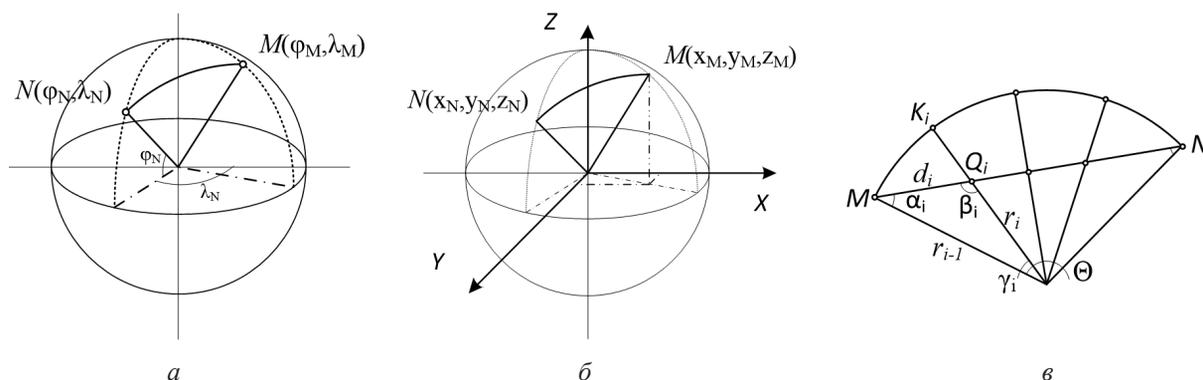


Рис. 3. Пояснения к порядку определения координат промежуточных точек на трассе, соответствующей кратчайшему пути

которых можно найти по аналогии с (7) приняв

$$k_i = \frac{R_{\text{земли}}}{r_i}.$$

5. Прямоугольные координаты найденных точек переводятся в геоцентрическую систему координат  $\varphi = \arcsin \frac{Z}{R_3}; \lambda = \arctan \frac{Y}{X}$  с учётом правильного определения четверти.

### Определение электрических параметров подстилающей поверхности в каждой промежуточной точке

Исходными данными для решения данной задачи являются карты проводимости земной поверхности, поставляемых в формате растрового рисунка. Такие карты, находящиеся в открытом доступе (например Рекомендации МСЭ R.832-2), представляют собой чёрно-белое изображение (в некоторых источниках — монохромное), где значения электрической проводимости поверхности обозначены цифрами внутри ограниченных произвольной линией областей (рис. 4, а). Для использования в программе такие изображения должны быть соответствующим образом подготовлены.

Во-первых надо определить порядок пересчёта географических координат в номер пикселя.

Для этого нужно определить тип картографической проекции и её численные параметры. А также определить границы используемой области.

Во-вторых надо заменить цифровые обозначения цветовым кодированием. Важно заранее определить по всем предполагаемым к использованию картам весь ряд возможных значений проводимостей и назначить каждому значению определённый цвет.

В-третьих закрасить соответствующими цветами границы зон, а также надписи и линии координатной сетки.

### Расчёт напряжённости поля в каждой промежуточной точке

Как показывает практика, напряжённость электрического поля в точке приёма определяется (кроме ослабления в свободном пространстве) потерями по трассе распространения. Для волн СДВ и ДВ диапазонов самой главной причиной ослабления является поглощение в подстилающей поверхности. Но, как было показано выше, не все участки вдоль линии оказывают одинаковое влияние на ослабление сигнала. Экспериментальные данные [2] показывают наличие скачков уровня мощности на границе зон разных проводимостей как вниз, так и вверх (при перемещении приёмника с суши на море). Такой харак-

