

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R Р.1812-2**  
(02/2012)

**Метод прогнозирования распространения  
сигнала на конкретной трассе  
для наземных служб "из пункта  
в зону" в диапазонах УВЧ и ОВЧ**

**Серия Р**  
**Распространение радиоволн**



## 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 Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. 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	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация  
Женева, 2012 г.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1812-2

**Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазонах УВЧ и ОВЧ**

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(2007-2009-2012)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации описывается метод прогнозирования распространения сигнала, пригодный для наземных служб связи "из пункта в зону" в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц. Метод прогнозирует среднее значение уровней сигнала при многолучевом распространении, превышаемое в течение заданного процента времени  $p\%$ , лежащего в пределах  $1\% \leq p \leq 50\%$ , и для данного процента мест размещения  $p_L$ , лежащего в пределах  $1\% \leq p_L \leq 99\%$ . Данный метод предусматривает подробный анализ трассы на основе профиля земной поверхности.

Этот метод пригоден для прогнозирования работы систем радиосвязи, использующих наземные сети с длиной трасс от 0,25 км до примерно 3000 км, когда оба терминала находятся на высоте не более 3 км над уровнем земли. Он не пригоден для прогнозирования распространения радиосигналов на линиях воздух-земля или космос-Земля.

Настоящая Рекомендация дополняет Рекомендацию МСЭ-R P.1546.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что для инженеров необходимо разработать рекомендации по планированию наземных служб радиосвязи в полосах частот УВЧ и ОВЧ;
- b) что для станций, работающих на том же или на смежных частотных каналах, одним из важнейших вопросов является определение минимального географического разнеса, обеспечивающего отсутствие неприемлемых помех из-за дальнего наземного распространения радиоволн,

*отмечая,*

- a) что в Рекомендации МСЭ-R P.528 содержится руководство по прогнозированию потерь на трассе связи "пункта с зоной" для воздушной подвижной службы для диапазона частот от 125 МГц до 30 ГГц и расстояний до 1800 км;
- b) что в Рекомендации МСЭ-R P.452 содержится руководство по детальной оценке микроволновых помех между станциями на поверхности Земли на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц;
- c) что в Рекомендации МСЭ-R P.617 содержится руководство по прогнозированию потерь на трассе связи "пункта с пунктом" для загоризонтных радиорелейных систем для диапазона частот выше 30 МГц и для расстояний в диапазоне от 100 км до 1000 км;
- d) что в Рекомендации МСЭ-R P.1411 содержится руководство по прогнозированию для наружных систем ближней радиосвязи (до 1 км);
- e) что в Рекомендации МСЭ-R P.530 содержится руководство по прогнозированию потерь на трассе распространения "из пункта в пункт" для наземных систем прямой видимости;

f) что в Рекомендации МСЭ-R P.1546 содержится руководство по прогнозированию напряженности поля для систем "из пункта в зону" в полосах частот УВЧ и ОВЧ, основанное главным образом на статистическом анализе экспериментальных данных,

*рекомендует,*

1 что для детальной оценки уровней сигнала этих служб следует использовать процедуру, описанную в Приложении 1.

## Приложение 1

### 1 Введение

Метод прогнозирования параметров распространения радиоволн, описанный в настоящем Приложении, рекомендуется для детальной оценки уровней сигнала и пригоден для линий связи с наземными системами радиосвязи "из пункта в зону" в полосах частот УВЧ и ОВЧ. Он предсказывает уровень сигнала (т. е. напряженность электрического поля), превышаемый в течение данного процента времени  $p\%$  среднего года в пределах  $1\% \leq p \leq 50\%$  и для  $p_L\%$  мест размещения в пределах  $1\% \leq p_L \leq 99\%$ . Следовательно, этот метод может использоваться для прогнозирования как области обслуживания, так и готовности для желаемого уровня сигнала (площади покрытия), а также для прогнозирования уменьшения области обслуживания и готовности из-за мешающих сигналов, действующих в совпадающем и/или смежных каналах (помех).

Модель распространения для этого метода симметрична в том смысле, что она одинаковым образом учитывает оба конечных радиоустройства. С точки зрения модели не имеет значения, какой терминал ведет передачу, а какой является приемником. Однако для удобства в описании модели используются термины "передатчик" и "приемник", обозначающие станции в начале и конце трассы распространения радиосигнала, соответственно.

Этот метод сначала описывает расчет основных потерь передачи (дБ), которые не превышаются в течение  $p\%$  времени для среднего числа местоположений. Затем выполняется статистическое описание элементов, определяемых изменением местоположения, и потерь на проникновение в здания для мест размещения приемников. Затем выполняется процедура приведения к напряженности электрического поля дБ(мкВ/м) для эффективно излучаемой мощности = 1 кВт.

Этот метод предназначен главным образом для систем, использующих антенны с малым усилением. Однако на изменение точности при использовании антенн с высоким коэффициентом усиления влияет только один элемент из всего метода – тропосферное рассеяние, и изменение прогнозов достаточно мало. Например, даже если на обоих концах линии будут использоваться антенны с усилением 40 дБи, завышение оценки сигналов тропосферного рассеяния составит всего лишь около 1 дБ.

Этот метод пригоден для прогнозирования распространения сигналов систем радиосвязи, в которых используются наземные линии связи длиной от 0,25 км до примерно 3000 км, когда оба терминала располагаются не выше примерно 3 км над уровнем земли. Он не пригоден для прогнозирования распространения радиосигналов на линиях воздух-земля или космос-Земля.

Метод прогнозирования параметров распространения радиоволн в настоящем Приложении определяется конкретной трассой. Прогнозирования для систем "из пункта в зону", выполняемые с использованием этого метода, состоят из множества прогнозов для линий "из пункта в пункт" (т. е. точка передачи – точка приема), которые равномерно распределены в рассматриваемой области обслуживания. Количество точек должно быть достаточно большим, для того чтобы полученные таким образом прогнозируемые значения основных потерь передачи или напряженности поля были бы разумными оценками средних значений для конкретных мест и соответствующих величин для элементарных площадей, которые они описывают.

Вследствие этого предполагается, что пользователи настоящей Рекомендации имеют возможность подробно описать профили земной поверхности (т. е. высоты над средним уровнем моря) как функции от расстояния на траекториях дуги большого круга (т. е. геофизических линиях) между

терминалами для множества различных мест размещения терминалов (точек приема). Для большинства практических применений этого метода для прогнозирования областей покрытия "из пункта в зону" и помех такое предположение предусматривает наличие базы данных цифровых карт с высотами местности, с указанными для соответствующих геодезических данных координатами широты и долготы, из которой можно автоматически получать профили земной поверхности. Если этих подробных профилей нет, то для прогнозирования следует использовать Рекомендацию МСЭ-R P.1546.

С учетом изложенного выше элементы модели, определяемые изменением местоположения, и потерями, в настоящей Рекомендации описываются статистическими параметрами логнормального распределения для соответствующих точек размещения приемников. Хотя, как может показаться, такое статистическое описание задачи распространения "из пункта в зону" делает общую модель асимметричной (т. е. необратимой), пользователи настоящей Рекомендации должны помнить, что изменение местоположения может в принципе применяться к обоим концам трассы (т. е. к обоим терминалам) или даже к обоим сразу (т. е. и к передатчику, и к приемнику). Однако корректировка изменения местоположения имеет смысл только в ситуациях, когда точное место расположения данного терминала неизвестно, и возможные места размещения этого терминала требуется описать статистически. Маловероятно, чтобы было много случаев, когда вышесказанное было применимо к точке размещения передатчика. Если места размещения обоих терминалов точно известны и эта процедура используется в режиме "из пункта в пункт", то настоящая Рекомендация применима только со значением  $p_L = 50\%$ .

Аналогичное заявление справедливо и для потерь на проникновение в здания. Аргумент здесь несколько сложнее, чем для потери из-за изменения местоположения, вследствие того факта, что коэффициент коррекции средних потерь на проникновение не равен нулю. На стороне передатчика пользователи должны также добавить потери на проникновение в здания к базовым потерям передачи, но пользователи должны также знать, что если передатчик расположен не в "среднем" местоположении, то средние значения потерь, приведенные в таблице 6, могут вводить в заблуждение.

## 2 Элементы модели прогнозирования параметров распространения радиоволн

Данный метод прогнозирования учитывает следующие элементы модели:

- *прямая видимость (LoS);*
- *дифракция (учитывает случаи гладкой Земли, пересеченной местности и случаи закрытых трасс);*
- *тропосферное рассеяние;*
- *аномальное распространение (атмосферные волноводы и отражение/преломление в слоях);*
- *изменение усиления в зависимости от высоты препятствий;*
- *изменение местоположения;*
- *потери на проникновение в здания.*

## 3 Исходные параметры

### 3.1 Базовые исходные данные

В таблице 1 описаны базовые исходные данные, которые определяют точки размещения терминалов, частоту и процент времени и мест размещения, для которого требуется прогнозирование.

Широта и долгота двух станций указывается как базовые исходные данные на основании того, что они необходимы для определения профиля земной поверхности. Радиометеорологические параметры должны быть представлены для одного места трассы распространения, и для дальних трасс в качестве такой точки должна быть выбрана середина трассы. Если выполняется прогнозирование области покрытия передатчика, то вполне разумно получить радиометеорологические параметры для точки размещения передатчика.

ТАБЛИЦА 1

## Базовые исходные данные

Параметр	Единицы измерения	Минимум	Максимум	Описание
$f$	ГГц	0,03	3,0	Частота (ГГц)
$p$	%	1,0	50,0	Процент времени среднего года, в течение которого превышает рассчитанный уровень сигнала
$p_L$	%	1	99	Процент мест размещения, в которых превышает рассчитанный уровень сигнала
$\varphi_t, \varphi_r$	градусы	-80	+80	Широта передатчика, приемника
$\psi_t, \psi_r$	градусы	-180,0	180,0	Долгота передатчика, приемника (положительные значения = на восток от Гринвича)
$h_{tg}, h_{rg}$	м	1	3 000	Высота центра антенны над уровнем земли

## 3.2 Профиль земной поверхности

Для применения данного метода прогнозирования параметров распространения требуется профиль земной поверхности трассы передачи радиосигнала. В принципе, он состоит из трех массивов, каждый из которых имеет одинаковое число  $n$  следующих значений:

$$d_i: \text{расстояние от передатчика до } i\text{-й точки профиля (км);} \quad (1a)$$

$$h_i: \text{высота } i\text{-й точки профиля над уровнем моря (м);} \quad (1b)$$

$$g_i = h_i + \text{типовая высота препятствия в } i\text{-й точке профиля (м),} \quad (1c)$$

где:

$$i: 1, 2, 3 \dots n = \text{номер точки профиля;}$$

$$n: \text{количество точек профиля.}$$

Отметим, что первой точкой профиля является передатчик. Следовательно,  $d_1 = 0$ , а  $h_1$  равна высоте земной поверхности в точке размещения передатчика (в метрах над уровнем моря). Аналогично,  $n$ -й точкой профиля является приемник. Следовательно,  $d_n =$  протяженности трассы в км, а  $h_n$  равна высоте земной поверхности в точке размещения приемника (в метрах над уровнем моря).

