

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.533-8

Метод прогнозирования распространения радиоволн на ВЧ*

(Вопрос МСЭ-R 223/3)

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что сопоставление с Банком данных D1 МСЭ-R показало, что метод, описываемый в Приложении 1 настоящей Рекомендации, сравним по точности с другими, более сложными методами;
- b) что для практического использования данного метода необходима информация о рабочих характеристиках передающих и приемных антенн**;
- c) что сформулированы прикладные машинные коды, которые имеются в Бюро радиосвязи,

рекомендует,

- 1 чтобы для прогнозирования распространения пространственной волны в полосе частот от 2 до 30 МГц с помощью ЭВМ использовалась информация, содержащаяся в Приложении 1;
- 2 чтобы администрации и МСЭ-R приложили усилия к улучшению методов прогнозирования для повышения эксплуатационных возможностей и точности.

Приложение 1**СОДЕРЖАНИЕ**

- 1 Введение
- 2 Расположение контрольных точек
- 3 Основная и рабочая максимальные применимые частоты
 - 3.1 Основные максимальные применимые частоты
 - 3.2 Критическая частота слоя E (foE)
 - 3.3 Основная МПЧ слоя E
 - 3.4 Характеристики слоя F2
 - 3.5 Основная МПЧ слоя F2

* Компьютерная программа (РЕК533), касающаяся процедур прогнозирования, описанных в настоящей Рекомендации, доступна в той части Web-сайта МСЭ-R, которая относится к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

** МСЭ располагает подробной информацией о характеристиках антенн с соответствующей компьютерной программой; для более подробного ознакомления см. Рекомендацию МСЭ-R BS.705.

- 3.5.1 Моды низшего порядка
 - 3.5.1.1 Трассы протяженностью до d_{max} (км)
 - 3.5.1.2 Трассы протяженностью более d_{max} (км)
- 3.5.2 Моды высшего порядка (трассы протяженностью до 9000 км)
 - 3.5.2.1 Трассы протяженностью до d_{max} (км)
 - 3.5.2.2 Трассы протяженностью более d_{max} (км)
- 3.6 Рабочая МПЧ для трассы
- 4 Максимальная частота экранирования слоя E (f_s)
- 5 Медианное значение напряженности поля пространственной волны
 - 5.1 Трассы протяженностью до 7000 км
 - 5.1.1 Рассматриваемые моды
 - 5.1.2 Угол места
 - 5.1.3 Определение напряженности поля
 - 5.1.4 Временная задержка
 - 5.2 Трассы протяженностью более 9000 км
 - 5.3 Трассы протяженностью от 7000 до 9000 км
- 6 Медианная номинальная мощность на входе приемника
- 7 Месячная медиана отношения сигнал/шум
- 8 Напряженность поля пространственной волны, номинальная мощность сигнала на входе приемника и отношения сигнал/шум для других процентов времени
- 9 Наименьшая применимая частота (НПЧ)
- 10 Основная надежность линии (ОНЛ)

1 Введение

Настоящий метод прогнозирования распространения радиоволн, предназначенный для оценки надежности и совместимости компонентов линии в полосе частот от приблизительно 2 до 30 МГц, вытекает из метода, впервые предложенного в 1983 году Временной рабочей группой 6/12 бывшего МККР, с последующими усовершенствованиями, внесенными Второй сессией Всемирной административной радиоконференции по планированию ВЧ полос, распределенных для радиовещательной службы (Женева, 1987 г.) (ВАРК ВЧРВ-87), бывшим МККР, МСЭ-R, радиовещательными и другими организациями. В данной процедуре используется анализ траектории луча для трасс протяженностью до 7000 км, описание сложных мод путем эмпирической аппроксимации данных измерений для трасс протяженностью свыше 9000 км и гладкая интерполяция величин, полученных с помощью двух названных методов, для трасс протяженностью от 7000 до 9000 км.

Оценены значения месячной медианы основной МПЧ, напряженности поля падающей пространственной волны и номинальной мощности на входе приемника, поступающей с приемной антенны, работающей без потерь и имеющей заданный коэффициент усиления. Проведена стандартизация уровней сигнала на основе банка данных измерений МСЭ-R. Метод требует определения ряда характеристик ионосферы и параметров распространения радиоволн в указанных "контрольных точках".

2 Расположение контрольных точек

Предполагается, что распространение происходит по трассе большого круга между точками расположения передатчика и приемника посредством E-мод (на расстояниях до 4000 км) и F2-мод (на всех расстояниях). В зависимости от протяженности трассы и отражающего слоя контрольные точки устанавливаются в соответствии с таблицей 1.

ТАБЛИЦА 1

Расположение контрольных точек для определения основной МПЧ, экранирования слоем E, высот зеркального отражения по траектории луча и ионосферного поглощения

а) Основная МПЧ и соответствующая электронная гирочастота

Протяженность трассы, D (км)	Е-моды	F2-моды
$0 < D \leq 2000$	M	M
$2000 < D \leq 4000$	$T + 1000, R - 1000$	–
$2000 < D \leq d_{max}$	–	M
$D > d_{max}$	–	$T + d_0 / 2, R - d_0 / 2$

б) Экранирование слоем E

Протяженность трассы, D (км)	F2-моды
$0 < D \leq 2000$	M
$2000 < D < 9000$	$T + 1000, R - 1000$

в) Высоты зеркального отражения по траектории луча

Протяженность трассы, D (км)	F2-моды
$0 < D \leq d_{max}$	M
$d_{max} < D < 9000$	$T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2$

д) Ионосферное поглощение и соответствующая электронная гирочастота

Протяженность трассы, D (км)	Е-моды	F2-моды
$0 < D \leq 2000$	M	M
$2000 < D \leq 4000$	$T + 1000, M, R - 1000$	–
$2000 < D \leq d_{max}$	–	$T + 1000, M, R - 1000$
$d_{max} < D < 9000$	–	$T + 1000, T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2, R - 1000$

M : средняя точка трассы

T : точка расположения передатчика

R : точка расположения приемника

d_{max} : максимальная длина скачка F2-моды

d_0 : длина скачка моды низшего порядка

Расстояния даны в километрах.