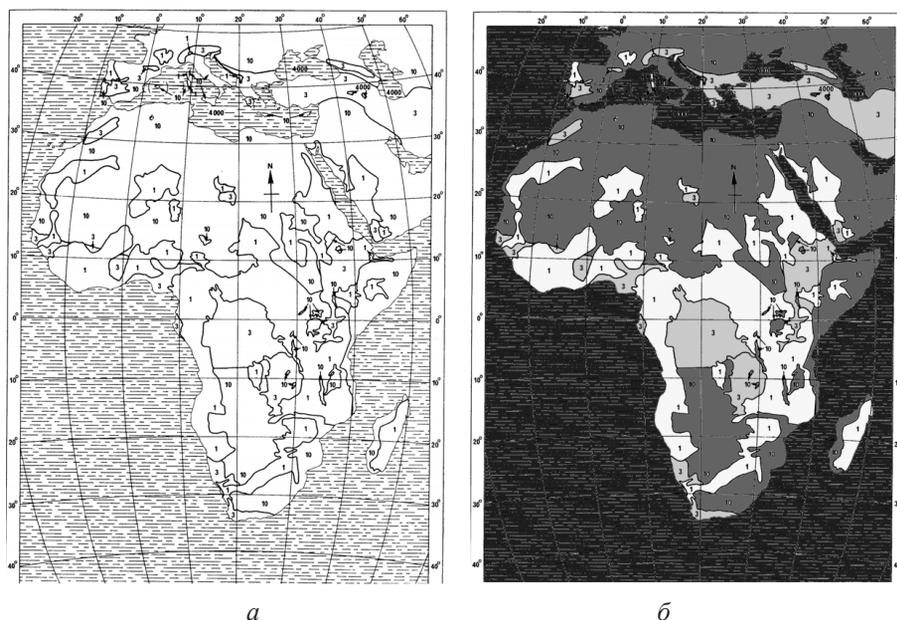


Рис. 4. Карта проводимости поверхности (на примере карты Африки): а — исходная из открытых источников; б — цветовая заливка в соответствии с численными значениями проводимости

тер зависимости — наличие площадок «взлёта» и «приземления», можно объяснить принципом Гюйгенса — основополагающим принципом теории распространения радиоволн.

При передаче информации по радиоканалу выделяется область пространства, в которой сосредоточена максимальная часть мощности, попадающая в приёмную антенну. Соответственно, электрические параметры пространства, входящего в эту область, оказывают наибольшее влияние на эту электромагнитную волну. Эта область называется существенной. В свободном пространстве эта область имеет вид вытянутого эллипсоида вращения (рис. 5, а). Если рассмотреть распределение плотности мощности в этом эллипсоиде, то имеется снижение этой плотности при удалении от оси. На рис. 5 более толстые линии соответствуют большей плотности мощности, т.е. основная часть мощности поступает на приёмную антенну с направления, близкого к линии визирования.

Если передающая и приёмная антенны находятся на поверхности, то для распространения волны остаётся половина этого эллипсоида (на рис. 5, б, в такие половины эллипсоидов приведены в одном масштабе для расстояний 10 и 25 длин волн соответственно). В этом случае электрические параметры поверхности играют ведущую роль в определении потерь. Рассмотрим реальную ситуацию, т.е. значение проводимости конечно, а диэлектрическая проницаемость больше нуля. Чем ближе волна к этой поверхности, тем

большее поглощение она испытывает. Поэтому максимальной плотности мощности соответствует не прямая, а несколько изогнутая, приподнятая в средней части линия (в литературе встречается название «линия наименьшего поглощения»). Получается, что находящиеся в средней части участки с большим поглощением не оказывают существенного влияния на общее затухание. В то же время, участки подстилающей поверхности, находящиеся рядом с передающей/приёмной антеннами, где высота существенной зоны относительно мала, оказывают значительное влияние на энергетику трассы. Это явление носит название площадок «взлёта» и «посадки». Для пояснения вышесказанного обратимся к рис. 6. Ближе к передатчику (слева) область максимальной плотности мощности находится возле линии визирования, а ближе к приёмнику, приподнята под некоторым углом. Также на этом рисунке проиллюстрировано влияние подстилающей поверхности. Ближе к точкам передачи и приёма вся или большая часть мощности проходит низко над поверхностью. Но в варианте, представленном на этом рисунке, в этих местах подстилающая поверхность — море, обладающее большой проводимостью и малым ослаблением радиоволн. Среднюю часть радиотрассы занимает суша, оказывающая большое поглощение. Но существенная зона в средней части имеет большой радиус сечения и близко к поверхности проходит только малая часть энергии. Большая часть мощности проходит высоко и не поглощается.