Конкретное расстояние между точками профиля не задано. Если предположить, что профили взяты из цифровой модели рельефа местности, подходящее распределение точек профиля, как правило, будет аналогично распределению точек из исходных данных. Не обязательно, чтобы точки профиля были расположены на одинаковом расстоянии, но желательно, чтобы они были расположены на одинаковом расстоянии для всего профиля.

Желательно иметь информацию о наземном покрове (препятствиях) вдоль трассы. Категории препятствий удобно хранить в дополнительном массиве из  $n$  точек для согласования с данными о высотах профиля.

"Типовая высота препятствия, упоминаемая в уравнении (1с), относится к наземному покрову, такому как растительность и здания. Добавление к профилю высот препятствий базируется на предположении, что высоты  $h_i$  представляют собой голую поверхность Земли. Если трасса распространения радиоволн пролегает через лес или городские постройки, где имеют место дифракция или побочные пути распространения, в общем случае эффективная высота профиля будет выше, потому что радиосигнал будет проходить через препятствия. Таким образом, более точное представление о профиле можно получить путем добавления высот для учета препятствий.

Добавляются не обязательно физические высоты, такие как высота крыш в случае зданий. Там, где существуют промежутки между препятствиями с точки зрения радиоволн, некоторое количество энергии может перемещаться между препятствиями, а не над ними. В этой ситуации наличие препятствий, как ожидается, увеличит дифракционные потери, но не настолько, как повышение профиля до физической высоты препятствий.

Особенно это относится к высотным городским районам. Такие категории, как "плотная городская застройка" или "высотная городская застройка", как правило, ассоциируются со зданиями высотой 30 метров и выше. Но в некоторых высотных районах между высокими зданиями имеются большие пространства, и это дает возможность распространения с низкими потерями вокруг них по сравнению с распространением над крышами.

С другой стороны, даже в районах, которые классифицируются как открытая или сельская местность, земная поверхность редко бывает совершенно голой, т. е. без наличия на ней каких-либо объектов, которые могут способствовать увеличению потерь при распространении. Таким образом, во многих случаях могут быть уместны малые значения  $R$ , а не нуль.

Информация о препятствиях отдельно используется для оценки потерь из-за препятствий на стороне терминала, как это описано в § 4.7. Концепция типовой высоты препятствия,  $R$ , сохраняется, но она может быть истолкована по-разному. В частности, для городских условий задача состоит в определении высоты, на которой сигнал должен распространяться на терминал, расположенный ниже высоты препятствия. В таких случаях необходимо еще раз выполнить оценку степени (на статистической основе), в которой сигнал проходит вокруг, а не над препятствиями. В случае таких категорий, как открытая местность, сельская местность и водная поверхность,  $R$ , по существу, является коэффициентом масштабирования для уравнения (54b).

Таким образом, типовая высота препятствия  $R$  зависит не только от физической высоты типичных препятствий, но и от горизонтального разнесения объектов и промежутков между ними. Не существует общепринятого стандарта относительно представления такой категории препятствий, как "городские условия", в физических единицах в разных странах. В таблице 2 предлагаются значения по умолчанию для  $R$ , которые могут быть использованы в отсутствие более конкретной информации, подходящей для соответствующего региона.

ТАБЛИЦА 2

**Информация по умолчанию для моделирования потерь из-за препятствий**

Тип препятствия	Типовая высота препятствия (м)		Модель потерь из-за препятствий на стороне терминала
	Добавление к уравнению профиля (1с)	Потери из-за препятствий на стороне терминала, § 4.7	
Вода/море	0	10	Уравнение (64b)
Открытая местность/сельская местность	0	10	Уравнение (64b)
Пригороды	10	10	Уравнение (64a)
Городские условия/деревья/лес	15	15	Уравнение (64a)
Плотная городская застройка	20	20	Уравнение (64a)

**3.3 Климатические зоны для радиосвязи**

Необходимы также данные о том, трассы какой длины находятся в климатических зонах для радиосвязи, описанных в таблице 3.

Для максимального соответствия результатов, полученных различными администрациями, настоятельно рекомендуется, чтобы расчеты по этой процедуре выполнялись по цифровой карте мира МСЭ (IDWM), которую можно получить в БР как в серверном варианте, так и для ПК. Если все точки трассы находятся, как минимум, на расстоянии 50 км от моря и иных больших водоемов, то используется только категория "территория, удаленная от моря".

Если информация о зоне хранится в последовательных точках вдоль трассы распространения радиоволн, следует предположить, что изменения происходят на полпути между точками с разными кодами зон.

ТАБЛИЦА 3

## Климатические зоны для радиосвязи

Тип зоны	Код	Определение
Побережье	A1	Побережье и береговые зоны, т. е. суша, граничащая с морем на высоте до 100 м относительно среднего уровня морской воды, на расстоянии до 50 км от ближайшего моря. Там, где нет данных с точностью 100 м, может использоваться примерное значение
Территория, удаленная от моря	A2	Вся суша, за исключением побережья и береговых зон, определенных выше как "побережье"
Море	B	Моря, океаны и иные большие водоемы (т. е. покрывающие круг диаметром как минимум 100 км)

## 3.4 Расстояние от терминалов до побережья

Если трасса проходит по зоне В, то требуется еще два параметра –  $d_{ct}$ ,  $d_{cr}$ , определяющие расстояние от берега до передатчика и приемника (км), соответственно, в направлении на другой терминал. Для терминалов, расположенных на судне или на морской платформе, это расстояние = 0.

## 3.5 Основные радиометеорологические параметры

В процедуре прогнозирования для описания изменения рефракции атмосферы требуется два радиометеорологических параметра:

- $\Delta N$  (N-единиц/км), средняя вертикальная скорость изменения коэффициента рефракции в нижнем километре атмосферы, она представляет собой данные, на основе которых может быть рассчитан соответствующий эффективный радиус Земли для выполнения анализа профиля трассы и препятствий на трассе. Отметим, что в этой процедуре  $\Delta N$  является положительным значением;
- $N_0$  (N-единицы), преломляющая способность поверхности на уровне моря, используется только в модели тропосферного рассеяния в качестве меры изменчивости механизма тропосферного рассеяния.

В Дополнении 1 приводятся мировые карты значений  $\Delta N$  и  $N_0$  и файлы данных, содержащие цифровые карты, имеющиеся в Бюро.

## 3.6 Распространение по атмосферному волноводу

Степень, до которой будут увеличены уровни сигналов из-за аномального распространения, в частности, по атмосферному волноводу, оценивается параметром  $\beta_0$  (%), процентом времени, в течение которого можно ожидать, что в нижних 100 м атмосферы вертикальные скорости изменения коэффициента рефракции превышают значение 100 N-единиц/км. Значение  $\beta_0$  рассчитывается следующим образом.

Рассчитать параметр  $\mu_1$ , который зависит от того, какая часть трассы пролегает над сушей (территория, удаленная от моря и/или побережье), а какая – над водой:

$$\mu_1 = \left( 10^{\frac{-d_{tm}}{16-6,6\tau}} + 10^{-5(0,496+0,354\tau)} \right)^{0,2}, \quad (2)$$

где величина  $\mu_1$  должна ограничиваться значениями  $\mu_1 \leq 1$ ,



и

$$\tau = 1 - e^{-(4,12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2,41})}, \quad (3)$$

$d_{lm}$ : наиболее продолжительная непрерывная сухопутная часть (территория, удаленная от моря + побережье) дуги большого круга (км);

$d_{lm}$ : наиболее продолжительная непрерывная сухопутная часть дуги большого круга (км), пролегающая по территории, удаленной от моря (км).

Для получения значений  $d_{tm}$  и  $d_{lm}$  должны использоваться климатические зоны для радиосвязи, определенные в таблице 3. Если все точки трассы находятся на расстоянии, как минимум, 50 км от моря или других больших водоемов, то используется только категория "территория, удаленная от моря", и значения  $d_{tm}$  и  $d_{lm}$  равны длине трассы  $d$ .

Рассчитать параметр  $\mu_4$ , который зависит от  $\mu_1$  и от географической широты середины трассы в градусах:

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \mu_1^{(-0,935+0,0176\varphi)} && \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ, \\ \mu_4 &= \mu_1^{0,3} && \text{для } |\varphi| > 70^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$\varphi$ : географическая широта середины трассы (градусы).

Рассчитать  $\beta_0$ :

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{для } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (5)$$

### 3.7 Эффективный радиус Земли

Средний коэффициент  $k_{50}$  эффективного радиуса Земли для трассы определяется уравнением:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (6)$$

Значение средней вертикальной скорости изменения коэффициента рефракции  $\Delta N$  можно получить из рисунка 1, используя в качестве описателя трассы широту и долготу середины трассы.

Среднее значение эффективного радиуса Земли  $a_e$  определяется выражением:

$$a_e = 6\,371 \cdot k_{50} \quad \text{км.} \quad (7a)$$

Эффективный радиус Земли  $a_\beta$ , превышаемый в течение времени  $\beta_0$ , определяется выражением:

$$a_\beta = 6\,371 \cdot k_\beta \quad \text{км,} \quad (7b)$$

где  $k_\beta = 3,0$  – оценка коэффициента эффективного радиуса Земли, превышаемого в течение времени  $\beta_0$ .

### 3.8 Параметры, полученные из анализа профиля трассы

Значения множества параметров трассы, необходимых для расчетов и показанных в таблице 4, должны быть получены в ходе начального анализа профиля трассы на основе значения  $a_e$ , вычисленного из уравнения (7a). Информация о получении данных, формировании и анализе профиля трассы приведена в Дополнении 2 настоящего Приложения.

## 4 Процедура прогнозирования

### 4.1 Общее описание

В настоящем разделе описана полная процедура прогнозирования. Во-первых, оцениваются основные потери передачи  $L_b$  (дБ), не превышаемые в течение требуемого процента времени года  $p\%$  и в 50% мест размещения, как описано в § 4.2–4.6 (т. е. основные потери передачи из-за распространения по линии прямой видимости, потери за счет дифракции, потери за счет тропосферного рассеяния, потери из-за распространения по атмосферному волноводу/отражения от слоев атмосферы и потери из-за комбинации этих механизмов распространения, для того чтобы прогнозировать основные потери передачи, соответственно). В § 4.7–4.10 описываются методы учета влияния препятствий на терминал, влияния изменения местоположения и потери на проникновение внутрь здания. В итоге в § 4.11 приводятся выражения, которые связывают основные потери передачи с напряженностью поля (дБ(мкВ/м)) для эффективной излучаемой мощности = 1 кВт.

