

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.533-14

(08/2019)

**Метод для прогнозирования рабочих
характеристик ВЧ-линий**

Серия Р

Распространение радиоволн



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2020 г.

© ITU 2020

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.533-14

Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий*

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2015-2019)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод для прогнозирования доступных частот, уровней сигнала и показателей надежности ВЧ-систем как с аналоговой, так и с цифровой модуляцией, учитывая не только отношение сигнал/шум, но также и ожидаемые временное и частотное рассеяния канала.

Ключевые слова

Ионосфера, ВЧ, прогнозирование

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 антенн¹,

рекомендует,

1 чтобы для прогнозирования распространения пространственной волны в полосе частот от 2 до 30 МГц использовалась информация, содержащаяся в Приложении 1;

2 чтобы администрации и МСЭ-R вели деятельность по улучшению методов прогнозирования для повышения эксплуатационных возможностей и точности.

* Компьютерная программа (ITURNFPprop), связанная с процедурами прогнозирования, которые описаны в настоящей Рекомендации, доступна в разделе веб-сайта МСЭ-R, относящемся к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

¹ МСЭ располагает подробной информацией о характеристиках антенн с соответствующей компьютерной программой; для более подробного ознакомления см. Рекомендацию МСЭ-R BS.705.

Приложение 1

Содержание

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	4
Часть 1 – Доступность частот.....	4
2 Расположение контрольных точек	4
3 Основная и рабочая максимальные применимые частоты.....	4
3.1 Основные максимальные применимые частоты	4
3.2 Критическая частота слоя E (f_{oE}).....	4
3.3 Основная МПЧ слоя E	6
3.4 Характеристики слоя F2	6
3.5 Основная МПЧ слоя F2.....	6
3.5.1 Моды низшего порядка.....	6
3.5.2 Моды высшего порядка (трассы протяженностью до 9000 км).....	7
3.6 Вероятность обеспечения ионосферного распространения в течение месяца	7
3.7 Рабочая МПЧ для трассы.....	8
4 Максимальная частота экранирования слоя E (f_s).....	8
Часть 2 – Медианное значение напряженности поля пространственной волны.....	9
5 Медианное значение напряженности поля пространственной волны	9
5.1 Угол места.....	9
5.2 Трассы протяженностью до 9000 км	11
5.3 Трассы протяженностью более 7000 км.....	16
5.4 Трассы от 7000 до 9000 км	20
6 Медианная номинальная мощность на входе приемника	21
Часть 3 – Прогнозирование рабочих характеристик системы	22
7 Месячная медиана отношения сигнал/шум (S/N).....	22
8 Напряженность поля пространственной волны, номинальная мощность сигнала на входе приемника и отношения S/N для других процентов времени	22
9 Наименьшая применимая частота (НПЧ)	23

Стр.

10	Основная надежность линии (ОНЛ).....	23
10.1	Надежность систем с аналоговой модуляцией.....	23
10.2	Надежность систем с цифровой модуляцией, учитывая временное и частотное рассеяние полученного сигнала.....	23
10.3	Тропосферное рассеяние на экваторе.....	25
	Прилагаемый документ 1 к Приложению 1 – Модель тропосферного рассеяния на экваторе ВЧ сигналов	25

1 Введение

В данной процедуре прогнозирования 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 заданное усиление. Данный метод включает оценку параметров функции передачи канала для использования при прогнозировании рабочих характеристик цифровых систем. Представлены методы для оценки надежности линии. 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".

В экваториальных районах в вечерние часы (по местному времени) в результате ионосферной структурной нестабильности района, которая в данном методе в полной мере не учитывается, возможны искажения в прогнозируемых результатах.

ЧАСТЬ 1

Доступность частот

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.

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 (f_oE)

Месячное медианное значение частоты f_oE оценивается в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.1239.

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
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	M
$D > d_{max}$	–	$T + d_0 / 2, R - d_0 / 2$

б) Экранирование слоем E

Протяженность трассы, D (км)	F2-моды
$0 < D \leq 2\,000$	M
$2\,000 < D < 9\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$

в) Высоты зеркального отражения по траектории луча

Протяженность трассы, D (км)	F2-моды
$0 < D \leq d_{max}$	M
$d_{max} < D < 9\,000$	$T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2$

д) Ионосферное поглощение и соответствующая электронная гирочастота

Протяженность трассы, D (км)	Е-моды	F2-моды
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$
$d_{max} < D < 9\,000$	–	$T + 1\,000, T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2, R - 1\,000$

M : средняя точка трассы

T : точка расположения передатчика

R : точка расположения приемника

d_{max} : максимальная длина скачка F2-моды, рассчитанная в контрольной точке, расположенной в середине трассы

d_0 : длина скачка моды низшего порядка

Расстояния даны в километрах.

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:

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

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 $n_0E(D)МПЧ$ для E-моды низшего порядка, n_0 .

3.4 Характеристики слоя F2

Численные выражения месячных медианных значений 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. Данные выражения используются для определения этих величин для требуемых значений времени и контрольных точек, указанных в таблице 1а). Для преобладающих значений индекса между $R_{12} = 0$ и 160 проводится линейная интерполяция или экстраполяция (см. Рекомендацию МСЭ-R P.371). При более высокой солнечной активности R_{12} считается равным 160, 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)

Мода низшего порядка, n_0 , определяется геометрическим способом с помощью высоты зеркального отражения, h_r , в контрольной точке, расположенной в середине трассы, с использованием уравнения:

$$h_r = \frac{1\,490}{M(3000)F2} - 176 \text{ км или } 500 \text{ км, берется меньшая из величин.} \quad (2)$$

Для моды n -го порядка основная МПЧ слоя F2 вычисляется следующим образом:

$$nF2(D)МПЧ = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{max}} \right), \quad (3)$$

где:

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

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

где $Z = 1 - 2d / d_{max}$

$$d_{max} = 4\,780 + (12\,610 + 2\,140 / x^2 - 49\,720 / x^4 + 688\,900 / x^6) (1 / B - 0,303) \quad (5)$$

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

где:

- d : D/n и d_{max} выражены в километрах;
 C_{3000} : значение C_d для $d = 3000$ км;
 x : $foF2/foE$, или 2, берется большая из величин.
 Частота foE вычисляется, как описано в п. 3.2.