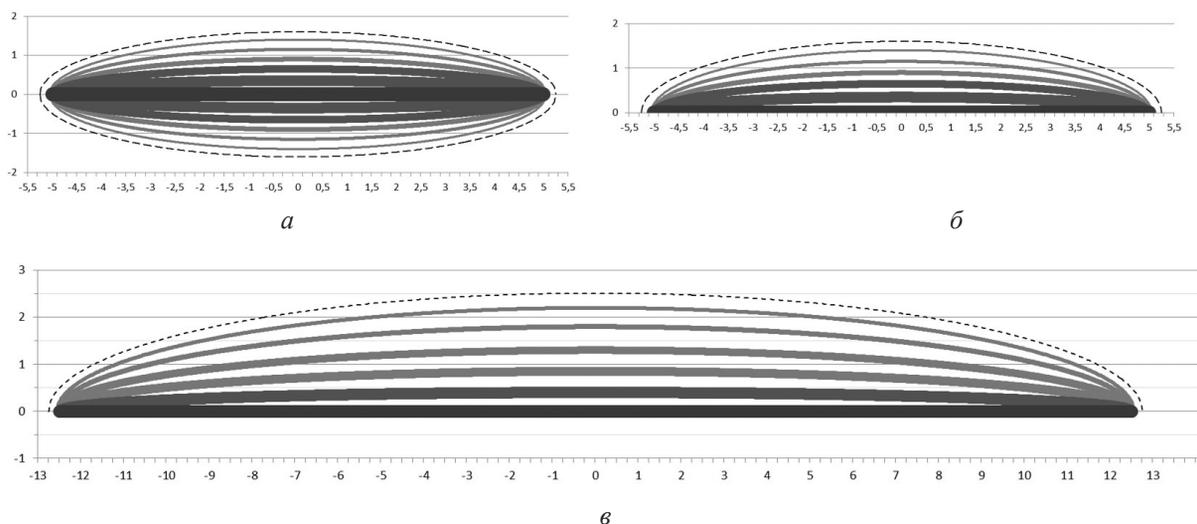


Рис. 5. Существенная зона и распределение мощности в ней при распространении: а — в открытом пространстве на  $10 \lambda$ ; б — вдоль поверхности на  $10 \lambda$ ; в — на  $25 \lambda$

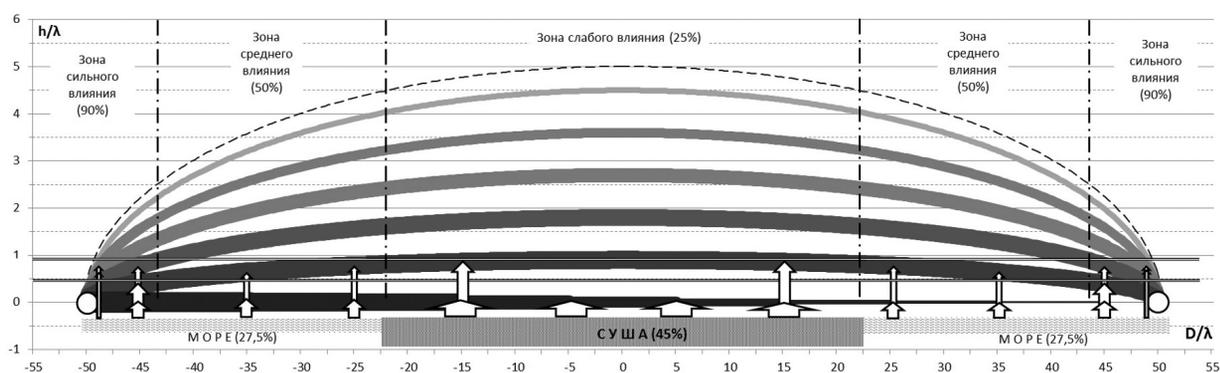


Рис. 6. Пояснение к описанию влияния расположения зон подстилающей поверхности с различными характеристиками на величину общего ослабления