ТАБЛИЦА 4

Значения параметров, которые должны быть получены из анализа профиля трассы

Параметр	Описание
$d$	Расстояние по дуге большого круга (км)
$d_{it}, d_{ir}$	Расстояние от передающей и приемной антенн до соответствующих им горизонтов (км)
$\theta_t, \theta_r$	Углы места передающей и приемной антенн, соответственно (мрад)
$\theta$	Угловое расстояние трассы (мрад)
$h_{is}, h_{rs}$	Высота антенного центра над средним уровнем моря (м)
$h_{ic}, h_{rc}$	максимум ( $h_{is}, g_1$ ) и максимум ( $h_{rs}, g_n$ ), соответственно
$h_{ie}, h_{re}$	Эффективные высоты антенн над уровнем земли (м)
$d_b$	Суммарная длина участков трасс, проходящих над водной поверхностью (км)
$\omega$	Доля общей трассы, проходящая над водной поверхностью: $\omega = d_b / d$ где $d$ – расстояние по дуге большого круга (км), рассчитанное по уравнению (73). Для полностью сухопутных трасс: $\omega = 0$

### 4.2 Распространение по линии прямой видимости (с учетом кратковременных явлений)

Приведенные далее значения следует оценить как для трасс прямой видимости (LoS), так и для загоризонтных трасс.

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{дБ.} \quad (8)$$

Корректировка, учитывающая влияние многолучевости и фокусировки в течение  $p$  и  $\beta_0$  процентов времени, соответственно, описываются выражениями:

$$E_{sp} = 2,6 \left( 1 - e^{-\frac{d_{it} + d_{ir}}{10}} \right) \log \left( \frac{p}{50} \right) \quad \text{дБ,} \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 \left( 1 - e^{-\frac{d_{it} + d_{ir}}{10}} \right) \log \left( \frac{\beta_0}{50} \right) \quad \text{дБ.} \quad (9b)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS), которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, следующим образом:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \quad \text{дБ.} \quad (10)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS), которые не превышаются в течение  $\beta_0\%$  времени, следующим образом:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \quad \text{дБ.} \quad (11)$$

### 4.3 Распространение за счет дифракции

Потери за счет дифракции вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции над сферической Землей. Часть этого комбинированного метода, основанная на конструкции Буллингтона, является расширением базовой конструкции Буллингтона для контроля переходов между свободным пространством и условиями при наличии препятствий. Эта часть метода используется дважды: для профиля реальной трассы и для гладкого профиля с нулевой высотой с измененными высотами антенн, называемыми эффективными высотами антенн. Те же эффективные высоты антенн также используются для расчета дифракционных потерь над сферической Землей. Окончательный результат получается как комбинация из трех видов потерь, рассчитанных, как указано выше. Для идеально гладкой трассы окончательные потери за счет дифракции вычисляются с использованием модели сферической Земли.

Этот метод обеспечивает оценку дифракционных потерь для трасс всех типов, в том числе трасс над морем, над территорией, удаленной от моря, или над побережьем, независимо от того, является ли трасса гладкой или пересеченной, трассой LoS или загоризонтной трассой.

Этот метод расчета дифракции всегда используется для среднего эффективного радиуса Земли. Если требуется общий прогноз для  $p = 50\%$ , никаких дальнейших расчетов дифракции выполнять не нужно.

В общем случае, когда  $p < 50\%$ , расчеты дифракции должны быть выполнены во второй раз для эффективного радиуса Земли = 3. Этот второй расчет позволяет получить оценку потерь за счет дифракции, которые не превышаются в течение  $\beta_0\%$  времени, где  $\beta_0$  определяется из уравнения (5).

Затем вычисляются потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, для  $1\% \leq p \leq 50\%$ , с применением процедуры ограничения или интерполяции, описанной в § 4.3.5.

В данном методе используется аппроксимация до единственного отображения потерь из-за дифракции на границе в функции безразмерного параметра  $v$ , определяемого выражением:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right). \quad (12)$$

Отметим, что  $J(-0,78) \approx 0$ , и это значение является нижним пределом, когда еще может использоваться аппроксимация. Для  $v \leq -0,78$   $J(v)$  устанавливается равным нулю.

Полный расчет дифракции описывается в следующих подразделах:

В подразделе 4.3.1 описывается часть метода расчета дифракции, основанная на модели Буллингтона. При каждом расчете дифракции для данного эффективного радиуса Земли она используется дважды. Во втором случае высоты антенн изменяются, и все высоты профиля равны нулю.

В подразделе 4.3.2 описывается часть модели на основе дифракции над сферической Землей. Эта часть используется с теми же высотами антенн, что и при втором использовании модели Буллингтона, описанной в § 4.3.1.

В подразделе 4.3.3 описывается порядок комбинированного использования методов, изложенных в § 4.3.1 и 4.3.2, для выполнения полного расчета дифракции для данного эффективного радиуса Земли.

Из-за того, каким образом используются модель Буллингтона и расчет на основе сферической Земли, полный расчет дифракции получил название "модель дельта-Буллингтон".

В подразделе 4.3.4 описывается полный расчет потерь из-за дифракции, не превышаемых в течение заданного  $p$  процента времени.

#### 4.3.1 Часть расчета дифракции, основанная на модели Буллингтона

В следующих уравнениях наклоны рассчитываются в м/км относительно основной линии, соединяющей уровень моря на стороне передатчика и уровень моря на стороне приемника. Расстояние до  $i$ -й точки профиля и ее высота составляют соответственно  $d_i$  километров и  $h_i$  метров над уровнем моря,  $i$  принимает значения от 1 до  $n$ , где  $n$  – число точек профиля, а полная длина трассы равна  $d$  километрам. Для удобства терминалы в начале и конце профиля называются передатчиком и приемником с высотами  $h_{ts}$  и  $h_{rs}$  метров над уровнем моря соответственно. Эффективная кривизна Земли  $C_e$  км<sup>-1</sup> задается как  $1/a_e$  где  $a_e$  – эффективный радиус Земли в километрах. Длина волны в метрах обозначается как  $\lambda$ .

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от передатчика к точке.

$$S_{im} = \max \left[ \frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right] \quad \text{м/км,} \quad (13)$$

где номер профиля  $i$  принимает значения от 2 до  $n-1$ .

Рассчитать наклон линии от передатчика к приемнику, предполагая трассу LoS:

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad \text{м/км.} \quad (14)$$

Теперь необходимо рассмотреть два случая.

*Случай 1. Трасса LoS.*

Если  $S_{im} < S_{tr}$ , то трасса является трассой прямой видимости (LoS).

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим параметром дифракции  $v$ :

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[ h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{tc}(d - d_i) + h_{rc} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}, \quad (15)$$

где номер профиля  $i$  принимает значения от 2 до  $n-1$ .

В этом случае потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{дБ,} \quad (16)$$

где функция  $J$  определяется из уравнения (12) для  $v_b$  больше  $-0,78$ , и в других случаях равны 0.

*Случай 2. Загоризонтная трасса*

Если  $S_{im} \geq S_{tr}$ , то трасса является загоризонтной.

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от приемника к точке.

$$S_{rim} = \max \left[ \frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rc}}{d - d_i} \right] \quad \text{м/км,} \quad (17)$$

где номер профиля  $i$  принимает значения от 2 до  $n-1$ .

Рассчитать расстояние до точки Буллингтона от передатчика:

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim}d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{км.} \quad (18)$$

Рассчитать параметр дифракции  $v_b$  для точки Буллингтона:

$$v_b = \left[ h_{tc} + S_{tim}d_{bp} - \frac{h_{tc}(d-d_b) + h_{rc}d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_b(d-d_{bp})}} \quad (19)$$

В этом случае потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{дБ.} \quad (20)$$

Для  $L_{uc}$ , рассчитанного по формуле (16) или (20), потери за счет дифракции Буллингтона на трассе определяются выражением:

$$L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02d) \quad \text{дБ.} \quad (21)$$

#### 4.3.2 Потери за счет дифракции над сферической Землей

Потери за счет дифракции над сферической Землей  $L_{d sph}$ , не превышаемые в течение  $p\%$  времени, для высот антенн  $h_{te}$  и  $h_{re}$  (м) вычисляются следующим образом.

Рассчитать граничное расстояние прямой видимости (LoS) для гладкой трассы:

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot \left( \sqrt{0,001h_{te}} + \sqrt{0,001h_{re}} \right) \quad \text{км.} \quad (22)$$

Если  $d \geq d_{los}$ , рассчитать потери за счет дифракции, используя метод, описанный в § 4.3.3, ниже, для  $a_{dft} = a_p$ , чтобы получить  $L_{dft}$ , и установить  $L_{d sph}$  равным  $L_{dft}$ . Дальнейших вычислений дифракции над сферической Землей не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать наименьшую высоту просвета между трассой над криволинейной Землей и лучом между антеннами,  $h$ , используя выражение:

$$h_{se} = \frac{\left( h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_2 + \left( h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_1}{d} \quad \text{м,} \quad (23)$$

где:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{км;} \quad (24a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{км;} \quad (24b)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\}, \quad (24c)$$

где функция  $\arccos$  возвращает угол в радианах:

$$c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}}, \quad (24d)$$

$$m = \frac{250d^2}{a_p(h_{te} + h_{re})}. \quad (24e)$$

Рассчитать требуемый просвет для нулевых потерь за счет дифракции  $h_{req}$ :

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{м.} \quad (25)$$

Если  $h > h_{req}$ , потери за счет дифракции над сферической Землей  $L_{dsph}$  равны нулю. Дальнейших вычислений дифракции над сферической Землей не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать модифицированный эффективный радиус Земли  $a_{em}$ , который дает границу прямой видимости на расстоянии  $d$ , используя выражение:

$$a_{em} = 500 \left( \frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{км.} \quad (26)$$

Используем метод, описанный в § 4.3.3, для  $a_{dft} = a_{em}$ , чтобы получить  $L_{dft}$ .

Если значение  $L_{dft}$  является отрицательным, потери за счет дифракции над сферической Землей  $L_{dsph}$  равны 0, и дальнейших расчетов дифракции над сферической Землей не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать потери за счет дифракции над сферической Землей методом интерполяции:

$$L_{dsph} = [1 - h_{se} / h_{req}] L_{dft} \quad \text{дБ.} \quad (27)$$

### 4.3.3 Часть потерь за счет дифракции над сферической Землей, определяемая первым членом остаточного ряда

В данном подразделе приводится метод расчета дифракции над сферической Землей с использованием только первого члена остаточного ряда. Этот метод является частью полного метода расчета дифракции, описанного в § 4.3.2, выше, и предназначен для определения потерь за счет дифракции с учетом первого члена остаточного ряда,  $L_{dft}$ , для данного значения эффективного радиуса Земли  $a_{dft}$ . Значение  $a_{dft}$  дано в § 4.3.2.

Установим типичные электрические свойства земной поверхности для суши с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 22,0$  и проводимостью  $\sigma = 0,003 \text{ С/м}$  и вычислим  $L_{dft}$ , используя уравнения (29)–(36), получим в результате  $L_{dftland}$ .

Установим типичные электрические свойства земной поверхности для моря с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 80,0$  и проводимостью  $\sigma = 5,0 \text{ С/м}$  и вычислим  $L_{dft}$ , используя уравнения (29)–(36), получим в результате  $L_{dftsea}$ .

Потери за счет дифракции над сферической Землей, определяемые первым членом, находят из выражения:

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{дБ,} \quad (28)$$

где  $\omega$  – часть трассы, проходящая над морем.