3 Основная и рабочая максимальные применимые частоты

Оценка рабочей МПЧ, наивысшей частоты, на которой возможна приемлемая работа радиослужбы, проводится в два этапа: первый состоит в оценке основной МПЧ исходя из рассмотрения параметров ионосферы, а второй – в определении поправочного коэффициента для учета механизмов распространения на частотах выше основной МПЧ.

3.1 Основные максимальные применимые частоты

Основные МПЧ различных мод распространения оцениваются через соответствующие критические частоты ионосферного слоя и с помощью коэффициента, характеризующего длину скачка. Когда рассматриваются обе моды, E и F2, наибольшая из двух основных МПЧ E-моды и F2-моды низшего порядка дает основную МПЧ для трассы.

3.2 Критическая частота слоя E (foE)

Частота foE оценивается в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.1239.

3.3 Основная МПЧ слоя E

Частота foE определяется в контрольных точках, указанных в таблице 1а); для трасс протяженностью 2000–4000 км берется меньшее значение. Основная МПЧ *n*-скачковой E-моды на трассе протяженностью *D* определяется как:

$$n \text{ E}(D)\text{МПЧ} = \text{foE} \cdot \sec i_{110}, \quad (1)$$

где i_{110} – угол падения на высоте точки зеркального отражения 110 км в средней точке скачка, имеющего длину $d = D/n$.

Основная МПЧ слоя E для трассы – это величина E(D)МПЧ для E-моды низшего порядка.

3.4 Характеристики слоя F2

Численные выражения ионосферных характеристик foF2 и M(3000)F2 для значений индекса солнечной активности $R_{12} = 0$ и 100 и для каждого месяца взяты из Рекомендации МСЭ-R P.1239, где магнитное поле оценивается на высоте 300 км. Для определения этих величин для требуемых значений времени и контрольных точек, указанных в таблице 1а), используются коэффициенты Осло. Для преобладающих значений индекса между $R_{12} = 0$ и 150 проводится линейная интерполяция или экстраполяция (см. Рекомендацию МСЭ-R P.371). При более высокой солнечной активности R_{12} считается равным 150, но только для foF2.

3.5 Основная МПЧ слоя F2

3.5.1 Моды низшего порядка

3.5.1.1 Трассы протяженностью до d_{max} (км)

Порядок n_0 низшей моды определяется геометрическим способом с помощью высоты зеркального отражения, h_r , в контрольной точке, расположенной в середине трассы, с использованием уравнения:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ км или } 500 \text{ км, берется меньшая из величин} \quad (2)$$

Для этой моды основная МПЧ слоя F2, которая является также основной МПЧ слоя F2 для трассы, вычисляется следующим образом:

$$n_0 \text{ F2}(D)\text{МПЧ} = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot \text{foF2} + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{\max}} \right), \quad (3)$$

где:

f_H : электронная гирочастота на высоте 300 км, определяемая в каждой из соответствующих контрольных точек, указанных в таблице 1а)

$$Cd = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6, \quad (4)$$

где $Z = 1 - 2d / d_{\max}$

$$d_{\max} = 4780 + (12\,610 + 2140 / x^2 - 49\,720 / x^4 + 688\,900 / x^6) (1 / B - 0,303) \quad (5)$$

$$B = M(3000)F2 - 0,124 + [M(3000)F2]^2 - 4] \cdot \left[0,0215 + 0,005 \sin \left(\frac{7,854}{x} - 1,9635 \right) \right], \quad (6)$$

где:

$d = D/n_0$ и d_{\max} выражены в километрах

C_{3000} : значение C_d для $D = 3000$ км

$x = \text{foF2}/\text{foE}$ или 2, берется большая из величин

Частота foE вычисляется, как описано в п. 3.3.

3.5.1.2 Трассы протяженностью более d_{\max} (км)

За основную МПЧ моды $n_0 \text{ F2}(D)\text{МПЧ}$ низшего порядка для трассы протяженностью D принимается наименьшее из значений $\text{F2}(d_{\max})\text{МПЧ}$, определенных с помощью уравнения (3) в двух контрольных точках, указанных в таблице 1а). Эта величина является также основной МПЧ для трассы.

3.5.2 Моды высшего порядка (трассы протяженностью до 9000 км)

3.5.2.1 Трассы протяженностью до d_{\max} (км)

Основная МПЧ слоя F2 для n -скачковой моды определяется с помощью уравнений (3)–(6) в контрольной точке, расположенной в середине трассы и указанной в таблице 1а), при длине скачка $d = D/n$.

3.5.2.2 Трассы протяженностью более d_{\max} (км)

Основная МПЧ слоя F2 для n -скачковой моды выражается через величину $\text{F2}(d_{\max})\text{МПЧ}$ и масштабный коэффициент расстояний, зависящий от длины скачков, соответствующих рассматриваемой моде и минимально возможному порядку моды.

$$n \text{ F2}(D)\text{МПЧ} = \text{F2}(d_{\max})\text{МПЧ} \cdot M_n / M_{n_0}, \quad (7)$$

где M_n / M_{n_0} выводится из уравнения (3) следующим образом:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n \text{ F2}(d)\text{МПЧ}}{n_0 \text{ F2}(D)\text{МПЧ}} \quad (8)$$

Выбирается наименьшая из величин, вычисляемых в двух контрольных точках, указанных в таблице 1а).