Данная схема помогает ответить на вопросы «как?» и «почему?». Но не отвечает на самый важный при разработке алгоритма расчёта и программировании вопрос — «сколько?». Зона сильного/среднего/слабого ослабления: сколько это в километрах или в длинах волн? Сколько это в процентах или децибелах?

Для ответа на эти вопросы необходимо определить взаимосвязь геометрических размеров и распределение плотности потока мощности в существенной зоне<sup>2</sup>. Основные геометрические соотношения, определяющие размер существенной зоны, представлены на рис. 7.

В данном исследовании существенной зоной считается первая зона Френеля. Её граница определяется условием увеличения длины пути на половину длины волны.

$$|F1M| + |MF2| = |F1F2| + \lambda/2 = R + \lambda/2. \quad (8)$$

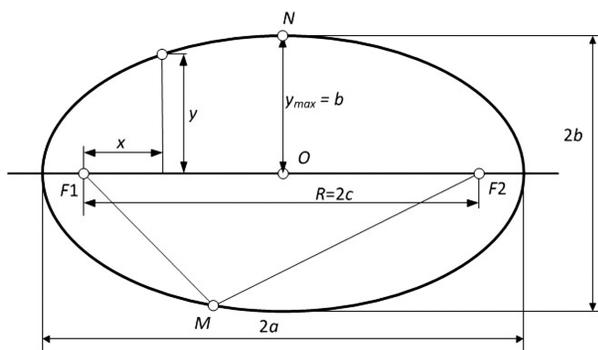


Рис. 7. Геометрические параметры эллипса с фокусами F1 и F2

Поэтому форма существенной зоны представляет собой эллипсоид вращения с параметрами: фокусное расстояние  $2c$  равно расстоянию между антеннами, большая ось  $2a$  больше него на  $\lambda/2$ . Величину малой полуоси  $b$  легко найти из треугольника  $F1ON$ :

$$b = \sqrt{a^2 - c^2}. \quad (9)$$

Учитывая (8) и на основании свойств эллипса выражение (9) можно записать в виде:

$$b = \sqrt{\left(\frac{R}{2}\right)^2 - \left(\frac{R - \lambda}{4}\right)^2} = \sqrt{R \frac{\lambda}{4} - \left(\frac{\lambda}{4}\right)^2}.$$

Величина  $y$  в сечении на расстоянии  $x$  от антенны находится из канонического уравнения эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Тогда

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} = b \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}. \quad (10)$$

Распределение мощности в существенной зоне описывается функцией Бесселя 1-го рода. На рис. 8, а представлено распределение мощно-

<sup>2</sup>В данной статье речь идёт о той части мощности, которая достигает приёмной антенны. Общая плотность потока мощности определяется только расстоянием и диаграммой направленности передающей антенны. В данной работе рассматриваются ненаправленные антенны.