Начать вычисления, которые должны быть выполнены дважды, как описано выше:

Нормированный коэффициент полной проводимости поверхности для горизонтальной и вертикальной поляризации:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + (18 \sigma / f)^2]^{-1/4} \quad (\text{горизонтальная поляризация}) \quad (29a)$$

и

$$K_V = K_H [\epsilon_r^2 + (18 \sigma / f)^2]^{1/2} \quad (\text{вертикальная поляризация}). \quad (29b)$$

Вычислить параметр, учитывающий тип земной поверхности/поляризацию:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4}, \quad (30)$$

где  $K - K_H$  или  $K_V$  в зависимости от типа поляризации.

Нормированное расстояние:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left( \frac{f}{a_{dft}} \right)^{1/3} d. \quad (31)$$

Нормированные высоты передатчика и приемника:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left( \frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te}; \quad (32a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left( \frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re}. \quad (32b)$$

Рассчитать член, определяющий расстояния, используя выражение:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X & \text{для } X \geq 1,6, \\ -20 \log(X) - 5,6488X^{1,425} & \text{для } X < 1,6. \end{cases} \quad (33)$$

Определить функцию нормированной высоты, используя выражение:

$$G(Y) = \begin{cases} 17,6(B - 1,1)^{0,5} - 5 \log(B - 1,1) - 8 & \text{для } B > 2, \\ 20 \log(B + 0,1B^3) & \text{в ином случае,} \end{cases} \quad (34)$$

где:

$$B = \beta_{dft} Y. \quad (35)$$

Ограничить  $G(Y)$  так, чтобы  $G(Y) \geq 2 + 20 \log K$ .

Теперь получим потери за счет дифракции над сферической Землей, определяемые первым членом остаточного ряда, используя выражение:

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{дБ.} \quad (36)$$

#### 4.3.4 Полная модель потерь за счет дифракции "дельта-Буллингтон"

Используем метод, описанный в § 4.3.1, для реального профиля местности и высот антенн. Установить результирующие потери за счет дифракции Буллингтона для реальной трассы  $L_{bulla} = L_{bull}$ , как это задано уравнением (21).

Используем метод, описанный в § 4.3.1, второй раз для всех высот профиля  $g_i$ , установленных в 0, и модифицированных высот антенн, определяемых выражениями:

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (37a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (37b)$$

где высоты гладкой земной поверхности в месте размещения передатчика и приемника,  $h_{std}$  и  $h_{srd}$ , определены в § 5.1.6.3 Дополнения 2. Установить результирующие потери за счет дифракции Буллингтона для этой гладкой трассы  $L_{bulls} = L_{bull}$ , как это задано уравнением (21).

Используем метод, описанный в § 4.3.2, для вычисления потерь за счет дифракции над сферической Землей  $L_{dsph}$  для реальной трассы длиной  $d$  км при:

$$h_{et} = h'_{ts} \quad \text{м;} \quad (38a)$$

$$h_{er} = h'_{rs} \quad \text{м.} \quad (38b)$$

Потери за счет дифракции для общей трассы теперь определяются выражением:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{дБ.} \quad (39)$$

#### 4.3.5 Потери за счет дифракции, не превышаемые в течение $p\%$ времени

Используем метод, описанный в § 4.3.4, для вычисления потерь за счет дифракции  $L_d$  для среднего значения эффективного радиуса Земли  $a_e$ , определяемого из уравнения (7a). Установим средние потери за счет дифракции  $L_{d50} = L_d$ .

Если  $p = 50\%$ , потери за счет дифракции, не превышаемые в течение  $p\%$  времени,  $L_{dp}$ , определяются как  $L_{d50}$ , и расчеты на этом заканчиваются.

Если  $p < 50\%$ , продолжить вычисления следующим образом.

Применить метод, описанный в § 4.3.4, для вычисления потерь за счет дифракции  $L_d$ , не превышаемых в течение  $\beta_0\%$  времени, для эффективного радиуса Земли,  $a_\beta$ , определяемого из уравнения (7b). Устанавливаем потери за счет дифракции, не превышаемые в течение  $\beta_0\%$  времени,  $L_{d\beta} = L_d$ .

Применение двух возможных значений коэффициента эффективного радиуса Земли регулируется при помощи коэффициента интерполяции  $F_i$  на основе логнормального распределения потерь из-за дифракции в диапазоне  $\beta_0\% < p \leq 50\%$ , используя выражение:

$$F_i = 0, \quad \text{если } p = 50\%, \quad (40a)$$

$$= \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)}, \quad \text{если } 50\% > p > \beta_0\%, \quad (40b)$$

$$= 1, \quad \text{если } \beta_0\% \geq p, \quad (40c)$$

где  $I(x)$  – обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности  $x$ . Аппроксимация зависимости  $I(x)$ , которая может быть использована доверительно для  $x \leq 0,5$ , приведена в Дополнении 3 к настоящему Приложению.



Теперь получим потери за счет дифракции  $L_{dp}$ , не превышаемые в течение  $p\%$  времени, используя выражение:

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{дБ.} \quad (41)$$

$F_i$  определяется из уравнений (40а–40с) в зависимости от значений  $p$  и  $\beta_0$ .

Средние основные потери передачи, обусловленные дифракцией  $L_{bd50}$ , определяются выражением:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{дБ,} \quad (42)$$

где  $L_{bfs}$  определяется из уравнения (8).

Основные потери передачи, обусловленные дифракцией, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяются выражением:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{дБ,} \quad (43)$$

где  $L_{b0p}$  определяется из уравнения (10).

#### 4.4 Распространение за счет тропосферного рассеяния

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для значений доли времени много меньше 50% трудно отделить влияние настоящего режима тропосферного рассеяния от влияния других вторичных явлений распространения, которые оказывают похожее влияние на процесс распространения сигнала. Следовательно, модель "тропосферного рассеяния", принятая в настоящей Рекомендации, является эмпирическим обобщением концепции тропосферного рассеяния и охватывает также и эти эффекты распространения. Она позволяет выполнять непрерывное прогнозирование основных потерь передачи для  $p$  от 0,001% до 50%, таким образом соединяя для малых процентов времени модель атмосферного волновода и модель отражения от слоев атмосферы с настоящим режимом "тропосферного рассеяния", что вполне пригодно для слабого остаточного поля, превышаемого в течение больших процентов времени.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Эта модель прогнозирования для тропосферного рассеяния была получена для целей прогнозирования помех, и она непригодна для расчета условий распространения для более 50% времени, так как меняет качественные показатели тропосферных радиорелейных систем.

Основные потери передачи из-за тропосферного рассеяния  $L_{bs}$  (дБ), которые не превышаются в течение любого процента времени  $p < 50\%$ , определяются выражением:

$$L_{bs} = 190,1 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 - 10,125 \left( \log \left( \frac{50}{p} \right) \right)^{0,7} \quad \text{дБ,} \quad (44)$$

где:

$L_f$ : частотно-зависимые потери:

$$L_f = 25 \log(f) - 2,5 \left[ \log \left( \frac{f}{2} \right) \right]^2 \quad \text{дБ;} \quad (45)$$

$N_0$ : преломляющая способность поверхности на уровне моря в точке середины трассы, которая может быть найдена из рисунка 2.

#### 4.5 Распространение в атмосферном волноводе и за счет отражения от слоев атмосферы

Основные потери передачи  $L_{ba}$  (дБ), обусловленные атмосферным волноводом и отражением от слоев атмосферы, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяются выражением:

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) \quad \text{дБ,} \quad (46)$$

где:

$A_f$ : суммарные фиксированные объединенные потери (за исключением локальных потерь на отражение) между антеннами и структурой аномального распространения в атмосфере:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log(d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{дБ}; \quad (47)$$

$A_{lf}$ : эмпирическая поправка для учета возрастающего ослабления и длины волны при волноводном распространении

$$A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 f + 92,5 f^2 \quad \text{дБ,} \quad \text{если } f < 0,5 \text{ ГГц,} \quad (47a)$$

$$A_{lf}(f) = 0,0 \text{ дБ} \quad \text{в ином случае}$$

$A_{st}, A_{sr}$ : потери за счет дифракции на экранах вокруг передающей и приемной станций соответственно:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log(1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2}) + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{дБ} \quad \text{для } \theta''_{t,r} > 0 \text{ мрад,} \\ 0 & \text{дБ} \quad \text{для } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ мрад,} \end{cases} \quad (48)$$

где:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад}; \quad (48a)$$

$A_{ct}, A_{cr}$ : корректировка атмосферного волновода над морской поверхностью для передающей и приемной станций соответственно:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct, cr}^2} (1 + \tanh(0,07(50 - h_{ts,rs}))) \quad \text{дБ} \quad \text{для } \omega \geq 0,75; \quad (49)$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr},$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ км},$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{дБ} \quad \text{для всех условий.} \quad (49a)$$

Полезно отметить, что уравнение (49) используется при очень ограниченном наборе условий.

$A_d(p)$ : потери, зависящие от процента времени и углового расстояния в рамках механизмов аномального распространения:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{дБ,} \quad (50)$$

где:

$\gamma_d$ : конкретное ослабление:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{дБ/мрад}; \quad (51)$$

$\theta'$ : угловое расстояние (при необходимости, скорректированное (при помощи уравнения (48a)), для того чтобы иметь возможность применения модели экранирования, описанной уравнением (46)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{мрад,} \quad (52)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{для } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад,} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{для } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад;} \end{cases} \quad (52a)$$

$A(p)$ : изменение процента времени (кумулятивное распределение):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left( \frac{p}{\beta} \right) + 12 \left( \frac{p}{\beta} \right)^{\Gamma} \quad \text{дБ}, \quad (53)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-\left(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2\right) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}}, \quad (53a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \%; \quad (54)$$

$\mu_2$ : корректировка геометрии трассы:

$$\mu_2 = \left( \frac{500}{a_e} \frac{d^2}{\left(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}\right)^2} \right)^{\alpha}. \quad (55)$$

Значение  $\mu_2$  не должно превышать 1.

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau, \quad (55a)$$

где:

$\varepsilon$ : 3,5;

$\tau$ : определяется в уравнении (3), и значение  $\alpha$  не должно быть менее  $-3,4$ ;

$\mu_3$ : корректировка неровностей рельефа:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } h_m \leq 10 \text{ м,} \\ e^{-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10)(43 + 6d_I)} & \text{для } h_m > 10 \text{ м;} \end{cases} \quad (56)$$

и

$$d_I = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{км.} \quad (56a)$$

Остальные слагаемые определены в таблицах 1 и 2 и в Дополнении 2 настоящего Приложения.

#### 4.6 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, без учета эффекта отражения от терминала

Описанную далее процедуру следует применять к результатам описанных выше расчетов для всех трасс для того, чтобы рассчитать основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени в 50% местоположений. Для того чтобы избежать физически невозможных неоднородностей в результатах прогнозирования теоретических основных потерь передачи, вышеописанные модели распространения должны быть смешаны для получения модифицированных значений основных потерь передачи, с тем чтобы достичь общего прогнозирования для  $p\%$  времени и 50% местоположений.