3.6 Рабочая МПЧ для трассы

Рабочая МПЧ для трассы является наибольшей из рабочих МПЧ для F2-мод и рабочих МПЧ для E-мод. Для F2-мод рабочая МПЧ = основная МПЧ. R_{op} , где величина R_{op} приведена в таблице 1 Рекомендации МСЭ-R P.1240. Для E-мод рабочая МПЧ равна основной МПЧ.

Оценка рабочей МПЧ, превышенной в течение 10% дней, определяется путем умножения медианной рабочей МПЧ на коэффициент 1,15, и в течение 90% дней – путем умножения на соответствующий коэффициент, указанный в таблице 2 раздела 7 Рекомендации МСЭ-R P.1240 в случае F-мод. В случае E-мод подходящие коэффициенты составляют 1,05 и 0,95, соответственно.

4 Максимальная частота экранирования слоя E (f_s)

Экранирование F2-мод слоем E рассматривается для трасс протяженностью до 9000 км. Для расчета максимальной частоты экранирования слоя E (см. таблицу 1b)) берется величина foE в средней точке трассы (для трасс до 2000 км) или большее значение из величин foE в двух контрольных точках, расположенных в 1000 км от каждого из концов трассы (для трасс длиннее 2000 км).

$$f_s = 1,05 \text{ foE sec } i, \quad (9)$$

при:

$$i = \arcsin \left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r} \right), \quad (10)$$

где:

- i : угол падения на высоте $h_r = 110$ км
- R_0 : радиус Земли, 6371 км
- Δ_F : угол места для моды слоя F2 (определяется из уравнения (11)).

5 Медианное значение напряженности поля пространственной волны

Прогнозируемая напряженность поля является месячным медианным значением, взятым по выборке из всех дней месяца.

5.1 Трассы протяженностью до 7000 км

5.1.1 Рассматриваемые моды

Рассматриваются до трех E-мод (только для трасс протяженностью до 4000 км) и до шести F2-мод, каждая из которых удовлетворяет следующим специальным критериям:

- E-моды – являющиеся модами низшего порядка с длиной скачка до 2000 км или одной из следующих двух мод высшего порядка;
 - имеющие угол места $\geq 3^\circ$, как это получается из уравнения (11), при зеркальном отражении от высоты $h_r = 110$ км.
- F2-моды – являющиеся модами низшего порядка с длиной скачка до d_0 (км) или одной из следующих пяти мод высшего порядка;

- имеющие угол места $\geq 3^\circ$, как это получается из уравнения (11), при зеркальном отражении от высоты h_r , определяемой из уравнения (2), где M(3000)F2 оценивается в средней точке трассы (для трасс протяженностью до d_{max} (км)) или в контрольных точках, приведенных в таблице 1с), для которых foF2 имеет более низкое значение (для трасс протяженностью от d_{max} до 9000 км);
- для которых максимальная частота экранирования слоя E, определяемая по описанию в п. 4, меньше рабочей частоты.

5.1.2 Угол места

Угол места, который применим для всех частот, включая частоты выше основной МПЧ, определяется следующим образом:

$$\Delta = \arctan \left(\cot \frac{d}{2 R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \operatorname{cosec} \frac{d}{2 R_0} \right), \quad (11)$$

где:

d : длина скачка n -скачковой моды, получаемая как $d = D/n$

h_r : эквивалентная высота плоско-зеркального отражения

для E-мод $h_r = 110$ км

для F2-мод h_r является функцией времени, места и длины скачка.

Высота зеркального отражения для F2-моды, h_r , рассчитывается следующим образом:

$$x = \text{foF2}/\text{foE} \quad \text{и} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316,$$

где:

$$\Delta M = \frac{0,18}{y - 1,4} + \frac{0,096(R_{12} - 25)}{150}$$

и $y = x$ или 1,8, берется большая величина.

а) Для $x > 3,33$ и $x_r = f/\text{foF2} \geq 1$, где f – частота волны:

$$h_r = h \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (12)$$

где:

$$h = A_1 + B_1 2,4^{-a} \quad \text{для } B_1 \text{ и } a \geq 0$$

$$= A_1 + B_1 \quad \text{в противном случае}$$

$$\text{при } A_1 = 140 + (H - 47) E_1$$

$$B_1 = 150 + (H - 17) F_1 - A_1$$

$$E_1 = -0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6$$

F_1 определяется как:

$$F_1 = -1,862 x_r^4 + 12,95 x_r^3 - 32,03 x_r^2 + 33,50 x_r - 10,91 \quad \text{для } x_r \leq 1,71$$

$$F_1 = 1,21 + 0,2 x_r \quad \text{для } x_r > 1,71,$$

а a зависит от расстояния d и ширины зоны молчания d_s следующим образом:

$$a = (d - d_s) / (H + 140),$$

$$\text{где: } d_s = 160 + (H + 43) G$$

$$G = -2,102 \cdot x_r^4 + 19,50 \cdot x_r^3 - 63,15 \cdot x_r^2 + 90,47 \cdot x_r - 44,73 \quad \text{для } x_r \leq 3,7$$

$$G = 19,25 \quad \text{для } x_r > 3,7$$

б) Для $x > 3,33$ и $x_r < 1$:

$$h_r = h \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (13)$$

где:

$$h = A_2 + B_2 b \quad \text{для } B_2 \geq 0$$

$$= A_2 + B_2 \quad \text{в противном случае}$$

$$\text{и } A_2 = 151 + (H - 47) E_2$$

$$B_2 = 141 + (H - 24) F_2 - A_2$$

$$E_2 = 0,1906 Z^2 + 0,00583 Z + 0,1936$$

$$F_2 = 0,645 Z^2 + 0,883 Z + 0,162,$$

где: $Z = x_r$ или 0,1, берется большая величина, а b зависит от нормированного расстояния d_f , Z и H следующим образом:

$$b = -7,535 \cdot d_f^4 + 15,75 d_f^3 - 8,834 d_f^2 - 0,378 d_f + 1,$$

где: $d_f = \frac{0,115 d}{Z(H + 140)}$ или 0,65; берется меньшая величина

с) Для $x \leq 3,33$:

$$h_r = 115 + HJ + Ud \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (14)$$

при $J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$

и $U = 8 \times 10^{-5} (H - 80) (1 + 11 y^{-2,2}) + 1,2 \times 10^{-3} H y^{-3,6}$

Для трасс протяженностью до d_{max} (км) h_r оценивается в средней точке трассы: для более длинных трасс ее величина определяется во всех контрольных точках, указанных в таблице 1с), а затем используется среднее из полученных значений.

5.1.3 Определение напряженности поля

Для каждой моды w , выбранной в п. 5.1.1, медианное значение напряженности поля определяется как:

$$E_{tw} = 136,6 + P_t + 20 \log f - L_t \quad \text{дБ(1 мкВ/м),} \quad (15)$$

где:

f : частота передачи (МГц)

P_t : мощность передатчика (дБ(1 кВт))

L_t : потери передачи по траектории луча для рассматриваемой моды, определяемые как:

$$L_t = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' - G_t + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad (16)$$

при:

p' : виртуальная наклонная дальность (км)

$$p' = 2 R_0 \sum_1^n \left[\frac{\sin(d/2 R_0)}{\cos[\Delta + (d/2 R_0)]} \right] \quad (17)$$

G_t : усиление передающей антенны для требуемого азимута и угла места (Δ) по отношению к изотропной антенне (дБ)

L_i : потери за счет поглощения (дБ) для n -скачковой моды, определяемые как:

$$L_i = \frac{n(1 + 0,0067 R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{noon} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{jnoon})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right) \quad (18)$$

при:

$$F(\chi) = \cos p(0,881 \chi) \text{ или } 0,02, \text{ в зависимости от того, какая величина больше,} \quad (19)$$

и где:

$$f_v = f \cos i \quad (20)$$

и

i : угол падения на высоте 110 км

k : количество контрольных точек (из таблицы 1d)

f_L : среднее из значений электронной гирочастоты в контрольных точках, указанных в таблице 1d), вдоль продольной составляющей магнитного поля Земли на высоте 100 км

χ_j : солнечный зенитный угол в j -й контрольной точке или 102° , в зависимости от того, какая величина меньше. При расчете этого параметра учитывается зависимость от времени для середины рассматриваемого месяца

χ_{jnoon} : значение χ_j в полдень по местному времени

AT_{noon} : коэффициент поглощения в полдень по местному времени при $R_{12} = 0$, значения которого приведены на рисунке 1 в виде функции от географической широты и месяца

$\Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right)$: коэффициент проникновения в поглощающий слой, данный на рисунке 2 в виде функции от отношения эквивалентной частоты вертикально падающей волны, f_v , к foE

p : показатель дневного поглощения, приведенный на рисунке 3 в виде функции от модифицированного наклона широты (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1239, Приложение 1) и месяца.

На частотах выше основной МПЧ поглощение по-прежнему зависит от частоты и рассчитывается в предположении, что траектории лучей остаются такими же, как и на основной МПЧ.

L_m : потери "выше МПЧ".

Для частоты f , равной или ниже основной МПЧ (f_b) данной моды:

$$L_m = 0 \quad (21)$$

Для E-мод при $f > f_b$:

$$L_m = 130 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^2 \text{ дБ} \quad (22)$$

или 81 дБ, в зависимости от того, что меньше.

Для F2-мод при $f' > f_b$:

$$L_m = 36[(f / f_b) - 1]^{1/2} \quad \text{дБ} \quad (23)$$

или 62 дБ, в зависимости от того, что меньше.

L_g : суммарные потери при отражении от земли в промежуточных точках отражения:

Для n -скачковой моды:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{дБ} \quad (24)$$

L_h : коэффициент, учитывающий авроральные и другие потери сигнала; приведен в таблице 2. Каждое значение определяется через геомагнитную широту G_n (к северу или югу от экватора) и местное время t для геоцентрического диполя с координатами полюса $78,5^\circ$ с. ш. и $68,2^\circ$ з. д.: взяты средние значения для контрольных точек, указанных в таблице 1d).

В Северном полушарии зимними месяцами принято считать декабрь–февраль, равноденствие приходится на март–май и сентябрь–ноябрь, а летние месяцы – это июнь–август. Для Южного полушария зимние и летние месяцы следует поменять местами.

Для $G_n < 42,5^\circ$, $L_h = 0$ дБ

L_z : член уравнения, учитывающий эффекты распространения пространственной волны, не включенные в этот метод каким-либо другим образом. В настоящее время рекомендуется значение 9,9 дБ (см. также определение L_y , данное в п. 5.2).