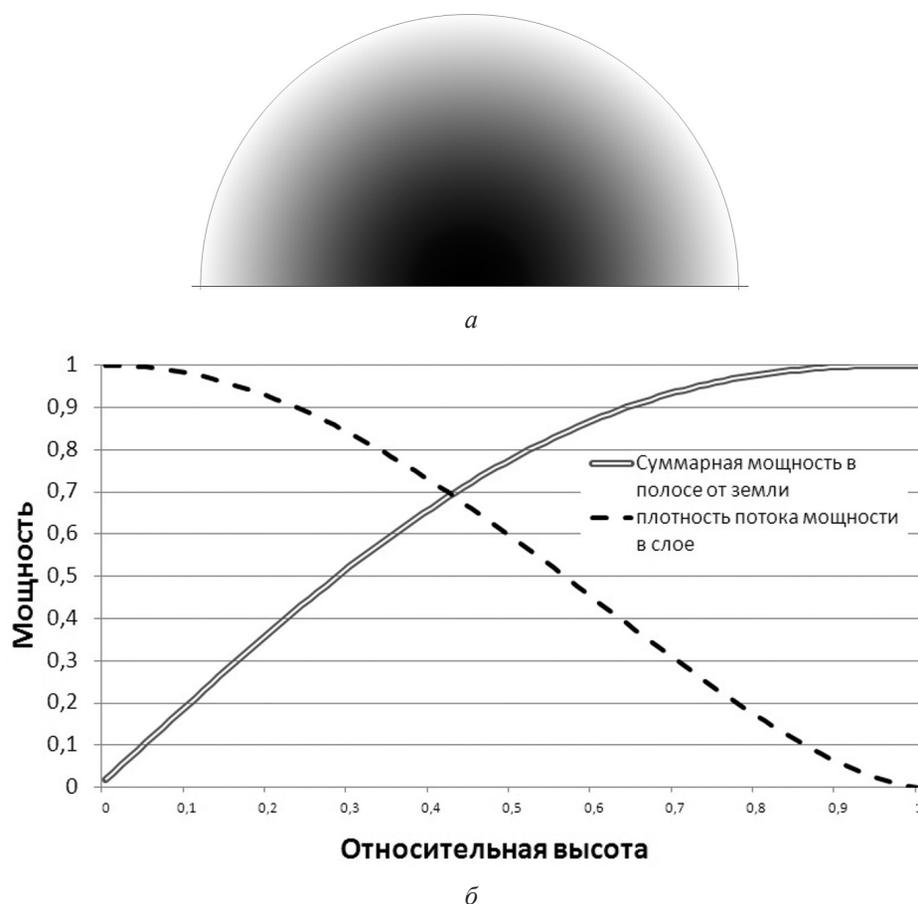


Рис. 8. Распределение плотности потока мощности в существенной зоне

сти в поперечном сечении существенной зоны, где более тёмной окраске соответствует бóльшая мощность. На рис. 8, б представлены графики зависимости мощности, сосредоточенной в тонком слое на соответствующей высоте и суммарной мощности слоя от поверхности до соответствующей высоты.

Зависимость суммарной мощности от относительной высоты с достаточной для практических задач точностью можно аппроксимировать формулой:

$$F^*(z) = 1,784z - 1,055z^3 + 0,241z^5 + 0,03z^7, \quad (11)$$

где  $z = 0,5/y$  — высота верхней границы слоя, подверженного влиянию, относительно высоты существенной зоны при данном значении  $x$ .

Чтобы определить степень влияния подстилающей поверхности на электромагнитную вол-

ну необходимо определить, какая часть энергии этой волны находится в прилегающем<sup>3</sup> к поверхности слое. Следовательно, для каждой промежуточной точки нужно: во-первых определить высоту у существенной зоны по (10); во вторых определить относительную высоту прилегающего слоя; в третьих по (11) определить часть мощности, находящейся в прилегающем слое.

Из (9) следует, что высота существенной зоны зависит от длины трассы распространения и увеличивается с увеличением последней. Для длинных трасс на значительном их протяжении доля ЭМВ, подвергающейся ослаблению, мала и может не учитываться. Напротив, в случае с короткими трассами даже в середине трассы высота эллипса мала и воздействию подвержена значительная часть ЭМВ.

На рис. 9, а-з для расстояний 20, 200, 2000 и 20000 длин волн представлены зависимости

<sup>3</sup>В данной работе под прилегающим слоем понимается слой с высотой равной половине длины волны (по аналогии с высотой волновода).