Основной МПЧ для трассы является $nF2(D)$ МПЧ для моды низшего порядка, n_0 . При расчете основной МПЧ величина d_{max} ограничивается 4000 км.

3.5.1.2 Трассы протяженностью более d_{max} (км)

За основную МПЧ моды n_0 $F2(D)$ МПЧ низшего порядка для трассы протяженностью D принимается наименьшее из значений $F2(d_{max})$ 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 $F2(d_{max})$ МПЧ и масштабный коэффициент расстояний, зависящий от длины скачков, соответствующих рассматриваемой моде и минимально возможному порядку моды. При расчете M_n и M_{n_0} максимальная длина скачка, d_{max} , повторно вычисляется в контрольной точке и может превышать 4000 км.

$$nF2(D)МПЧ = n_0 F2(d_{max})МПЧ \cdot M_n / M_{n_0}, \quad (7)$$

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

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

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

3.6 Вероятность обеспечения ионосферного распространения в течение месяца

В некоторых случаях может быть достаточно спрогнозировать вероятность наличия достаточной ионизации для обеспечения распространения на трассе, не учитывая характеристики системы и антенны, а также требования к рабочим характеристикам. В таких случаях необходимо установить вероятность превышения МПЧ рабочей частоты. В разделах 3.3 и 3.5 выше представлены медианные значения МПЧ(50) для распространения E и F2.

Для F2-мод отношение нижней децили, δ , МПЧ, превышенное в течение 90% дней месяца, МПЧ(90), к МПЧ(50), представлено в таблице 2 Рекомендации МСЭ-R P.1239, в виде функциональной зависимости от местного времени, широты, сезона и числа солнечных пятен.

Для случаев, когда рабочая частота, f , меньше МПЧ(50), вероятность обеспечения ионосферного распространения определяется следующим образом:

$$F_{prob} = 1,3 - \frac{0,8}{1 + \left\{ \frac{1 - [f/MUF(50)]}{1 - \delta_f} \right\}} \quad \text{либо} = 1, \text{ в зависимости от того, какое значение меньше.} \quad (9)$$

Отношение верхней децили, δ_u , МПЧ, превышенное в течение 10% дней месяца, МПЧ(10) к МПЧ(50) представлено в таблице 3 Рекомендации МСЭ-R P.1239, в виде функциональной зависимости от местного времени, широты, сезона и числа солнечных пятен.

Для случаев, когда рабочая частота, f , больше МПЧ(50), вероятность обеспечения ионосферного распространения определяется следующим образом:

$$F_{prob} = \frac{0,8}{1 + \left\{ \frac{[f/MUF(50)]^{-1}}{\delta_u^{-1}} \right\}} - 0,3 \quad \text{либо} = 0, \text{ в зависимости от того, какое значение больше.} \quad (10)$$

В случае E-мод подходящие коэффициенты для интердецильного размаха составляют 1,05 и 0,95, соответственно.

Распределение рабочей МПЧ в заданный час в течение месяца можно получить путем применения распределения, представленного в п. 3.6.

Примите к сведению, что рабочие МПЧ, превышаемые в течение 90% и в течение 10% дней месяца, определяются как оптимальная рабочая частота и максимально возможная частота, соответственно.

3.7 Рабочая МПЧ для трассы

Рабочая МПЧ для трассы является наибольшей из рабочих МПЧ для F2-мод и рабочих МПЧ для E-мод. Взаимосвязь между рабочей и основной МПЧ будет зависеть от характеристик систем и антенны, а также от географических и других условий на всей протяженности трассы, и должно определяться исходя из имеющегося практического опыта в области рабочих характеристик линии. В случае, когда такой опыт отсутствует, 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% и 90% дней, определяется путем умножения медианной рабочей МПЧ на соответствующие коэффициенты, указанные в таблицах 2 и 3 Рекомендации МСЭ-R P.1239 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 4000 км (см. таблицу 1b)). Для расчета максимальной частоты экранирования слоя 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).

$$f_s = 1,05 foE \sec i \quad (11)$$

при:

$$i = \arcsin \left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r} \right), \quad (12)$$

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 (13)).

ЧАСТЬ 2

Медианное значение напряженности поля пространственной волны**5 Медианное значение напряженности поля пространственной волны**

Прогнозируемая напряженность поля является месячным медианным значением, взятым по выборке из всех дней месяца. Процедура прогнозирования состоит из трех частей, в зависимости от протяженности трассы. Для трасс протяженностью менее 7000 км медианная напряженность поля пространственной волны прогнозируется только с использованием метода, приведенного в п. 5.2. Для трасс протяженностью более 9000 км медианная напряженность поля пространственной волны прогнозируется только с использованием метода, приведенного в п. 5.3. Для трасс протяженностью от 7000 км до 9000 км используются оба метода, а результаты интерполируются с помощью метода, описанного в п. 5.4.

5.1 Угол места

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

$$\Delta = \arctan \left(\cot \frac{d}{2 R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \operatorname{cosec} \frac{d}{2 R_0} \right), \quad (13)$$

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:

$$x = f_o F2 / f_o E \quad \text{и} \quad H = \frac{1\,490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316,$$

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 $x_r = f / f_o F2 \geq 1$, где f – частота волны:

$$h_r = h \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (14)$$

где:

$$\begin{aligned} h &= A_1 + B_1 2,4^{-a} \quad \text{для } B_1 \text{ и } a \geq 0 \\ &= A_1 + B_1 \quad \text{в противном случае} \end{aligned}$$

при

$$\begin{aligned} A_1 &= 140 + (H - 47) E_1 \\ B_1 &= 150 + (H - 17) F_1 - A_1 \\ E_1 &= -0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6 \end{aligned}$$

F_1 определяется как:

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

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

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

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

где:

$$d_s = 160 + (H + 43) G$$

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

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

б) Для $x > 3,33$ и $x_r < 1$:

$$h_r = h \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (15)$$

где:

$$\begin{aligned} h &= A_2 + B_2 b \quad \text{для } B_2 \geq 0 \\ &= A_2 + B_2 \quad \text{в противном случае} \end{aligned}$$

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:

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

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

где:

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

с) Для $x \leq 3,33$:

$$h_r = 115 + H J + U d \text{ или } 800 \text{ км, берется меньшая величина,} \quad (16)$$

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.