РИСУНОК 1

Коэффициент поглощения, $AT_{\text{погл}}$

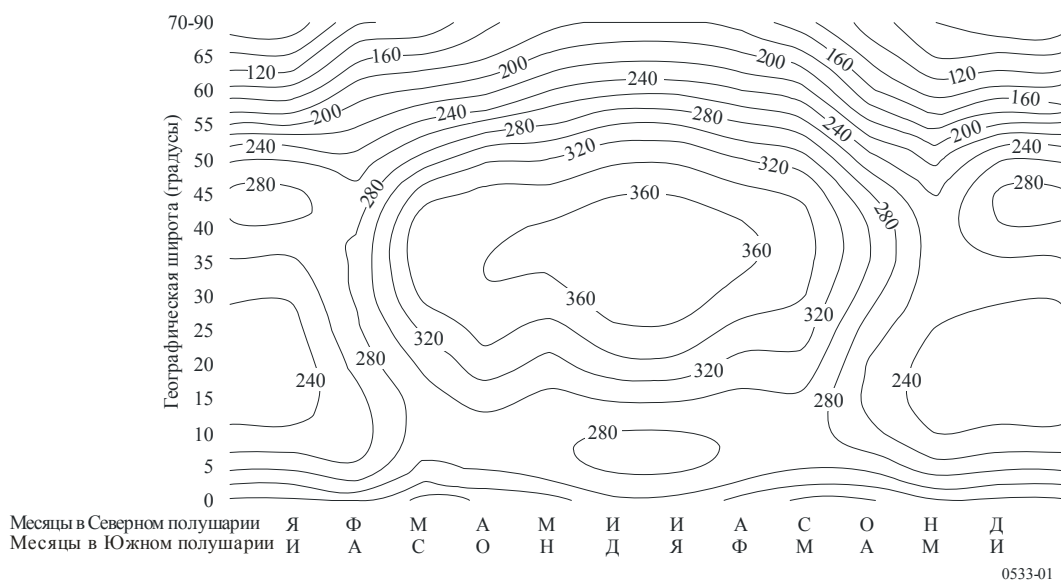


РИСУНОК 2
Коэффициент проникновения в поглощающий слой, $\varphi_n \left(\frac{f_v}{f_oE} \right)$

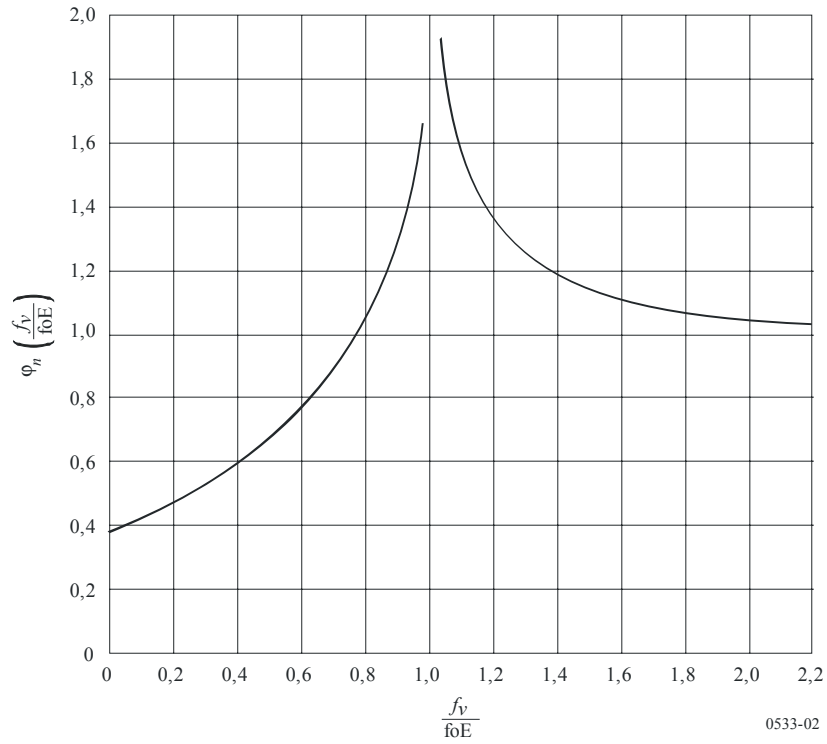
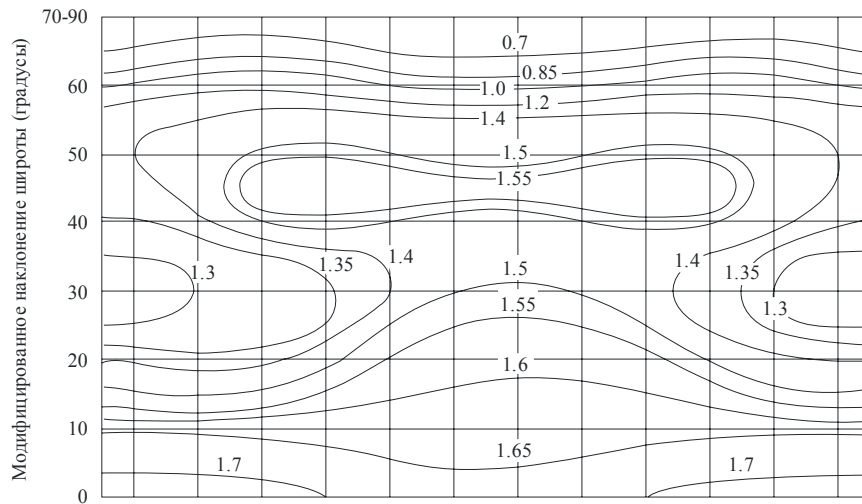