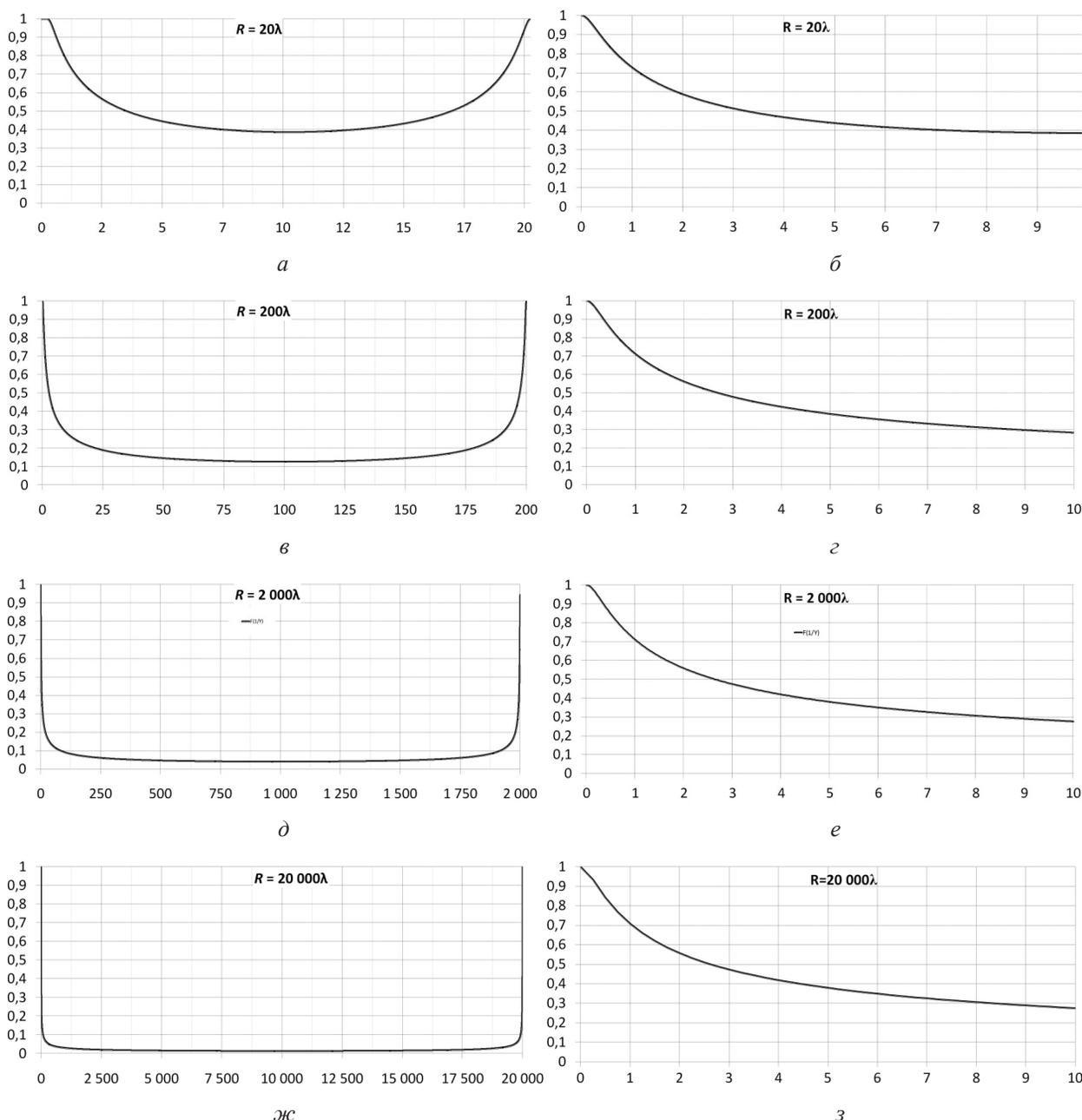


Рис. 9. Примеры функции влияния (для всей дистанции и для начального участка) для расстояний  $20\lambda$ ,  $200\lambda$ ,  $2000\lambda$  и  $20000\lambda$

величины части мощности, подверженной ослаблению за счёт подстилающей поверхности.