5.2 Трассы протяженностью до 9000 км

Для трасс протяженностью менее 7000 км медианная напряженность поля пространственной волны прогнозируется только с использованием метода, приведенного в п. 5.2. Для трасс протяженностью от 7000 км до 9000 км используются методы, приведенные в пп. 5.2 и 5.3. Далее результаты, полученные с использованием каждого метода, интерполируются с помощью метода, описанного в п. 5.4.

5.2.1 Рассматриваемые моды

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

- для зеркальных отражений от высоты:
 - для Е-мод начиная от высоты $h_r = 110$ км;
 - для F2-мод начиная от высоты h_r , определяемой из уравнения (2), где M(3000)F2 оценивается в контрольной точке, расположенной в середине 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);
- Е-моды – моды низшего порядка с длиной скачка до 2000 км, и следующие две моды высшего порядка;
- F2-моды – моды низшего порядка с длиной скачка до d_{max} (км), и следующие пять мод высшего порядка, для которых максимальная частота экранирования слоя Е, определяемая согласно п. 4, меньше рабочей частоты.

5.2.2 Определение напряженности поля

Для каждой моды w , выбранной в п. 5.2.1, медианное значение напряженности поля определяется как:

$$E_w = 136,6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (17)$$

где:

- f : частота передачи (МГц);
- P_t : мощность передатчика (дБ(1 кВт));
- G_t : усиление передающей антенны для требуемого азимута и угла места (Δ) по отношению к изотропной антенне (дБ);
- L_b : потери основной передачи по траектории луча для рассматриваемой моды, определяемые как:

$$L_b = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad (18)$$

при:

- p' : виртуальная наклонная дальность (км):

$$p' = 2R_0 \sum_1^n \left[\frac{\sin(d/2R_0)}{\cos[\Delta + (d/2R_0)]} \right]; \quad (19)$$

- L_i : потери за счет поглощения (дБ) для n -скачковой моды задаются в уравнении (20), которое рассчитывается в m точках проникновения. Точки проникновения определяются при допущении, что фиксированная высота зеркального отражения равна 300 км, а высота проникновения равна 90 км (две точки проникновения на скачок):

$$L_i = \frac{n(1 + 0,0067 R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{noon} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{jnoon})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right) \quad (20)$$

при:

$$F(\chi) = \cos p (0,881 \chi) \text{ или } 0,02; \quad \text{в зависимости от того,} \\ \text{какая величина больше,} \quad (21)$$

где:

$$f_v = f \cos i \quad (22)$$

и

i : угол падения на высоте 110 км;

m : количество точек проникновения;

f_{Lj} : значение электронной гирочастоты, определенной в j -той точке проникновения вдоль продольной составляющей магнитного поля Земли на высоте 100 км. Для магнитного склонения, I , данное значение может быть рассчитано по формуле:

$$f_L = |f_H \cdot \sin(I)|; \quad (23)$$

χ_j : солнечный зенитный угол в j -й точке проникновения 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_{jnoon} : коэффициент поглощения в полдень по местному времени для j -й точки проникновения и при $R_{12} = 0$, значения которого приведены на рисунке 1 в виде функции от географической широты и месяца;

$\varphi_n \left(\frac{f_v}{foE_j} \right)$: коэффициент проникновения в поглощающий слой в j -й точке проникновения, 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 магнитного склонения, рассчитанного на высоте 100 км (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), определенной в уравнении (1) и уравнении (3), данной моды:

$$L_m = 0. \quad (24)$$

Для E-мод при $f > f_b$:

$$L_m = 130 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^2 \text{ дБ} \quad (25)$$

или 81 дБ, в зависимости от того, какая величина меньше.

Для F2-мод при $f > f_b$:

$$L_m = 36 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^{1/2} \text{ дБ} \quad (26)$$

или 62 дБ, в зависимости от того, какая величина меньше.

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

Для n -скачковой моды:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{дБ.} \quad (27)$$

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 8,72 дБ, данное в п. 5.2.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Следует отметить, что значение L_z зависит от элементов метода прогнозирования, так что любые изменения в этих элементах будут сопровождаться пересмотром значения L_z . Значение L_z – это дополнительные потери, определенные по разнице между прогнозируемой величиной напряженности поля (для длины трассы меньше 7000 км) и данными банка данных D1.

Без учета мод, экранированных слоем E , за общую результирующую эквивалентную медианную напряженность поля пространственной волны, E_s , принимается квадратный корень из суммы квадратов напряженностей поля для N мод, где N выбирается так, чтобы охватить моды F2 и E, для которых были сделаны прогнозирования, т. е.:

$$E_s = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_w/10} \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}. \quad (28)$$

Для прогнозирования характеристик работы систем с цифровой модуляцией, для каждого из мод учитывается эквивалентная медианная напряженность поля пространственной волны, см. п. 10.2.