Рассчитать коэффициент интерполяции  $F_j$ , который позволит учесть угловое расстояние:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left( 1,0 + \tanh \left( 3,0 \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right), \quad (57)$$

где:

- Θ : фиксированный параметр, определяющий диапазон углов соответствующего слияния моделей, он выставляется = 0,3;
- ξ : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния в конце диапазона, он выставлен = 0,8;
- θ : угловое расстояние (мрад), определенное в таблице 7.

Рассчитать коэффициент интерполяции  $F_k$ , который позволит учесть расстояние по дуге большого круга:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left( 1,0 + \tanh \left( 3,0 \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right), \quad (58)$$

где:

- $d$  : протяженность трассы по дуге большого круга (км), определенная в таблице 3;
- $d_{sw}$  : фиксированный параметр, определяющий диапазон расстояний соответствующего слияния; он выставляется = 20;
- $\kappa$  : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния на границах диапазона, устанавливается = 0,5.

Рассчитать теоретические минимальные основные потери передачи  $L_{minb0p}$  (дБ), связанные с распространением по линии прямой видимости (LoS) и дифракцией той части трассы, которая проходит над морем:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{для } p < \beta_0 \quad \text{дБ} \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{для } p \geq \beta_0 \quad \text{дБ} \end{cases}, \quad (59)$$

где:

- $L_{b0p}$  : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяемые уравнением (10);
- $L_{b0\beta}$  : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение  $\beta_0\%$  времени, определяемые уравнением (11);
- $L_{dp}$  : потери из-за дифракции, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяемые уравнением (41);
- $L_{bd50}$  : средние основные потери из-за дифракции, определяемые уравнением (42);
- $F_i$  : коэффициент интерполяции дифракции, определяемый уравнением (40).

Рассчитать теоретические минимальные основные потери передачи  $L_{minbap}$  (дБ), обусловленные изменением сигнала при распространении по линии прямой видимости и при загоризонтном распространении:

$$L_{minbap} = \eta \cdot \ln \left( e^{\left( \frac{L_{ba}}{\eta} \right)} + e^{\left( \frac{L_{b0p}}{\eta} \right)} \right) \quad \text{дБ}, \quad (60)$$

где:

- $L_{ba}$  : основные потери передачи, обусловленные атмосферным волноводом и отражением от слоев атмосферы, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяемые уравнением (46);
- $L_{b0p}$  : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяемые уравнением (10);

$$\eta = 2,5.$$

Рассчитать теоретические минимальные основные потери передачи  $L_{bda}$  (дБ), обусловленные дифракцией и изменениями сигнала при распространении по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе и при отражении от слоев атмосферы:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{для } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap}) \cdot F_k & \text{для } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (61)$$

где:

- $L_{bd}$ : основные потери передачи из-за дифракции, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, из уравнения (43);
- $L_{minbap}$ : теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и загоризонтным распространением, из уравнения (60);
- $F_k$ : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (58), в соответствии со значением расстояния трассы по дуге большого круга  $d$ .

Рассчитать модифицированные основные потери передачи  $L_{bam}$  (дБ), учитывающие изменение сигнала из-за дифракции, при распространении по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе/из-за отражения от слоев атмосферы:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda}) \cdot F_j \quad \text{дБ}, \quad (62)$$

где:

- $L_{bda}$ : теоретические основные потери передачи, обусловленные дифракцией и распространением по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе/из-за отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (61);
- $L_{minb0p}$ : теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и дифракцией на морских участках трассы, определяемые уравнением (59);
- $F_j$ : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (57), в соответствии с величиной углового расстояния трассы  $\theta$ .

Рассчитать основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и для 50% местоположений, без учета влияния отражения от терминала  $L_{bu}$  (дБ), используя выражение:

$$L_{bu} = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{дБ}, \quad (63)$$

где:

- $L_{bs}$ : основные потери передачи из-за тропосферного рассеяния, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени, определяемые уравнением (44);
- $L_{bam}$ : измененные основные потери передачи, учитывающие изменение сигнала из-за дифракции, распространения по линии прямой видимости, распространения в атмосферном волноводе и отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (62).

#### 4.7 Дополнительные потери, обусловленные окружающей терминал местностью

Когда антенна передатчика или приемника расположена ниже высоты  $R_t$  или  $R_r$  – высоты земной поверхности, окружающей передатчик или приемник, дополнительные потери  $A_{ht}$  и  $A_{hr}$  рассчитываются следующим образом. Подходящие значения для  $R$  рассматриваются в § 3.2.

Описываемый ниже метод позволяет найти средние потери из-за различной окружающей терминал местности. Возможные механизмы распространения, вызывающие потери, включают потери за счет препятствий и отражения от местных окружающих объектов на типовой высоте, а также рассеяние и отражение от земли и мелких объектов. При использовании компьютерной реализации с профилем

местности, извлеченным из цифровой модели рельефа местности, и с окружением терминала, определяемым категорией препятствий, нецелесообразно идентифицировать отдельные механизмы. Используемый здесь метод различает два основных случая: для леса и городских условий предполагается, что основным механизмом является дифракция на препятствиях; для других категорий предполагается, что доминирует отражение или рассеяние.

Метод идентичен для приемника и для передатчика, поэтому в следующих формулах считается, что  $A_h = A_{ht}$  или  $A_{hr}$ ,  $h = h_{tg}$  или  $h_{rg}$  и  $R = R_t$  или  $R_r$ , в зависимости от обстоятельств.

Если  $h \geq R$ , то  $A_h = 0$ .

Если  $h < R$ , то  $A_h$  может иметь одну из двух форм, в зависимости от типа препятствия (см. таблицу 2):

$$A_h = J(v) - 6,03 \quad \text{дБ} \quad (64a)$$

или

$$A_h = -K_{h2} \log(h/R) \quad \text{дБ.} \quad (64b)$$

$J(v)$  вычисляются с применением уравнения (12).

Значения  $v$  и  $K_{h2}$  описываются выражениями:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}}; \quad (64c)$$

$$h_{dif} = R - h \quad (\text{м}); \quad (64d)$$

$$\theta_{clut} = \tan^{-1}(h_{dif} / 27) \quad (\text{градусы}); \quad (64e)$$

$$K_{h2} = 21,8 + 6,2 \log(f); \quad (64f)$$

$$K_{nu} = 0,342 \sqrt{f}, \quad (64g)$$

где:

$f$ : частота (ГГц).

Форма уравнения (64a) представляет собой потери Френеля из-за огибания препятствия и будет применяться для таких категорий препятствий, как здания. В частности, в городских условиях все препятствия будут именно такого типа.

Уравнение (64b) представляет собой функцию зависимости коэффициента усиления от высоты из-за близости земли на более открытых пространствах. При наличии зеркальных отражений от земли это типичные изменения сигнала ниже первого двухлучевого интерференционного максимума. При отсутствии зеркальных отражений от земли изменения сигнала ниже  $R$  обуславливаются экранированием малыми объектами и неровностями.

Четко выраженный первый двухлучевой интерференционный максимум возникает только в особых условиях, позволяющих отражение от земли, и не может быть выявлен с помощью обычных топографических данных, доступных для компьютерных систем. В отсутствие специальной информации об окружающей терминал местности в уравнении (64b) следует использовать значение  $R$ , обусловленное категорией препятствия.

Если имеется специальная информация, указывающая на наличие гладкой плоской отражающей поверхности с адекватным зазором Френеля, обеспечивающим отражение от земли,  $R$  может быть вычислено с использованием метода, описанного в Дополнении 4. Однако этот метод представляет собой попытку определить особую точку в многолучевом распространении, которая не согласуется с принципами, лежащими в основе прогнозирования распространения сигнала "из пункта в зону", и несовместима с расчетом изменения местоположения, описанным в § 4.8. Таким образом, детальная оценка отражений от земли должна быть ограничена использованием данной Рекомендации для иных целей, чем прогнозирование распространения сигналов "из пункта в зону".

Основные потери передачи  $L_{bc}$  (дБ), которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в 50% местоположений, с учетом влияния потерь из-за отражения от терминала, определяются выражением:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{дБ}, \quad (65)$$

где:

- $L_{bu}$ : основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в 50% местоположений на (или выше, если требуется) высоте типичного отражающего местного препятствия, определяемые уравнением (63);
- $A_{ht,hr}$ : дополнительные потери, учитывающие окружающую терминал местность, уравнения (64a)–(64b), в зависимости от обстоятельств.

#### 4.8 Изменение местоположения потерь

В настоящей Рекомендации, и в общем случае, изменение местоположения относится к пространственным статистическим данным об изменении местной земной поверхности. Этот результат полезен в масштабах гораздо более широких, чем изменения свойств подстилающей поверхности, и по сравнению с ними изменение трассы является несущественным. Поскольку изменение местоположения определяется без учета изменений, вносимых многолучевыми отражениями, оно не зависит от полосы частот системы.

При планировании радиосистем необходимо учитывать эффекты многолучевости. Влияние многолучевости для различных систем будет различным и будет зависеть от ширины полосы частот, методов модуляции или схем кодирования. Рекомендации по учету этих эффектов даны в Рекомендации МСЭ-R P.1406.

Результаты анализа исчерпывающих данных показывают, что распределение средней напряженности поля из-за изменений подстилающей поверхности в городских условиях и в пригородах имеет приблизительную логнормальную зависимость с нулевым средним значением.

Значения стандартной девиации зависят от частоты и внешних условий, и эмпирические исследования показали, что значения имеют существенный разброс. Типичные значения для областей площадью 500 м × 500 м описываются следующим выражением:

$$\sigma_L = K + 1,3 \log(f) \quad \text{дБ}, \quad (66)$$

где:

- $K = 5,1$  для приемников, антенны которых расположены ниже высоты препятствия в городских условиях, а в пригородах для систем подвижной связи с ненаправленными антеннами на высоте крыши автомобиля;
- $K = 4,9$  для приемников с антеннами, расположенными на крышах домов, на высоте приблизительно равной высоте препятствия;
- $K = 4,4$  для приемников в сельской местности;
- $f$ : требуемая частота (ГГц).

Если площадь области, для которой требуется определить изменение, более 500 м × 500 м или если изменение должно относиться ко всем областям на данном расстоянии, а не к отдельным областям, то значение  $\sigma_L$  будет существенно больше. Результаты эмпирических исследований позволяют предположить, что изменение местоположения увеличивается (по отношению к значениям для малых областей) на величину до 4 дБ для зоны радиусом 2 км и на величину до 8 дБ – для зоны радиусом 50 км.

Процент местоположений  $p_L$  может меняться от 1% до 99%. Настоящая модель недействительна для процента местоположений менее 1% или более 99%.

Следует отметить, что, для некоторых целей планирования (например, для многосторонних планов частотных назначений), как правило, потребуется использовать определение "изменения местоположения", которое учитывает определенную степень замираний из-за многолучевости. Оно

будет учитывать случай подвижного приемника со стационарным положением в нуле многолучевости или случай антенны на крыше здания, где должно приниматься множество частот, и антенну совершенно невозможно расположить оптимально. Кроме того, при таком планировании может потребоваться учесть изменчивость для области, размеры которой больше тех, которые предполагаются в настоящей Рекомендации.