Из графиков видно, что при больших (уточнённое значение —  $>317\lambda$ ) расстояниях часть мощности, подверженная ослаблению, составляет менее 10 % и может не учитываться при оценочных расчётах.

Также можно определить, что размеры зон сильного влияния (так называемых площадок «взлёта» и «посадки») мало зависят от общей

протяжённости трассы. На основании табличных данных известно, что для больших трасс расстояние, на котором уровень влияния становится менее 0,1 приблизительно равно  $80\lambda$  и увеличивается при уменьшении общей длины трассы. Таким образом площадки «взлёта» и «посадки» как бы наползают друг на друга.

Для создания программного обеспечения на основе данной методики необходимо ответить на вопрос: на какую величину ослабляется поле

ЭМВ в каждой конкретной точке трассы. Как было показано в (6) и (4) исходной величиной для расчёта ослабления на однородной трассе является масштаб расстояний  $s$ . Именно эта величина определяется электрическими параметрами подстилающей поверхности. Следовательно, для определения ослабления на неоднородной трассе надо получить интегральное значение  $s^*$ , вычисленное с учётом различного вклада в общее ослабление различных участков трассы:

$$s^* = \sum_{i=1}^N s_i \gamma_i,$$

где  $s_i$  — масштаб расстояния, определяемый по (3), для  $i$ -го участка трассы;  $\gamma_i$  — значение функции влияния для этого же участка;  $N$  — количество участков, на которые разделена трасса.

Функция влияния  $\gamma$  является нормированной величиной относительно рассмотренной выше функции  $F^*(z)$ :

$$\gamma_i = k_\gamma F^*(z_i),$$

где  $k_\gamma$  — нормирующий коэффициент:

$$k_\gamma = 1 / \sum_{i=1}^N F^*(z_i).$$

Полученное таким образом интегральное значение  $s^*$  подставляется вместо  $s$  в выражение (4), а найденное значение  $x$  — в выражение (6). Значение  $F1$  является искомым значением мно-

жителя ослабления и применяется при нахождении результирующего значения напряжённости поля согласно выражению (1).

Если стоит задача построения карты распределения напряжённости электромагнитного поля, то к рассмотренному алгоритму добавляются следующие операции:

- построить веерное расположение трасс, покрывающее всю требуемую поверхность;
- рассчитать напряжённости поля во всех точках вдоль трассы.

При расчёте напряжённости поля во всех точках вдоль трассы целесообразно проводить параллельный расчёт по трассе, двигаясь от конечной точка к начальной и учитывая ослабление, вносимое каждым участком местности в трассу для каждого пройденного участка радиолинии.

### Практическая проверка методики

В качестве экспериментальной проверки работоспособности предлагаемой методики сравним результаты расчёта с экспериментальными данными. Экспериментальные данные взяты из учебника [2 стр. 295] и представлены в виде копии страницы (с поясняющими надписями) на рис. 10. Результаты расчёта по предлагаемой методике с учётом значений всех характеристик, влияющих на распространение, представлены на рис. 11.

Из анализа рисунков видно, что результаты расчётов полностью совпадают с результатом

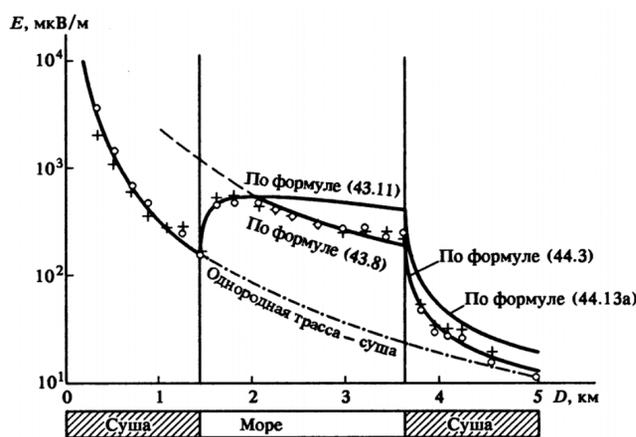


Рис. 85. Теоретические кривые и экспериментальные данные для случая трех участков разных электрических свойств (промежуточный — высокопроводящий). Длина волны 3,9 м, мощность 11 Вт, крестики и кружки — данные двух серий измерений