РИСУНОК 1

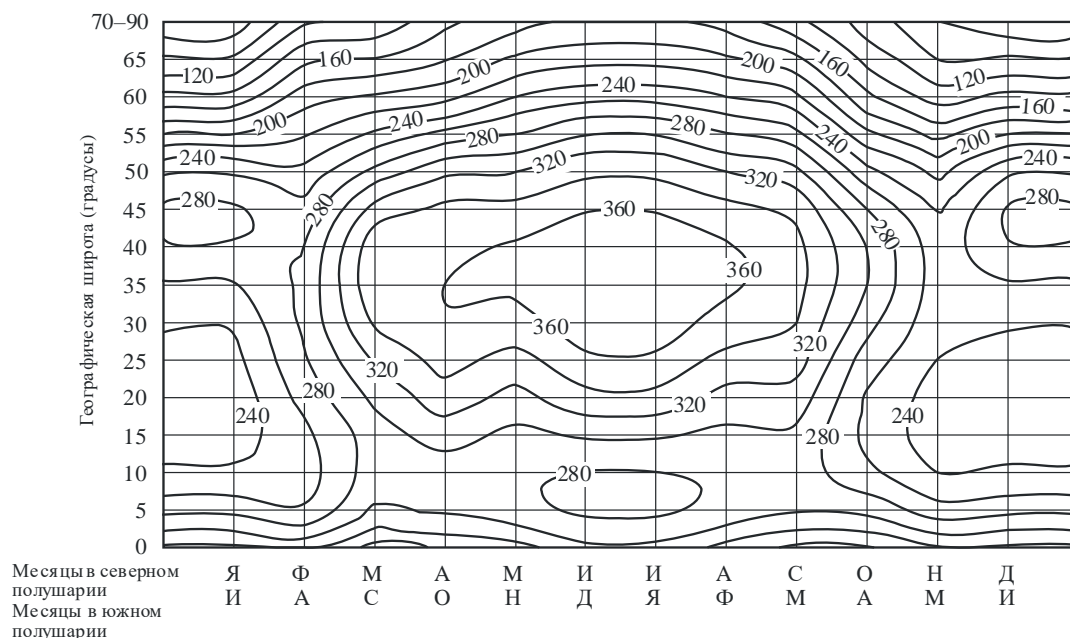
Коэффициент поглощения, $AT_{\text{погл}}$ 

РИСУНОК 2

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

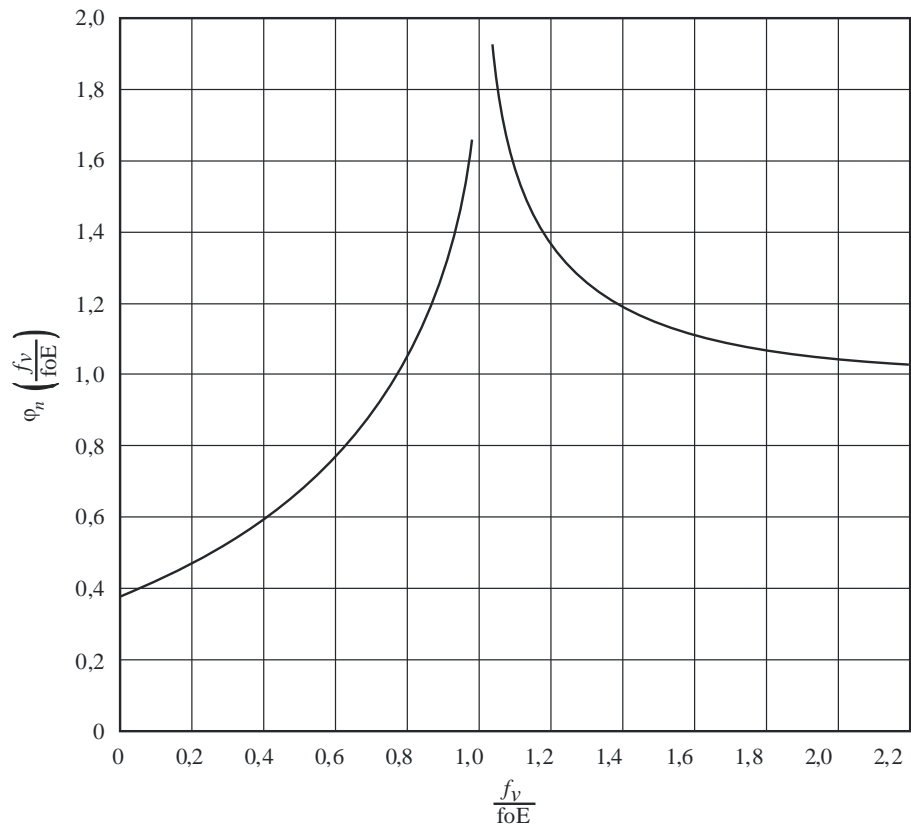
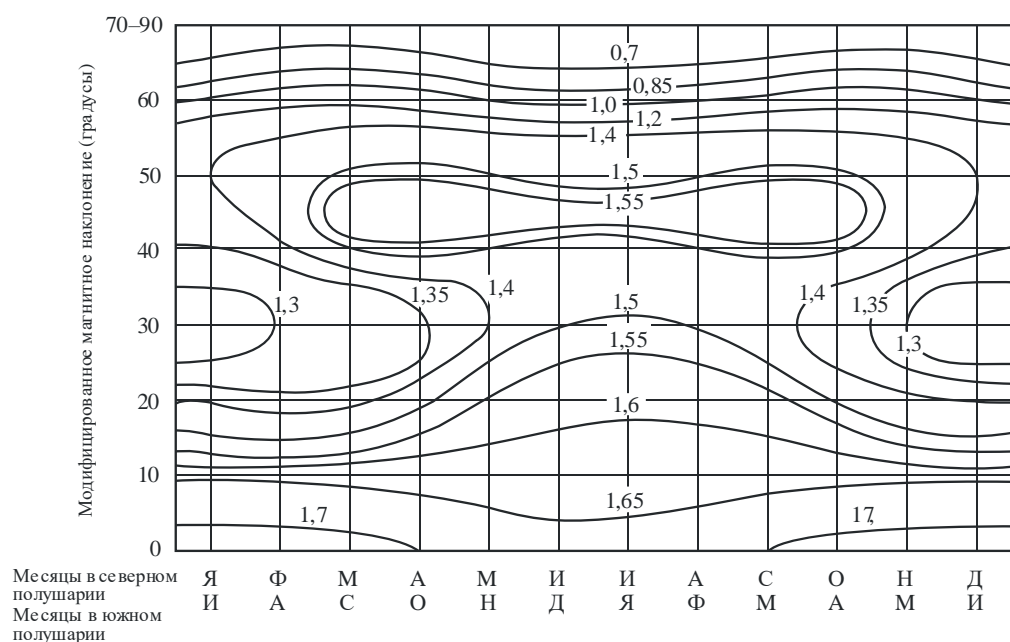


РИСУНОК 3

Показатель дневного поглощения, p 

P.0533-03

ТАБЛИЦА 2

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

G_n	а) Дальность передачи меньше или равна 2 500 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	

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

$77,5^\circ \leq G_n$	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	
b) Дальность передачи больше 2 500 км									
Местное время в средней точке трассы, t									
01 ≤ t < 04 04 ≤ t < 07 07 ≤ t < 10 10 ≤ t < 13 13 ≤ t < 16 16 ≤ t < 19 19 ≤ t < 22 22 ≤ t < 01									
G_n									
$77,5^\circ \leq G_n$	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	

5.3 Трассы протяженностью более 7000 км

Для трасс протяженностью более 9000 км медианная напряженность поля пространственной волны прогнозируется только с использованием метода, приведенного в п. 5.3. Для трасс протяженностью от 7000 км до 9000 км используются методы, приведенные в пп. 5.2 и 5.3. Далее результаты, полученные с использованием каждого метода, интерполируются с помощью метода, описанного в п. 5.4.