С учетом вышесказанного для планирования многих систем радиосвязи считаются приемлемыми значения, приведенные в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

**Значения стандартной девиации изменения местоположения,  
используемые в определенных сценариях планирования**

	Стандартная девиация		
	100 МГц	600 МГц	2 000 МГц
Аналоговое радиовещание	8,3	9,5	–
Цифровое радиовещание	5,5	5,5	5,5

Если приемник/мобильная станция расположены вблизи моря, то корректировка изменения местоположения применяться не должна.

Когда приемник/мобильная станция расположены на суше и вне здания, а его/ее высота над уровнем земли равна или выше высоты типичного отражающего препятствия, разумно предположить, что изменение местоположения будет монотонно уменьшаться с увеличением высоты до тех пор, пока в какой-то точке оно совершенно исчезнет. В настоящей Рекомендации изменение местоположения из-за изменения высоты  $u(h)$  определяется выражением:

$$\begin{aligned}
 u(h) &= 1 && \text{для } 0 \leq h < R, \\
 u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{для } R \leq h < R+10, \\
 u(h) &= 0 && \text{для } R+10 \leq h,
 \end{aligned} \tag{67}$$

где  $R$  (м) – высота типичного отражающего препятствия в месте размещения приемника/мобильной станции. Следовательно, для приемника/мобильной станции, находящихся вне зданий, стандартная девиация изменения местоположения,  $\sigma_L$ , определяемая либо из уравнения (66), либо по таблице 5, должна быть умножена на функцию изменения высоты  $u(h)$ , определяемую из уравнения (67), при расчете величины основных потерь передачи для значений  $p_L\%$ , не равных 50%.

#### 4.9 Потери на проникновение сигнала внутрь здания

Потери на проникновение сигнала внутрь здания определяются как разница (дБ) между средней напряженностью поля (с учетом местоположения) вне стен здания на данной высоте над уровнем земли и средней напряженностью поля внутри этого же здания (с учетом местоположения) на той же высоте над уровнем земли.

Для приема внутри зданий должны быть учтены два существенных параметра. Первый – потери на проникновение сигнала внутрь здания, а второй – изменение потерь на проникновение сигнала внутрь здания из-за различных строительных материалов. Приведенные далее значения стандартной девиации учитывают большой разброс потерь на проникновение в здания, но не учитывают изменение местоположения внутри различных зданий. Следует отметить, что имеется очень ограниченный объем достоверной информации о результатах измерения потерь на проникновение сигнала внутрь здания. Можно использовать ориентировочные значения потерь на проникновение сигнала внутрь здания, приведенные в таблице 6, ниже.



ТАБЛИЦА 6

Потери на проникновение сигнала внутрь здания<sup>(1)</sup>,  $L_{be}$ ,  $\sigma_{be}$ 

$F$	Среднее значение, $L_{be}$ (дБ)	Стандартная девиация, $\sigma_{be}$ (дБ)
0,2 ГГц	9	3
0,6 ГГц	11	6
1,5 ГГц	11	6

<sup>(1)</sup> Эти величины могут быть изменены после получения новых данных экспериментов.

Для частот ниже 0,2 ГГц  $L_{be} = 9$  дБ,  $\sigma_{be} = 3$  дБ; для частот выше 1,5 ГГц  $L_{be} = 11$  дБ,  $\sigma_{be} = 6$  дБ. Для частот от 0,2 ГГц до 0,6 ГГц (и от 0,6 ГГц до 1,5 ГГц) приемлемые значения  $L_{be}$  и  $\sigma_{be}$  можно определить при помощи линейной интерполяции между значениями  $L_{be}$  и  $\sigma_{be}$ , приведенными в таблице 6 для частот 0,2 ГГц и 0,6 ГГц (0,6 ГГц и 1,5 ГГц).

Изменение напряженности поля для приема внутри зданий – это комбинированный результат изменений напряженности поля вне зданий ( $\sigma_L$ ) и изменения из-за ослабления в здании ( $\sigma_{be}$ ). Эти значения, по всей вероятности, не коррелированы. Следовательно, стандартную девиацию для приема внутри зданий ( $\sigma_i$ ) можно рассчитать как квадратный корень из суммы квадратов отдельных значений стандартной девиации.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2}, \quad (68)$$

где  $\sigma_L$  – стандартная девиация изменения местоположения, определяемая из уравнения (66) или по таблице 5.

Например, для цифровых сигналов с шириной полосы более 1 МГц в диапазоне ОВЧ, где значения стандартной девиации составляют 5,5 дБ и 3 дБ, соответственно, комбинированное значение будет равно 6,3 дБ. В диапазоне IV/V, где значения стандартной девиации составляют 5,5 дБ и 6 дБ, комбинированное значение будет равно 8,1 дБ.

#### 4.10 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений

Для вычисления желаемого процента местоположений средние потери  $L_{loc}$  и стандартная девиация  $\sigma_{loc}$  описываются выражениями:

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{вне зданий}), \quad (69a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{внутри зданий}) \quad (69b)$$

и

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{вне зданий}), \quad (70a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{внутри зданий}), \quad (70b)$$

где средние потери на проникновение сигнала внутрь здания  $L_b$  приведены в таблице 6, функция высоты  $u(h)$  определяется из уравнения (67), а значения стандартной девиации  $\sigma_L$  и  $\sigma_i$  берутся из уравнения (66) (или таблицы 5) и уравнения (68), соответственно.

Основные потери передачи  $L_b$  (дБ), которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в  $p_L\%$  местоположений, определяются выражением:

$$L_b = \max \left\{ L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left( \frac{P_L}{100} \right) \cdot \sigma_{loc} \right\} \quad \text{дБ}, \quad (71)$$

где:

- $L_{b0p}$ : основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в 50% местоположений, обусловленные распространением по линии прямой видимости с кратковременными выбросами, определяемые уравнением (10);
- $L_{bc}$ : основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в 50% местоположений, с учетом влияния потерь из-за отражений от терминала, определяемые уравнением (65);
- $L_{loc}$ : среднее значение потерь в конкретном местоположении, определяемое уравнениями (69a)–(69b);
- $I(x)$ : обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности  $x$ . Аппроксимация зависимости  $I(x)$ , которая может использоваться для  $0,000001 \leq x \leq 0,999999$ , приведена в Дополнении 3 настоящего Приложения;
- $\sigma_{loc}$ : комбинированная стандартная девиация (т. е. учитывающая потери на проникновение сигнала внутрь здания и потери на изменение местоположения), определяемые уравнениями (70a)–(70b).

Процент местоположений  $p_L$  может меняться от 1% до 99%. Настоящая модель недействительна для процента местоположений менее 1% или более 99%.

#### 4.11 Напряженность поля, превышаемая в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений

Напряженность поля  $E_p$  дБ(мкВ/м), приведенная к эффективной излучаемой мощности 1 кВт, превышаемая в течение  $p\%$  времени и в 50% местоположений, может быть рассчитана с использованием формулы:

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{дБ(мкВ/м)}, \quad (72)$$

где:

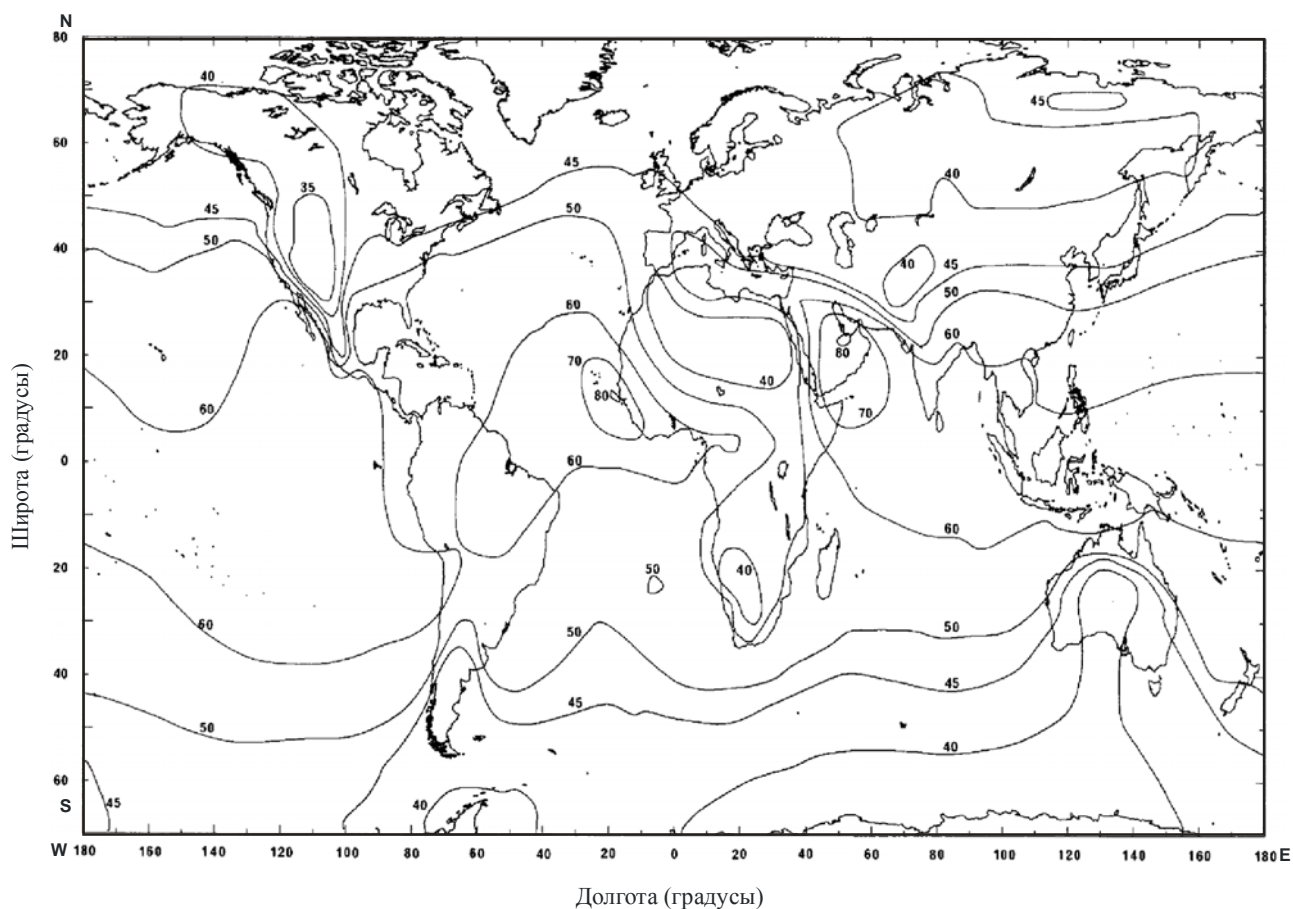
- $L_b$ : основные потери передачи, которые не превышаются в течение  $p\%$  времени и в  $p_L\%$  местоположений, рассчитанные по уравнению (71);
- $f$ : требуемая частота (ГГц).

