

## 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)	E-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)	E-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
- $\Delta_F$  : 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 ( $\Delta$ ) 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

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

$\chi_{jnoon}$ : значение  $\chi_j$  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,  $AT_{\text{погл}}$

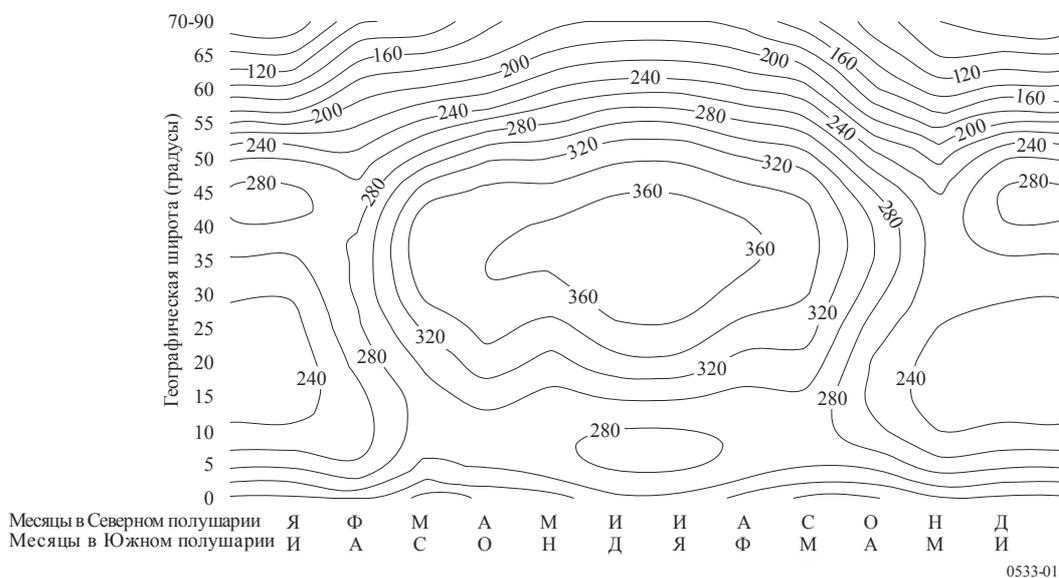
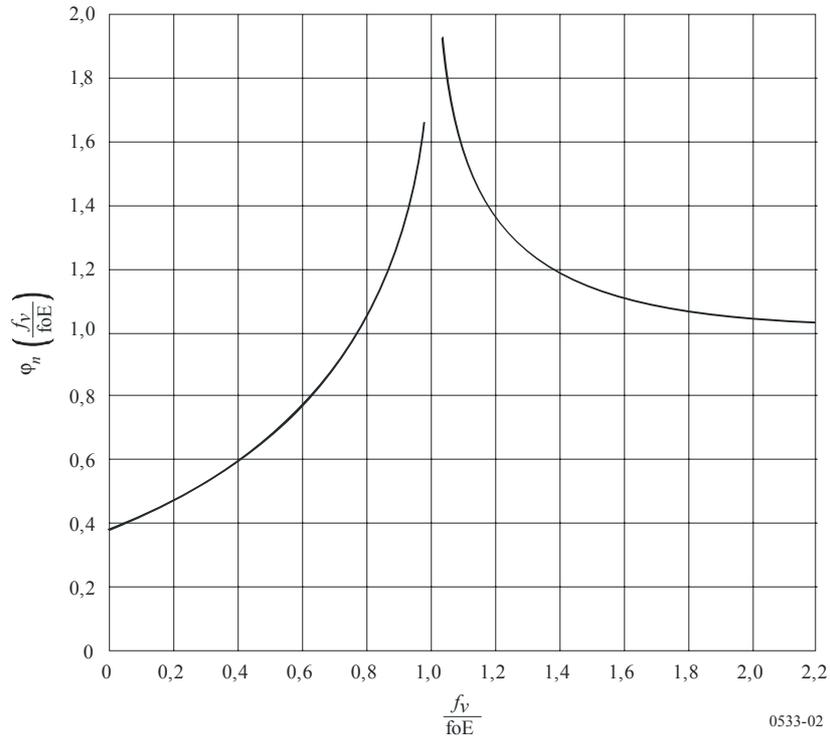


РИСУНОК 2

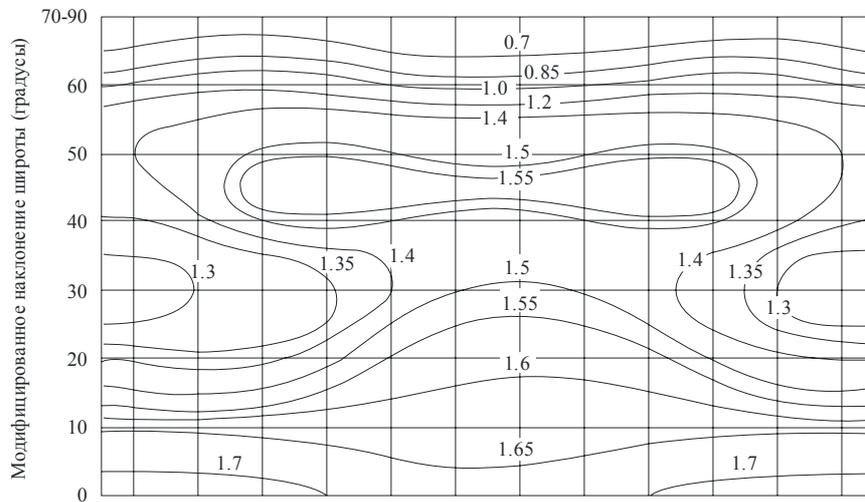
Коэффициент проникновения в поглощающий слой,  $\varphi_n \left( \frac{f_v}{f_oE} \right)$



0533-02

РИСУНОК 3

Показатель дневного поглощения,  $\rho$



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  $\pi R_0$ , 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  $\chi$  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  $60^\circ$

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  $0^\circ$  до  $8^\circ$ .

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  $\pm 2$  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.

---