Для трасс протяженностью более 7000 км расчет всех возможных мод не имеет практического значения. Соответственно, применяется следующий метод, в котором НПЧ (f_L) и рабочая МПЧ (f_M) определяют диапазон частот передачи. Значения f_M и f_L являются наиболее важными параметрами в эмпирической формуле для расчета напряженности поля. Вместе с тем для трасс протяженностью от 7000 км до 9000 км результаты, полученные с использованием двух методов, интерполируются для обеспечения плавного перехода (см. п. 5.4).

Данный метод включает три основных шага:

- определение f_M ;
- определение f_L ;
- оценку напряженности поля.

5.3.1 Определение f_M

Для определения f_M прогнозы осуществляются путем деления трассы на минимальное количество (n_M) скачков равной длины (d_M), не превышающей 4000 км. Угол места рассчитывается в соответствии с уравнением (13) с учетом длины скачка и фиксированной высоты, равной 300 км. Если угол места меньше 3,0 градусов, добавляется один скачок, а длина скачка и угол места повторно рассчитываются до тех пор, пока угол места не превысит 3,0 градуса. Далее из таблицы 1а) определяются положения обеих контрольных точек. В данном случае d_0 равно d_M , поэтому контрольные точки расположены на половине длины скачка ($d_M/2$) от передатчика и приемника.

В обеих контрольных точках значения foF2, M(3000) и гирочастота (f_H) определяются в соответствии с п. 3.4. Эти значения используются для расчета F2(4000)МПЧ (f_4), F2(Zero)МПЧ (f_z), и основной МПЧ (f_{BM}) в контрольных точках:

$$f_{BM} = f_z + (f_4 - f_z)f_D \quad \text{МГц,} \quad (29)$$

где:

$$f_4 = 1,1 \cdot foF2 \cdot M(3000)F2$$

$$f_z = foF2 + \frac{f_H}{2}$$

Коэффициент уменьшения расстояния (f_D) используется для уменьшения МПЧ для 4000 км до МПЧ для фактической длины скачка. Коэффициент f_D изменяется в пределах от 0,0 (для скачка длиной 0 км) до 1,0 (для скачка длиной 4000 км).

$$f_D = \left(\left(\left(\left(\left(\left(C_6 d_M + C_5 \right) d_M + C_4 \right) d_M + C_3 \right) d_M + C_2 \right) d_M + C_1 \right) d_M + C_0 \right) d_M, \quad (30)$$

где:

$$C_6: -2,40074637494790 \cdot 10^{-24}$$

$$C_5: 25,8520201885984 \cdot 10^{-21}$$

$$C_4: -92,4986988833091 \cdot 10^{-18}$$

$$C_3: 102,342990689362 \cdot 10^{-15}$$

$$C_2: 22,0776941764705 \cdot 10^{-12}$$

$$C_1: 87,4376851991085 \cdot 10^{-9}$$

$$C_0: 29,1996868566837 \cdot 10^{-6}$$

$$d_M: \text{длина скачка (км).}$$

Значение f_{BM} определяется по отдельности для двух контрольных точек, и в качестве основной МПЧ для всей трассы берется меньшее значение.

Значение f_M определяется по отдельности для двух контрольных точек как произведение коэффициента K и основной МПЧ. В качестве рабочей МПЧ для всей трассы берется меньшее значение.

$$f_M = K \cdot f_{BM} \quad \text{МГц.} \quad (31)$$

Коэффициент K используется для расчета рабочей МПЧ f_M из основной МПЧ f_{BM} :

$$K = 1,2 + W \frac{f_{BM}}{f_{BM,noon}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{BM,noon}}{f_{BM}}} - 1 \right] + Y \left[\frac{f_{BM,min}}{f_{BM,noon}} \right]^2, \quad (32)$$

где:

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

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

W , X и Y даны в таблице 3. Азимутальный угол трассы, расположенной вдоль большого круга, определяется в центре всей трассы; этот угол используется для линейной интерполяции угла 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

5.3.2 Определение f_L

НПЧ подвержена сильному влиянию неотклоняющего поглощения. Волны диапазона ВЧ поглощаются при проникновении в слой D. Для определения НПЧ трасса делится на n_L скачков равной длины d_L (не превышающей 3000 км). Точки проникновения определяются при допущении, что фиксированная высота зеркального отражения равна 300 км, а высота проникновения равна 90 км (две точки проникновения на скачок).

Величина f_L рассчитывается из уравнения (33):

$$f_L = \left(5,3 \left[\frac{(1+0,009R_{12}) \sum_1^m \cos^{0,5}(\chi)}{\cos(i_{90}) \log_e \left(\frac{9,5 \cdot 10^6}{p} \right)} \right]^{0,5} - f_H \right) (A_w + 1) \quad \text{МГц,} \quad (33)$$

где:

m : количество точек проникновения $2n_L$;

R_{12} : число солнечных пятен, которое не насыщается при высоких значениях и может превышать 160;

χ : солнечный зенитный угол, который можно рассчитать из следующего уравнения:

$$\cos(\chi) = \sin(\varphi_m) \sin(\delta) + \cos(\varphi_m) \cos(\delta) \cos(\eta) \quad (34)$$

где:

δ : солнечное склонение (радианы);

φ_m : географическая широта m -й точки проникновения (радианы);

η : угол солнечного часа (радианы).