## Дополнение 1 к Приложению 1

### Радиометеорологические данные, необходимые для выполнения процедуры прогнозирования

На рисунке 1 показаны среднегодовые показатели  $\Delta N$  в виде положительных величин, выраженных в значениях N-единиц/км.

РИСУНОК 1

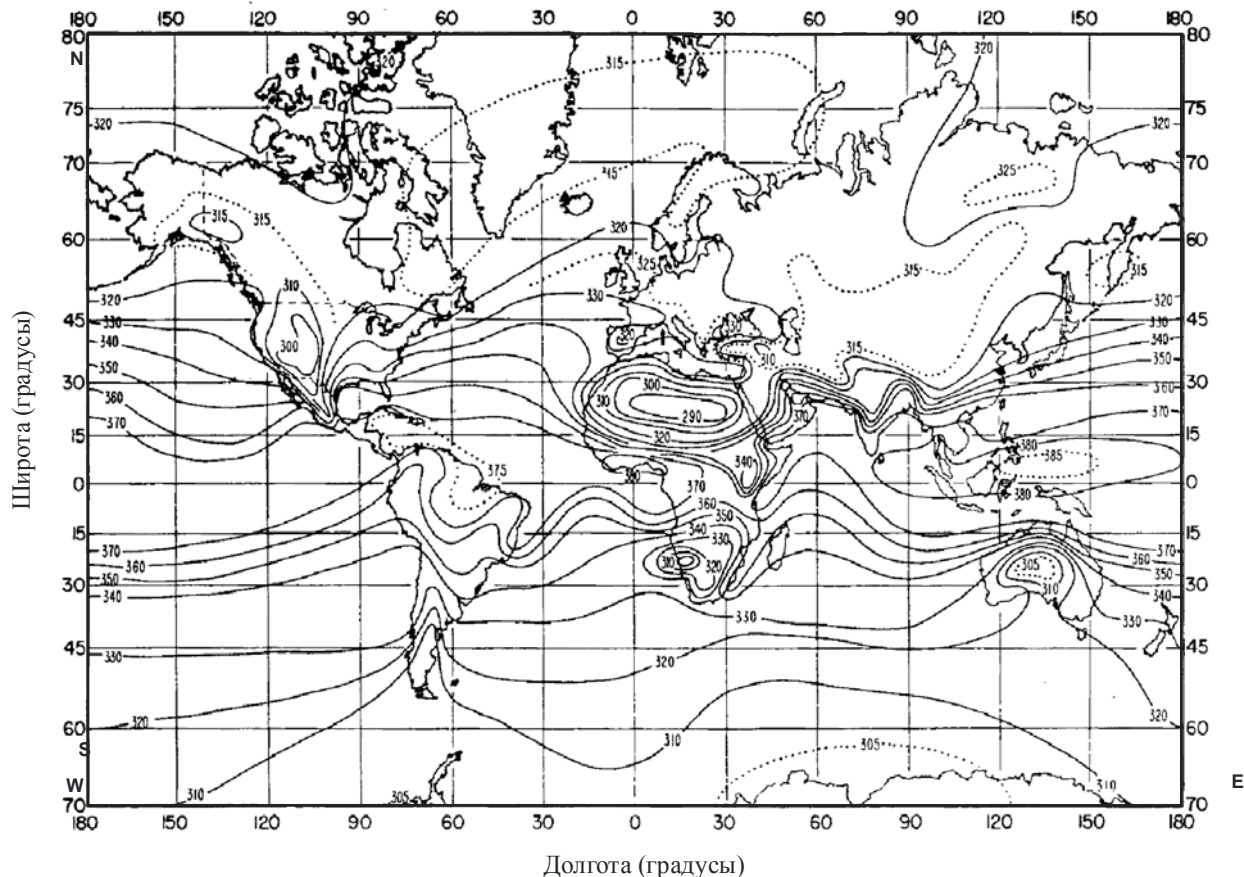
Среднегодовые показатели  $\Delta N$ , N-единиц/км

P.1812-01

На рисунке 2 показаны среднегодовые показатели рефракции на уровне морской поверхности  $N_0$  в значениях N-единиц. Параметр  $N_0$  используется только в той части общего метода, которая относится к тропосферному рассеянию.

РИСУНОК 2

Среднегодовые показатели рефракции на уровне морской поверхности, N-единиц



P.1812-02

## Дополнение 2 к Приложению 1

### Анализ профиля трассы

#### 1 Введение

Для выполнения анализа профиля трассы требуется иметь профиль высот поверхности земли над средним уровнем моря для каждой трассы. Параметры, которые необходимо получить в результате анализа профиля трассы для составления модели распространения, показаны в таблице 7.

#### 2 Формирование профиля трассы

На основании географических координат передающей ( $\varphi_t, \psi_t$ ) и приемной ( $\varphi_r, \psi_r$ ) станций, из базы топографических данных или из соответствующих топографических карт большого масштаба необходимо получить значения высоты земной поверхности (над средним уровнем моря) вдоль трассы по дуге большого круга. Разрешающая способность профиля по расстоянию должна быть такой, какая требуется для данного типа рельефа местности. Как правило, в зависимости от задачи, берется шаг расстояния от 30 м до 1 км. Для более длинных трасс обычно используются большие



ТАБЛИЦА 7

## Определения параметров профиля трассы

Параметр	Описание
$a_e$	Эффективный радиус Земли (км)
$d$	Расстояние по дуге большого круга (км)
$d_{ii}$	Длина приращения для регулярных (т. е. с равномерно распределенными точками) данных профиля трассы (км)
$f$	Частота (ГГц)
$\lambda$	Длина волны (м)
$h_{ts}$	Высота антенны передатчика (м) над средним уровнем моря (amsl)
$h_{rs}$	Высота антенны приемника (м) (amsl)
$\theta_t$	Для загоризонтной трассы угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от передающей антенны. Для трассы LoS эта величина должна быть равна углу места приемной антенны.
$\theta_r$	Для загоризонтной трассы угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от приемной антенны. Для трассы LoS эта величина должна быть равна углу места передающей антенны.
$\theta$	Угловое расстояние трассы (мрад)
$h_{st}$	Высота гладкой земной поверхности (amsl) в месте размещения передающей станции (м)
$h_{sr}$	Высота гладкой земной поверхности (amsl) в месте размещения приемной станции (м)
$h_i$	Высота $i$ -й точки земной поверхности amsl (м) $h_l$ : высота земной поверхности в точке размещения передатчика $h_n$ : высота земной поверхности в точке размещения приемника
$h_m$	Неровность земной поверхности (м)
$h_{te}$	Эффективная высота передающей антенны (м)
$h_{re}$	Эффективная высота приемной антенны (м)

## 3 Протяженность трассы

Протяженность трассы можно рассчитать с использованием геометрии большого круга, зная географические координаты передающей ( $\varphi_t, \psi_t$ ) и приемной ( $\varphi_r, \psi_r$ ) станций. Кроме того, протяженность трассы может быть рассчитана из профиля трассы. Протяженность трассы  $d$  (км) можно рассчитать, используя данные профиля трассы:

$$d = d_n \quad \text{км.} \quad (73)$$

Для равномерно распределенных данных профиля трассы верным является также и выражение:

$$d_i = (i-1) \cdot d_{ii} \quad \text{км} \quad (74)$$

для  $i = 1, \dots, n$ , где  $d_{ii}$  – длина приращения (км).

#### 4 Классификация трасс

Профиль трассы должен быть либо линией прямой видимости (LoS), либо загоризонтной линией, что определяется на основании среднего эффективного радиуса Земли  $a_e$ , найденного из уравнения (7а).

Трасса является загоризонтной, если угол места физического горизонта, наблюдаемый с точки размещения передающей антенны (относительно местного горизонта), больше чем угол (опять-таки относительно местного горизонта передатчика), образуемый приемной антенной.

Следовательно, условием загоризонтной трассы является:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{мрад,} \quad (75)$$

где:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{мрад;} \quad (76)$$

$\theta_i$ : угол места в направлении  $i$ -й точки земной поверхности;

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{мрад,} \quad (77)$$

где:

$h_i$ : высота  $i$ -й точки земной поверхности (м) amsl;

$h_{ts}$ : высота антенны передатчика (м) amsl;

$d_i$ : расстояние от передатчика до  $i$ -той точки земной поверхности (км);

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{мрад,} \quad (78)$$

где:

$h_{rs}$ : высота приемной антенны (м) amsl;

$d$ : общее расстояние по дуге большого круга (км);

$a_e$ : средний эффективный радиус Земли, приемлемый для данной трассы (см. уравнение (7а)).

#### 5 Получение необходимых параметров из профиля трассы

##### 5.1 Все трассы

Параметры, которые должны быть получены из профиля трассы, перечислены в таблице 7.

##### 5.1.1 Угол места горизонта передающей антенны над уровнем местного горизонта $\theta_t$

Угол места горизонта для передающей антенны относительно местного горизонта определяется следующим выражением:

$$\theta_t = \max (\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{мрад,} \quad (79)$$

где  $\theta_{max}$  определяется из уравнения (76). Таким образом, для трассы LoS угол места горизонта для передающей антенны – это угол места относительно прямой линии до приемной антенны.

### 5.1.2 Расстояние прямой видимости для передающей антенны $d_{it}$

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от передатчика, при котором из уравнения (76) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{it} = d_i \quad \text{км} \quad \text{для максимального } (\theta_i). \quad (80)$$

Для трассы LoS номер  $i$  должен соответствовать значению, при котором параметр дифракции  $v$  в уравнении (15) принимает максимальное значение.

### 5.1.3 Угол места горизонта приемной антенны над уровнем местного горизонта $\theta_r$

Для трассы LoS  $\theta_r$  определяется выражением:

$$\theta_r = \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} - 10^3 \frac{d}{2a_e} \quad \text{мрад.} \quad (81)$$

В ином случае  $\theta_r$  определяется выражением:

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{мрад,} \quad (82)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2a_e} \quad \text{мрад.} \quad (82a)$$

### 5.1.4 Расстояние прямой видимости для приемной антенны $d_{ir}$

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от приемника, при котором из уравнения (82) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{ir} = d - d_j \quad \text{км} \quad \text{для максимального } (\theta_j) \quad (83)$$

Для трассы LoS  $\theta_r$  определяется следующим образом:

$$d_{ir} = d - d_{it} \quad (\text{км}) \quad (83a)$$

### 5.1.5 Угловое расстояние $\theta$ (мрад)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{мрад.} \quad (84)$$

## 5.1.6 Модель "гладкой земной поверхности" и эффективные высоты антенн

### 5.1.6.1 Общее описание

"Гладкую земную" поверхность получают из профиля для расчета эффективных высот антенн как для дифракционной модели, так и для оценки неровностей трассы, требуемой для модели распространения в атмосферном волноводе за счет отражения от слоев атмосферы. Определения эффективных высот антенн отличаются от этих двух целей. В § 5.1.6.2 описывается определение высот гладкой земной поверхности без корректировки в месте размещения передатчика и приемника,  $h_{st}$  и  $h_{sr}$  соответственно. В § 5.1.6.3 и 5.1.6.4 описываются получение эффективных высот антенн для дифракционной модели,  $h_{ted}$  и  $h_{red}$ , и расчет параметра неровности земной поверхности,  $h_m$ , соответственно.