РИСУНОК 3
Показатель дневного поглощения, ρ



Месяцы в Северном полушарии Я Ф М А М И И А С О Н Д
 Месяцы в Южном полушарии И А С О Н Д Я Ф М А М И

0533-03

Без учета мод, экранированных слоем E, за результирующую эквивалентную медианную напряженность поля пространственной волны принимается квадратный корень из суммы квадратов напряженностей поля для N мод, где N выбирается так, чтобы охватить до трех наиболее сильных F2-мод, а также, при длине трасс до 4000 км, две наиболее сильные E-моды, то есть:

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw}/10} \quad \text{дБ(1 мкВ/м)} \quad (25)$$

ТАБЛИЦА 2

Значения L_h , учитывающие авроральные и другие потери сигналов (дБ)

G_n	а) Дальность передачи меньше или равна 2500 км								
	Местное время в средней точке трассы, t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
$77,5^\circ \leq G_n$	2,0	6,6	6,2	1,5	0,5	1,4	1,5	1,0	З и м а
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,4	8,3	8,6	0,9	0,5	2,5	3,0	3,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,2	15,6	12,8	2,3	1,5	4,6	7,0	5,0	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	7,0	16,0	14,0	3,6	2,0	6,8	9,8	6,6	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,0	4,5	6,6	1,4	0,8	2,7	3,0	2,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,3	1,0	3,2	0,3	0,4	1,8	2,3	0,9	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,9	0,6	2,2	0,2	0,2	1,2	1,5	0,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,4	0,3	1,1	0,1	0,1	0,6	0,7	0,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,4	2,5	7,4	3,8	1,0	2,4	2,4	3,3	Р а в н о д е н с т в и е
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,3	11,0	11,6	5,1	2,6	4,0	6,0	7,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,5	12,0	21,4	8,5	4,8	6,0	10,0	13,7	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,7	11,2	17,0	9,0	7,2	9,0	10,9	15,0	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,4	4,4	7,5	5,0	2,6	4,8	5,5	6,1	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,7	2,0	5,0	3,0	2,2	4,0	3,0	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,1	1,3	3,3	2,0	1,4	2,6	2,0	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,5	0,6	1,6	1,0	0,7	1,3	1,0	1,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	2,2	2,7	1,2	2,3	2,2	3,8	4,2	3,8	Л е т о
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,4	3,0	2,8	3,0	2,7	4,2	4,8	4,5	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,9	4,2	6,2	4,5	3,8	5,4	7,7	7,2	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,5	4,8	9,0	6,0	4,8	9,1	9,5	8,9	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	3,2	2,7	4,0	3,0	3,0	6,5	6,7	5,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,5	1,8	2,4	2,3	2,6	5,0	4,6	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,6	1,2	1,6	1,5	1,7	3,3	3,1	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	1,6	1,5	1,3	

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

Значения L_b , учитывающие авроральные и другие потери сигналов (дБ)

G_n	б) Дальность передачи больше 2500 км								
	Местное время в средней точке трассы, t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,5	2,7	2,5	0,8	0,0	0,9	0,8	1,6	З и м а
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,5	4,5	4,3	0,8	0,3	1,6	2,0	4,8	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	5,5	5,0	7,0	1,9	0,5	3,0	4,5	9,6	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,3	7,0	5,9	2,0	0,7	4,0	4,5	10,0	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,6	2,4	2,7	0,6	0,4	1,7	1,8	3,5	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	1,0	1,3	0,1	0,1	1,0	1,5	1,4	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	0,8	0,1	0,1	0,6	1,0	0,5	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,4	0,0	0,0	0,3	0,5	0,4	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,0	1,2	2,7	3,0	0,6	2,0	2,3	1,6	Р а в н о д е н с т в и е
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,8	2,9	4,1	5,7	1,5	3,2	5,6	3,6	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	3,7	5,6	7,7	8,1	3,5	5,0	9,5	7,3	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	3,9	5,2	7,6	9,0	5,0	7,5	10,0	7,9	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,4	2,0	3,2	3,8	1,8	4,0	5,4	3,4	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	0,9	1,8	2,0	1,3	3,1	2,7	2,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	1,2	1,3	0,8	2,0	1,8	1,3	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,6	0,6	0,4	1,0	0,9	0,6	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,9	3,8	2,2	1,1	2,1	1,2	2,3	2,4	Л е т о
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,9	4,6	2,9	1,3	2,2	1,3	2,8	2,7	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,4	6,3	5,9	1,9	3,3	1,7	4,4	4,5	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,5	8,5	7,6	2,6	4,2	3,2	5,5	5,7	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,8	3,8	3,7	1,4	2,7	1,6	4,5	3,2	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,2	2,4	2,2	1,0	2,2	1,2	4,4	2,5	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,4	1,6	1,4	0,6	1,4	0,8	2,9	1,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,7	0,8	0,7	0,3	0,7	0,4	1,4	0,8	

5.1.4 Временная задержка

Временная задержка отдельной моды определяется как:

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{мс}, \quad (26)$$

где:

p' : виртуальная наклонная дальность (км), задаваемая уравнением (17)

c : скорость света (км/с).

Чтобы получить профиль медианных значений временной задержки, значения временной задержки для каждой отдельной моды можно использовать совместно с прогнозируемой напряженностью поля для каждой моды, определенной согласно процедуре п. 5.1.3.

5.2 Трассы протяженностью более 9000 км

В этом методе прогнозы осуществляются путем деления трассы на минимальное количество n скачков равной длины, не превышающих 4000 км каждый.