Значение солнечного склонения, δ , можно аппроксимировать по широте подсолнечной точки для середины месяца (s_x), взятой из таблицы 4:

ТАБЛИЦА 4

Широта подсолнечной точки для середины месяца

Месяц	Я	Ф	М	А	М	И	И	А	С	О	Н	Д
s_x (градусы)	-21,2	-12,7	-2,2	9,7	18,8	23,3	21,6	14,1	3,1	-8,4	-18,4	-23,3

Значение угла солнечного часа можно аппроксимировать по формуле:

$$\eta \cong \left(\frac{UTC}{12} - 1\right) \cdot \pi + y_m, \quad (35)$$

где:

UTC : универсальное время (часы);

y_m : географическая долгота m -й точки проникновения (радианы).

В итоге, χ определяется для каждого пересечения трассой луча высоты в 90 км. При $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0.5}\chi$ принимается равным нулю

i_{90} : угол падения на высоте 90 км;

p' : длина наклонной трассы;

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	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,15	0,30
Южное	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,30	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00

Вначале определяется значение f_L для 24 часов из уравнения (33) или ночная НПЧ. Значение ночной НПЧ (f_{LN}) рассчитывается по формуле:

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}}. \quad (36)$$

Для каждого часа в качестве f_L берется большее из значений, полученных из уравнений (32) и (35). Следовательно, минимальным за 24 часа значением f_L является f_{LN} . Далее рассчитывается уменьшение частоты от дневной НПЧ до ночной НПЧ. Это обусловлено тем, что поглощение не изменяется в точном соответствии с солнечным зенитным углом, а имеется задержка в районе заката. Для определения перехода НПЧ от дневной к ночной необходимо выполнить следующую процедуру.

Час перехода дневной НПЧ к ночной НПЧ (t_r) определяется как час, в котором текущее значение f_L меньше $2 \cdot f_{LN}$, а значение f_L для предыдущего часа больше $2 \cdot f_{LN}$. Если t_r существует, то f_L должна быть повторно рассчитана для t_r и для следующих трех часов. Если t_r не существует, то определение f_L для 24 часов завершается.

Если t_r существует, то f_L для данного часа и для следующих трех часов должна быть повторно рассчитана следующим образом. Для часа (t_r) f_L рассчитывается по формуле:

$$f_L(t_r) = e^{-0,23} \cdot f_L(t_r - 1) \cdot (dt \cdot (1 - e^{-0,23}) + e^{-0,23}), \quad (37)$$

где:

$$dt = \frac{2 \cdot f_{LN} - f_L(t_r)}{f_L(t_r - 1) - f_L(t_r)}.$$

Для следующих трех часов ($n = 1, 2$ и 3) f_L рассчитывается по формуле:

$$f_L(t_r + n) = f_L(t_r + n - 1) \cdot e^{-0,23}. \quad (38)$$

Рассчитанные заново значения f_L заменяют собой первоначальные значения f_L только в том случае, если они больше. После того, как все значения f_L за 24-часовой период рассчитаны, выбирается значение f_L для текущего часа и расчет f_L завершается.

5.3.3 Оценка напряженности поля E_{il}

Результирующая медианная напряженность поля E_{il} получается как:

$$E_{il} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] \cdot$$

$$-30,0 + P_t + G_{il} + G_{ap} - L_y \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (39)$$

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

$$E_0 = 139,6 - 20 \log p' \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (40)$$

где:

- p' : вычисляется с помощью уравнений (19) и (13) 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:

$$G_{ap} = 10 \log \left[\frac{D}{R_0 \left| \sin\left(\frac{D}{R_0}\right) \right|} \right] \quad \text{дБ}. \quad (41)$$

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 $-0,9$ дБ;

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Необходимо отметить, что значение L_y зависит от элементов метода прогнозирования, так что любые изменения в этих элементах должны сопровождаться пересмотром значения L_y ;

- f_H : среднее из значений электронной гирочастоты, определенной в обеих контрольных точках;
- f_M : МПЧ (см. п. 5.3.1);
- f_L : НПЧ (см. п. 5.3.2).

5.4 Трассы от 7000 до 9000 км

В этом диапазоне расстояний медианное значение напряженности поля пространственной волны, E_{ii} , определяется с помощью интерполяции между значениями E_s и E_l . E_s – квадратный корень из суммы квадратов напряженностей поля, рассчитывается с помощью уравнения (28), а E_l относится к сложной моде и определяется с помощью уравнения (39).

$$E_i = 100 \log_{10} X_i \quad \text{дБ(1 мкВ/м)}, \quad (42)$$

При этом

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

где: $X_s = 10^{0,01E_s}$

и $X_l = 10^{0,01E_l}$.

Основная МПЧ для трассы равна наименьшему из значений основной 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. 5.2, для данной моды w с напряженностью поля пространственной волны, E_w (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:

$$P_{rw} = E_w + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107,2 \quad \text{дБВт}. \quad (43)$$

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:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{дБВт}. \quad (44)$$

В диапазоне расстояний выше 9000 км, для которых напряженность поля рассчитывается с помощью метода, изложенного в п. 5.3, за напряженность поля E_l принимается сумма напряженностей поля сложных мод. В этом случае P_r определяется с помощью уравнения (43), 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 (42) с использованием мощностей, соответствующих E_s и E_l .

ЧАСТЬ 3

Прогнозирование рабочих характеристик системы**7 Месячная медиана отношения сигнал/шум (S/N)**

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. F_a (дБ($k T b$)) – результирующий коэффициент внешнего шума на частоте f (МГц), где k – постоянная Больцмана, а T – эталонная температура 288 К. В принципе при использовании некоторых других применяемых на практике антенн результирующий коэффициент шума может отличаться от величины F_a . Тем не менее, поскольку полные данные измерений шумов для различных антенн отсутствуют, целесообразно предположить, что в качестве первого приближения применяется величина F_a , взятая из Рекомендации МСЭ-R P.372. Таким образом, месячное медианное значение отношения сигнал/шум (S/N) (дБ), получаемое для полосы частот b (Гц), составляет:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204, \quad (45)$$

где:

P_r : медианная номинальная мощность сигнала, определенная согласно п. 6, выше.