Рис. 10. Экспериментальных данных

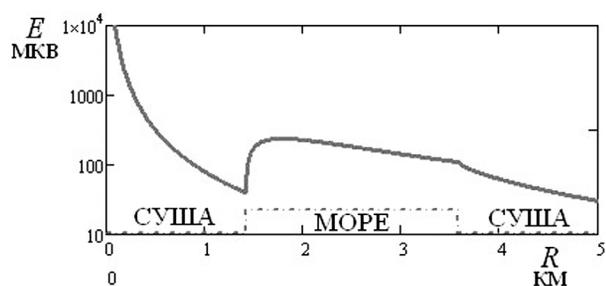


Рис. 11. Сравнение результатов расчёта

измерений на участках «суша1», «переход суша–море» и «море». На участках «переход море–суша» и «суша2» результаты расчётов и измерений совпадают качественно, но отличается численными значениями.

### Заключение

В данной работе проведён анализ физических факторов, оказывающих влияние на распространение электромагнитных волн СДВ и ДВ диапазонов, и геометрических параметров, определяющих степень влияния различных рассмотренных факторов. В результате анализа получены зависимости, на основании которых построена математическая модель расчёта напряжённости электромагнитного поля в точке приёма для любой произвольной трассы.

На основе полученной модели разработана методика расчёта напряжённости электромагнитного поля в произвольной точке Земного шара. В основу предлагаемой методики положено вычисление коэффициента ослабления, обусловленного поглощением радиоволн в полупроводящей подстилающей поверхности. Исходными данными, кроме географических координат точек передачи и приёма, являются сведения об электрической проводимости подстилающей поверхности. Причём растровые карты с такой информацией требуют предварительной обработки. Основными этапами методики являются: построение кратчайшей линии, соответствующей радиотрассе; построение профиля проводимости подстилающей поверхности вдоль радиотрассы; вычисление интегрального значения масштаба расстояния и вычисление общего значения коэффициента ослабления для данной радиотрассы.

Программное обеспечение, составленное на основании построенной модели, позволяет рассчитывать и отображать карты мощности сигналов от разных источников и их относительного уровня.

### Литература

1. Рекомендация МСЭ-R P.832-4. Мировой атлас проводимости почвы. Электронная публикация.
2. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. 2-е изд. — М.: Наука. Физматлит. 1999. 496 с.
3. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. — М.: «Связь». 1972. 336 с.
4. Долуханов М.П. Расчет напряженности поля поверхностных волн при распространении последовательно над различными почвами. — М.: «Электросвязь». 1939. № 4. 333 с.
5. Millington G. «Journ. IEEE». Vol. 96. 1949. № 3. 53 p.
6. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. — М.: «Советское радио». 1962. 480 с.
7. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике — М.: «Век», «Большая Медведица». 1997. 864 с.

### References

1. Recommendation ITU-R P. 832-4. World Atlas of Soil Conductivity. Elektronnaya publikaciya.
2. Fejnberg E.L. Propagation of radio waves along the Earth's surface. 2-e izd. — М.: Nauka. Fizmatlit. 1999. 496 p.
3. Doluhanov M.P. Propagation of radio waves. Uchebnik dlya vuzov. — М.: «Svyaz'». 1972. 336 p.
4. Doluhanov M.P. Calculation of the field strength of surface waves when propagating sequentially over different soils. — М.: «Elektrosvyaz'». 1939. № 4. 333 p.
5. Millington G. «Journ. IEEE». Vol. 96. 1949. № 3. 53 p.
6. Chernyj F.B. Propagation of radio waves. — М.: «Sovetskoe radio». 1962. 480 p.
7. Vygodskij M.YA. Handbook of Higher Mathematics — М.: «Vek», «Bol'shaya Medvedica». 1997. 864 p.