Результирующая медианная напряженность поля E_{il} получается как:

$$E_{il} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 36,4 + P_t + G_{il} + G_{ap} - L_y \quad \text{дБ(1 мкВ/м)} \quad (27)$$

E_0 – напряженность поля в свободном пространстве для э.и.и.м 3 МВт. В этом случае:

$$E_0 = 139,6 - 20 \log p' \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (28)$$

где p' вычисляется с помощью уравнений (17) и (11) при $h_r = 300$ км

G_{il} : наибольшая величина усиления передающей антенны при заданном азимуте в диапазоне углов места $0-8^\circ$ (дБ)

G_{ap} : увеличение напряженности поля за счет фокусировки на больших расстояниях, определяемое следующим образом:

$$G_{ap} = 10 \log \frac{D}{R_0 |\sin(D/R_0)|} \quad \text{дБ} \quad (29)$$

Поскольку G_{ap} из вышеприведенной формулы стремится к бесконечности в случае, когда D кратно πR_0 , оно ограничено величиной 15 дБ

L_y : член уравнения, аналогичный по концепции L_z . В настоящее время рекомендуется значение – 3,7 дБ.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Необходимо отметить, что значения L_y и L_z зависят от особенностей метода прогнозирования, так что любые изменения в этих методах должны сопровождаться пересмотром величин L_y и L_z

f_H : среднее из значений электронной гирочастоты, определенной в контрольных точках, данных в таблице 1а)

f_M : верхняя опорная частота. Она определяется отдельно для двух контрольных точек, указанных в таблице 1а), и берется меньшая из величин:

$$f_M = K \cdot f_g \quad \text{МГц} \quad (30)$$

$$K = 1,2 + W \frac{f_g}{f_{g,noon}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{g,noon}}{f_g}} - 1 \right] + Y \left[\frac{f_{g,min}}{f_{g,noon}} \right]^2, \quad (31)$$

где: f_g : F2(4000)МПЧ = 1,1 F2(3000)МПЧ

$f_{g,noon}$: значение f_g для времени, соответствующего местному полудню

$f_{g,min}$: наименьшее за 24 часа значение f_g .

W , X и Y даны в таблице 3. Азимут трассы, расположенной вдоль большого круга, определяется в центре всей трассы, и этот угол используется для линейной интерполяции по углу между величинами, полученными для направлений восток–запад и север–юг.

ТАБЛИЦА 3

Значения W , X и Y , используемые для определения поправочного коэффициента K

	W	X	Y
Восток–запад	0,1	1,2	0,6
Север–юг	0,2	0,2	0,4

f_L : нижняя опорная частота:

$$f_L \left(5,3 \times I \left[\frac{(1 + 0,009 R_{12}) \sum_{\chi}^{2n} \cos^{0,5} \chi}{\cos i_{90} \log_e \left[\frac{9,5 \times 10^6}{p'} \right]} \right]^{1/2} - f_H \right) \cdot A_w \quad \text{МГц}, \quad (32)$$

где R_{12} не подвержено насыщению при высоких значениях.

При суммировании χ определяется для каждого пересечения траекторией луча уровня на высоте 90 км. Для $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0,5} \chi$ принимается равным нулю.

i_{90} : угол падения на высоте 90 км

I : приводится в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Значения I , используемые в уравнении для f_L

Географические широты		Месяц											
Первая оконечная станция	Вторая оконечная станция	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д
> 35° с. ш.	> 35° с. ш.	1,1	1,05	1	1	1	1	1	1	1	1	1,05	1,1
> 35° с. ш.	35° с. ш. – 35° ю. ш.	1,05	1,02	1	1	1	1	1	1	1	1	1,02	1,05
> 35° с. ш.	> 35° ю. ш.	1,05	1,02	1	1	1,02	1,05	1,05	1,02	1	1	1,02	1,05
35° с. ш. – 35° ю. ш.	35° с. ш. – 35° ю. ш.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35° с. ш. – 35° ю. ш.	> 35° ю. ш.	1	1	1	1	1,02	1,05	1,05	1,02	1	1	1	1
> 35° ю.ш.	> 35° ю.ш.	1	1	1	1	1,05	1,1	1,1	1,05	1	1	1	1

A_w : коэффициент зимней аномалии, определяемый в средней точке трассы. Он равен единице для географических широт от 0° до 30° и на 90° и достигает максимальных значений, приведенных в таблице 5, при 60°. Его значения для промежуточных широт определяются с помощью линейной интерполяции.

ТАБЛИЦА 5

Значения коэффициента зимней аномалии, A_w , используемые в уравнении для f_L , для географической широты 60°

Полушарие	Месяц											
	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д
Северное	1,30	1,15	1,03	1	1	1	1	1	1	1,03	1,15	1,30
Южное	1	1	1	1,03	1,15	1,30	1,30	1,15	1,03	1	1	1

Значения f_L вычисляются каждый час вплоть до того местного времени t_r , когда $f_L \leq 2f_{LN}$,

где:

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \quad \text{МГц} \quad (33)$$

В течение следующих трех часов f_L вычисляется по следующей формуле:

$$f_L = 2 f_{LN} e^{-0,23t} \quad (34)$$

где t – время в часах после t_r . Для остальных часов $f_L = f_{LN}$ до тех пор, пока уравнение (32) не даст более высокую величину.