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

Напряженность поля пространственной волны, номинальная мощность сигнала на входе приемника и отношение сигнал/шум могут быть определены для заданных процентов времени на основе отклонений сигналов и шума в течение часа и изо дня в день. При отсутствии других данных допуски на замирания сигнала могут соответствовать допускам, принятым ВАРК ВЧРВ-87, с краткосрочным отклонением верхней децили в 5 дБ и отклонением нижней децили в 8 дБ. Для длительных замираний сигнала отклонения децили 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 также берутся равными децилям отклонений из Рекомендации МСЭ-R P.372, хотя последние строго относятся к комбинации временной и пространственной изменчивости.

Комбинированная – внутрисуточная и изо дня в день – децильная изменчивость галактического шума принята равной ± 2 дБ.

Отношение сигнал/шум, превышаемое в течение 90% времени, определяется как:

$$S/N_{90} = S/N_{50} - (S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + N_{dd}^2)^{1/2}, \quad (46)$$

где:

S_{wh} : отклонение нижней децили полезного сигнала от ежечасного медианного значения напряженности поля, возникающее в результате изменений в течение часа (дБ);

S_{dd} : отклонение нижней децили полезного сигнала от ежемесячного медианного значения напряженности поля, возникающее в результате изменений изо дня в день (дБ);

N_{dd} : отклонение верхней децили шумового фона от ежемесячного медианного значения напряженности поля, возникающее в результате внутрисуточных изменений изо дня в день (дБ).

Для других процентов времени отклонения могут быть получены из информации, касающейся логнормального распределения, представленной в Рекомендации МСЭ-R P.1057.

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)

10.1 Надежность систем с аналоговой модуляцией

ОНЛ определяется в Рекомендации МСЭ-R P.842, где надежность описывается как вероятность (приведенная в этой Рекомендации в виде процента) того, что соблюдены указанные критерии рабочих характеристик (т. е. указанное отношение сигнал/шум). Для аналоговых систем она рассчитывается на основе отношений сигнал/шум с учетом отклонений децилей в течение часа и изо дня в день как для напряженности поля сигнала, так и для шумового фона. Распределение относительно медианного значения соответствует описанному в п. 8. Процедура описана в Рекомендации МСЭ-R P.842.

10.2 Надежность систем с цифровой модуляцией, учитывая временное и частотное рассеяние полученного сигнала

Для систем модуляции, устойчивых по отношению к ожидаемому временному и частотному рассеянию, надежность представляет собой процент времени, в течение которого ожидается наличие требуемого отношения сигнал/шум, рассчитанный с использованием процедуры, описанной в п. 8.

В целом, для систем с цифровой модуляцией следует учитывать временное и частотное рассеяние полученного сигнала.

10.2.1 Параметры системы

Используется упрощенное обозначение функции передачи канала. Для метода модуляции, о котором идет речь, оценка надежности основывается на четырех параметрах:

- *Временное окно, T_w* : Временной интервал, в рамках которого моды сигнала будут способствовать улучшению рабочих характеристик системы, и за пределами которого рабочие характеристики будут ухудшаться.
- *Частотное окно, F_w* : Частотный интервал, в рамках которого моды сигнала будут способствовать улучшению рабочих характеристик системы, и за пределами которого рабочие характеристики будут ухудшаться.
- *Требуемое отношение сигнал/шум, S/N_r* : Отношение суммы мощности ежечасного медианного значения мод сигнала к шуму, которое требуется для достижения определенных рабочих характеристик для условий, когда все моды сигнала находятся в пределах временных и частотных окон, T_w и F_w .
- *Амплитудный коэффициент, A* : Для каждой распространяющейся моды будет спрогнозировано ежечасное медианное значение напряженности поля, учитывая мощность передатчика и усиление антенны для данной моды. Будет определена самая сильная мода в этот час, и амплитудный коэффициент, A , представляет собой отношение напряженности доминантной моды к субдоминантной моде, которое затронет рабочие характеристики системы только в том случае, если будет сопровождаться временной задержкой, выходящей за пределы значения T_w либо частотным рассеянием выше значения F_w .

10.2.2 Временная задержка

Временная задержка отдельной моды определяется как:

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{мс,} \quad (47)$$

где:

- p' : виртуальная наклонная дальность (км), задаваемая уравнениями (13) и (19), и высотой отражения, h_r , определенной в разделе 5.1;
- c : скорость света (км/с) в свободном пространстве.

Дифференциальная временная задержка между модами может быть определена исходя из временной задержки каждой моды.

10.2.3 Процедура прогнозирования надежности

Для прогнозирования надежности используется следующая процедура:

Для трасс, протяженностью до 9000 км:

Шаг 1: Напряженность доминантной моды, E_w , определяется с использованием методов, представленных в пп. 5.2 и 5.3.

Шаг 2: Определяются все другие активные моды с напряженностью, превышающей ($E_w - A$ (дБ)).

Шаг 3: Из мод, определенных в шагах 1 или 2, выделяется первая приходящая мода, и определяются все моды, в рамках временного окна, T_w , измеренные исходя из первой приходящей моды.

Шаг 4: Для трасс протяженностью до 7000 км, суммирование мощности мод, приходящих в рамках окна, либо для трасс протяженностью от 7000 до 9000 км, используется процедура интерполяции, представленная в п. 5.4, и основная надежность линии, ОНЛ, устанавливается с использованием процедуры в п. 10.1. В указанном пункте применяется процедура, которая содержится в таблице 1 Рекомендации МСЭ-R P.842. Требуемое отношение S/N_r , используется в шаге 10 данной таблицы.

Шаг 5: Если в какой либо из активных мод, определенных в шаге 2, выше, имеются дифференцированные временные задержки, выходящие за пределы временного окна, T_w , снижение надежности из-за таких мод определяется с применением метода, аналогичного методу для расчета полной надежности линии, описанному в таблице 3 Рекомендации МСЭ-R P.842, путем замены соответствующих защитных отношений шага 3 таблицы 3 отношением A , и без учета изменений изо дня в день путем установления на 0 дБ всех параметров в шагах 5 и 8. Результатом выполнения шага 14 Рекомендации МСЭ-R P.842 является надежность цифровой линии, DCR, в отсутствие рассеяния. Соответственно, снижение надежности в результате многомодовых помех, MIR , является отношением значений, полученных на шаге 14 и шаге 13 таблицы 3 Рекомендации МСЭ-R P.842, т. е. $DCR = ((ОНЛ) \times (MIR)/100)\%$.

Примите к сведению, что возможно понадобится пересмотреть значения отклонений децибел, содержащихся в шагах 3 и 9 таблицы 3, поскольку вероятность распространения может различаться при рассмотрении отдельных мод.

Шаг 6: За пределами районов, где ожидается экваториальное рассеяние, Предполагается, что сдвиг частоты из-за массового смещения отражающих слоев составит порядка 1 Гц, и данный метод предполагает, что такие сдвиги частоты незначительны.

Для трасс, протяженностью более 9000 км:

Напряженность сложного сигнала соответствует значению, полученному в п. 5.3 предполагается, что формирующие данный сложный сигнал моды находятся в пределах разброса временной задержки 3 мс на 7000 км, линейно повышаясь до 5 мс на 20 000 км. Если временное окно, определенное для данной системы, меньше данного разброса временной задержки, предполагается, что система не удовлетворит требованиям к ее рабочим характеристикам.

10.3 Тропосферное рассеяние на экваторе

Помимо процедур, указанных в пункте 10.2, выше, следует осуществить следующие шаги для расчета рассеяния из-за тропосферного рассеяния, применяя модель для тропосферного рассеяния на экваторе, представленную в Прилагаемом документе 1.

Шаг 7: Возможное временное рассеяние из-за тропосферного рассеяния приводится в пункте 1 Прилагаемого документа 1. Эта временная функция рассеяния все чаще применяется к каждой моде в регионе F в пределах временного окна, а напряженность тропосферного рассеяния, $p_{Tspread}$, находится на крае временного окна, T_w .

Шаг 8: Возможное частотное рассеяние из-за тропосферного рассеяния приводится в пункте 2 Прилагаемого документа 1. Эта частотная функция рассеяния, $p_{Fspread}$, применяется к доминантной моде в регионе F, а напряженность частотного рассеяния находится симметрично на краях частотного окна, F_w .

Шаг 9: Если значение любого $p_{Tspread}$ и/или $p_{Fspread}$ на краях окон превышает отношение $(E_w - A)$, то вероятность появления тропосферного рассеяния должна определяться в контрольных точках для мод в регионе F, как это указано в пункте 3 Прилагаемого документа 1. Если для моды распространения рассматривается более одной контрольной точки, то следует брать наибольшую вероятность.

Шаг 10: Надежность цифровой линии при наличии рассеяния определяется функцией:

$$DCR = ((ОНЛ) \times (MIR) \times (1 - prob_{occ})/100)\%, \quad (48)$$

где вероятность возникновения тропосферного рассеяния, $prob_{occ}$, определена в Прилагаемом документе 1.

Прилагаемый документ 1 к Приложению 1

Модель тропосферного рассеяния на экваторе ВЧ сигналов

1 Модель временного тропосферного рассеяния для имеющейся мощности от компонента тропосферного рассеяния, $p_{Tspread}$, определяется полунормальным распределением:

$$p_{Tspread} = 0,056 p_m e^{\frac{-(\tau - \tau_m)^2}{2T_{spread}^2}}$$

для τ большей, чем τ_m ,

где:

- p_m : номинальная принимаемая мощность от зеркального отражения моды;
- τ : рассматриваемая временная задержка;
- τ_m : временная задержка отражающего мода;
- T_{spread} : стандартное отклонение временного рассеяния в данном полураспределении, взятое равным 1 мс.

2 При частотном рассеянии тропосферное рассеяние располагается симметрично вокруг частоты передачи и имеет форму изменения такую же, как и в случае временного рассеяния:

$$p_{Fspread} = 0,056 p_m e^{\frac{-(f - f_m)^2}{2F_{spread}^2}},$$

где:

- f : рассматриваемая частота;
 f_m : центр частоты передачи;
 F_{spread} : стандартное отклонение частотного рассеяния, взятое равным 3 Гц.

3 Вероятность возникновения тропосферного рассеяния в какой-либо день месяца $prob_{occ}$ определяется уравнением:

$$prob_{occ} = F_{\lambda_d} F_{T_l} F_R F_S,$$

где:

$$F_{\lambda_d} = 1 \quad \text{для } 0^\circ < |\lambda_d| < 15^\circ$$

$$F_{\lambda_d} = \left(\frac{25 - |\lambda_d|}{10} \right)^2 \left(\frac{|\lambda_d| - 10}{5} \right) \quad \text{для } 15^\circ < |\lambda_d| < 25^\circ$$

$$F_{\lambda_d} = 0 \quad \text{для } 25^\circ < |\lambda_d| < 90^\circ,$$

где λ_d – магнитное наклонение;

$$F_{T_l} = 1 \quad \text{для } 00 < T_l < 03$$

$$F_{T_l} = \left(\frac{7 - T_l}{4} \right)^2 \left(\frac{T_l - 1}{2} \right) \quad \text{для } 03 < T_l < 07$$

$$F_{T_l} = 0 \quad \text{для } 07 < T_l < 19$$

$$F_{T_l} = (T_l - 19)^2 (41 - 2T_l) \quad \text{для } 19 < T_l < 20$$

$$F_{T_l} = 1 \quad \text{для } 20 < T_l < 24,$$

где:

- T_l : местное время в контрольной точке (ч);
 $F_R = (0,1 + 0,008R_{12})$ либо 1, в зависимости от того, какая величина меньше, и
 R_{12} – число солнечных пятен

и

$$F_S = 0,55 + 0,45 \sin(60^\circ(m - 1,5)),$$

где m – номер месяца.

4 Желательно было бы, чтобы процедура прогнозирования определяла уровни элементов, рассеянных в тропосфере по времени и по частоте в рамках временных и частотных окон, предусмотренных для используемой системы модуляции. Если отношение большего из данных уровней к отражающему компоненту доминантной моды находится в установленных для межсимвольных помех в системе пределах, предполагается наличие вероятности наступления тропосферного рассеяния в системе.