5.3 Трассы протяженностью от 7000 до 9000 км

В этом диапазоне расстояний медианное значение напряженности поля пространственной волны, E_{ii} , определяется с помощью интерполяции между значениями E_{is} и E_{il} . E_{is} – квадратный корень из суммы квадратов напряженностей поля, рассчитывается с помощью уравнения (25) для трех наиболее сильных из шести возможных F2-мод, удовлетворяющих трем критериям, приведенным в п. 5.1.1. E_{il} относится к сложной моде и определяется с помощью уравнения (27).

$$E_{ii} = 100 \log_{10} X_i \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (35)$$

причем

$$X_i = X_s + \frac{D - 7000}{2000} (X_l - X_s),$$

где:

$$X_s = 10^{0,01E_{is}}$$

и

$$X_l = 10^{0,01E_{il}}$$

Основная МПЧ для трассы равна наименьшему из значений F2(d_{max})МПЧ, получаемых с помощью уравнения (3), для двух контрольных точек, данных в таблице 1а).

6 Медианная номинальная мощность на входе приемника

В диапазоне расстояний до 7000 км, для которых напряженность поля рассчитывается с помощью метода, описанного в п. 5.1, для данной моды w с напряженностью поля пространственной волны, E_{rw} (дБ(1 мкВ/м)), на частоте f (МГц), соответствующая номинальная мощность сигнала, P_{rw} (дБВт), на выходе приемной антенны без потерь с усилением G_{rw} (в дБ, относительно изотропного излучателя) в направлении прихода сигнала имеет вид:

$$P_{rw} = E_{rw} + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107,2 \quad \text{дБВт} \quad (36)$$

Результирующая медианная номинальная мощность сигнала, P_r (дБВт), получается путем суммирования мощностей различных мод, причем вклад каждой моды зависит от усиления приемной антенны в направлении прихода этой моды. Для N мод, вносящих вклад в суммирование:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{дБВт} \quad (37)$$

В диапазоне расстояний выше 9000 км, для которых напряженность поля рассчитывается с помощью метода, изложенного в п. 5.2, за напряженность поля E_{il} принимается сумма напряженностей поля сложных мод. В этом случае P_r определяется с помощью уравнения (36), где G_{rw} – наибольшее значение усиления приемной антенны при заданном азимуте в диапазоне углов места от 0° до 8° .

Для трасс длиной от 7000 до 9000 км мощность определяется с помощью уравнения (35) с использованием мощностей, соответствующих E_{is} и E_{il} .

7 Месячная медиана отношения сигнал/шум

Рекомендация МСЭ-R P.372 дает значения медиан мощности шума из-за атмосферных помех в случае приема на короткий вертикальный несимметричный вибратор без потерь, расположенный над идеально проводящей землей, а также соответствующие уровни шума из-за промышленных помех и интенсивности космического шума. Пусть F_a (дБ(kTb)) – результирующий коэффициент внешнего шума на частоте f (МГц) при приеме на идеальный короткий вертикальный несимметричный вибратор без потерь, расположенный над идеально проводящей плоской землей; k – постоянная Больцмана, а T – эталонная температура 288 К. Тогда в принципе при использовании некоторых других применяемых на практике антенн результирующий коэффициент шума может отличаться от величины F_a (см. Рекомендацию МСЭ-R P.372). Тем не менее в условиях отсутствия полных данных измерений шумов для различных антенн в качестве первого приближения можно использовать ту же самую величину F_a . Таким образом, месячное медианное значение отношения сигнал/шум, S/N (дБ), получаемое для полосы частот b (Гц) составляет:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (38)$$

8 Напряженность поля пространственной волны, номинальная мощность сигнала на входе приемника и отношения сигнал/шум для других процентов времени

Для расчета напряженности поля пространственной волны, номинальной мощности сигнала на входе приемника и отношения сигнал/шум для заданных процентов времени на основе децилей отклонения сигналов и шума в течение часа и ото дня ко дню используются уравнения (11) и (12), приведенные в Отчете МСЭ-R P.266. Допуски на замирания сигнала соответствуют допускам, принятым ВАРК ВЧРВ-87 с верхней децилью 5 дБ и нижней децилью 8 дБ отклонений быстрых замираний. Для длительных замираний сигнала децили отклонений берутся как функция отношения рабочей частоты к основной МПЧ для трассы, как указано в таблице 2 Рекомендации МСЭ-R P.842.

В случае шума из-за атмосферных помех децили отклонений мощности шума, возникающих вследствие изменчивости ото дня ко дню, берутся из Рекомендации МСЭ-R P.372. Изменчивость в течение часа в настоящее время не учитывается. Для шума из-за промышленных помех при отсутствии текущей информации о временных вариациях децили отклонений берутся равными децилям отклонений из Рекомендации МСЭ-R P.372, которые как раз и относятся к комбинации временной и пространственной изменчивости. Комбинированная – внутрисуточная и ото дня ко дню – децильная изменчивость галактического шума принята равной ± 2 дБ.

9 Наименьшая применимая частота (НПЧ)

НПЧ определена в Рекомендации МСЭ-R P.373. В соответствии с этим определением она рассчитывается как наименьшая частота, округленная до ближайших 0,1 МГц, при которой требуемое отношение сигнал/шум достигает значения месячной медианы отношения сигнал/шум.

10 Основная надежность линии (ОНЛ)

ОНЛ определяется в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.842. Она рассчитывается на базе отношений сигнал/шум с учетом децилей отклонений в течение часа и ото дня ко дню как для напряженности поля сигнала, так и для шумового фона. Распределение относительно медианного значения основано на определении, данном в Рекомендации МСЭ-R P.842. Для систем с цифровой модуляцией даны также выражения, учитывающие параметры разброса по времени и частотной дисперсии.