### 5.1.6.2 Определение гладкой земной поверхности

Получим простую линейную аппроксимацию высот земной поверхности над средним уровнем моря (amsl) в виде:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{м,} \quad (85)$$

где:

$h_{si}$ : высота (м) amsl поверхности, подобранной по методу наименьших квадратов, на расстоянии  $d_i$  (км) от передатчика;

$h_{st}$ : высота (м) amsl гладкой земной поверхности в точке начала трассы, т. е. в месте размещения передатчика;

$m$ : наклон (м/км) поверхности, подобранной по методу наименьших квадратов, относительно уровня моря.

Для следующих двух этапов расчетов существуют альтернативные методы. Если точки профиля распределены равномерно, должны использоваться уравнения (86а) и (87а). Если точки профиля распределены неравномерно, должны использоваться более сложные уравнения (86б) и (87б), причем уравнения (86б) и (87б) могут использоваться в обоих случаях.

Для профилей с равномерно распределенными точками:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_a) \left( d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{м/км.} \quad (86a)$$

Для любых профилей:

$$m = \left( \frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=2}^n 3(d_i - d_{i-1})(d_i + d_{i-1} - d)(h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{м/км,} \quad (86b)$$

где:

$h_i$ : реальная высота  $i$ -й точки земной поверхности (м) amsl;

$h_a$ : среднее значение реальных высот трассы amsl от  $h_0$  до  $h_n$  включительно (м), определяемое выражением:

для профилей с равномерно распределенными точками:

$$h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad \text{м;} \quad (87a)$$

для любых профилей взвешенное среднее значение вычисляется:

$$h_a = \left( \frac{1}{2d} \right) \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad \text{м.} \quad (87b)$$

Теперь рассчитаем высоту гладкой земной поверхности в точке размещения передающей станции  $h_{st}$ , используя выражение:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{м.} \quad (88)$$

Отсюда высота гладкой земной поверхности в точке размещения приемной станции  $h_{sr}$  определяется выражением:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{м.} \quad (89)$$

### 5.1.6.3 Эффективные высоты антенн для дифракционной модели

Найдем наибольшую высоту препятствия на прямой трассе от передатчика к приемнику  $h_{obs}$  и углы места горизонта для передающей и приемной антенн,  $\alpha_{obt}$  и  $\alpha_{obr}$ , основанные на геометрии плоской Земли согласно:

$$h_{obs} = \max\{h_{obi}\} \quad \text{м,} \quad (90a)$$

$$\alpha_{obt} = \max\{h_{obi} / d_i\} \quad \text{град,} \quad (90b)$$

$$\alpha_{obr} = \max\{h_{obi} / (d - d_i)\} \quad \text{град,} \quad (90c)$$

где:

$$h_{obi} = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{м} \quad (90d)$$

и номер профиля  $i$  принимает значения от 2 до  $(n-1)$ .

Рассчитаем предварительные значения высот гладкой земной поверхности на сторонах передатчика и приемника:

Если  $h_{obs}$  меньше или равно 0, то:

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{м над уровнем моря,} \quad (91a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (91b)$$

в ином случае:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs} g_t \quad \text{м над уровнем моря,} \quad (91c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs} g_r \quad \text{м над уровнем моря,} \quad (91d)$$

где:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}), \quad (91e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}). \quad (91f)$$

Рассчитаем окончательные значения высот гладкой земной поверхности на сторонах передатчика и приемника, требуемые для дифракционной модели:

Если  $h_{stp}$  больше чем  $h_1$ , то:

$$h_{std} = h_1 \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (92a)$$

в ином случае:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{м над уровнем моря.} \quad (92b)$$

Если  $h_{srp}$  больше чем  $h_n$ , то:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (92c)$$

в ином случае:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{м над уровнем моря.} \quad (92d)$$

#### 5.1.6.4 Параметры для модели распространения в атмосферном волноводе/за счет отражения от слоев атмосферы

Рассчитаем высоты гладкой земной поверхности в месте размещения передатчика и приемника, как это требуется для коэффициента неровности, определяемого выражением:

$$h_{str} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{м}; \quad (93a)$$

$$h_{srr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{м}. \quad (93b)$$

Если какое-либо значение  $h_{st}$  или  $h_{sr}$  или они оба были изменены в соответствии с уравнениями (80a) или (80b), то также должен быть скорректирован и наклон  $m$  гладкой земной поверхности:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{м/км}. \quad (94)$$

Эффективные высоты терминалов для модели распространения в атмосферном волноводе за счет отражения от слоев атмосферы,  $h_{te}$  и  $h_{res}$ , определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_1 - h_{st} & \text{м}; \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{м}. \end{aligned} \quad (95)$$

Параметр неровности земной поверхности  $h_m$  (м) – это максимальная высота земли над гладкой земной поверхностью на участке трассы между точками горизонта (включая эти точки):

$$h_m = \max_{i=i_{lr}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{м}, \quad (96)$$

где:

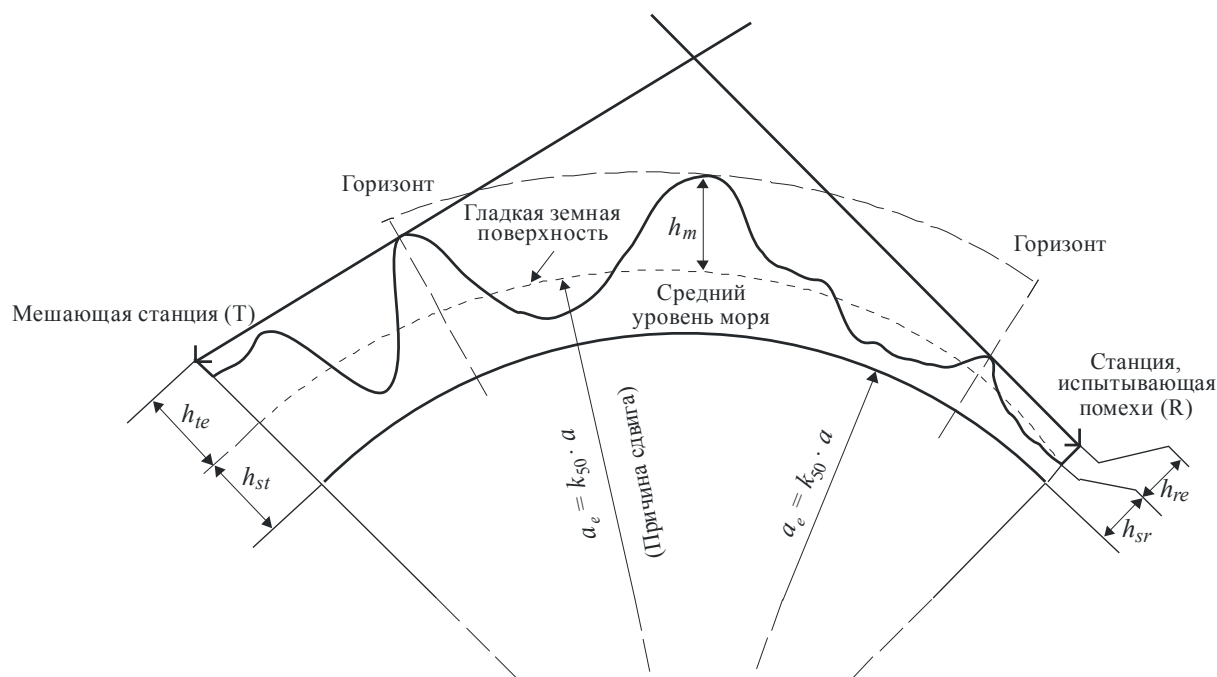
$i_{lr}$ : номер точки профиля на расстоянии  $d_{lr}$  от передатчика;

$i_{lr}$ : номер точки профиля на расстоянии  $d_{lr}$  от приемника.

Гладкая земная поверхность и параметр неровности земной поверхности  $h_m$  показаны на рисунке 4.

РИСУНОК 4

Пример гладкой земной поверхности и параметр неровности земной поверхности



### Дополнение 3 к Приложению 1

#### Аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения

Приведенная далее аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения действительна для  $0,000001 \leq x \leq 0,999999$  и дает ошибку не более 0,00054. Если  $x < 0,000001$ , что предполагает  $\beta_0 < 0,0001\%$ , то  $x$  должен быть установлен в значение 0,000001. Аналогичные действия должны быть выполнены и для  $x > 0,999999$ . Эта аппроксимация может уверенно использоваться для интерполяционной функции в уравнениях (30b) и (59), а также в уравнении (61). Однако в последнем уравнении значение  $x$  должно быть ограничено:  $0,01 \leq x \leq 0,99$ .

Функция  $I(x)$  определяется выражением:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{для } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (97a)$$

и симметрично:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{для } 0,5 < x \leq 0,999999, \quad (97b)$$

где:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}; \quad (98a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1}; \quad (98b)$$

$$C_0 = 2,515516698; \quad (98c)$$

$$C_1 = 0,802853; \quad (98d)$$

$$C_2 = 0,010328; \quad (98e)$$

$$D_1 = 1,432788; \quad (98f)$$

$$D_2 = 0,189269; \quad (98g)$$

$$D_3 = 0,001308. \quad (98h)$$

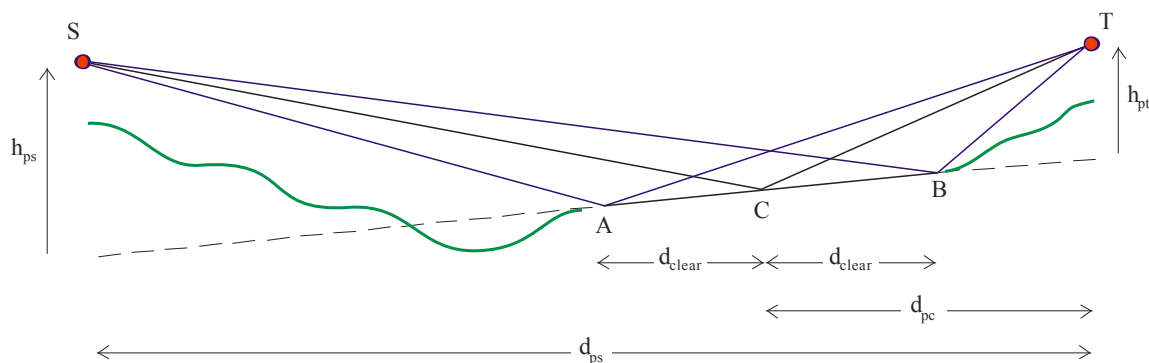
## Дополнение 4 к Приложению 1

### Критерии отражения от земли и вычисление первого максимума отражения

В настоящем Дополнении приводятся критерии для определения ситуаций, которые поддерживают модель двухлучевого отражения от земли. Необходимая информация о трассе обычно требует детального осмотра окружающей терминал местности или использования топографических данных высокого разрешения с разрешением и точностью лучше 1 метра. Если критерии удовлетворены, может быть вычислена высота первого двухлучевого интерференционного максимума. Ввиду того, что это представляет особую точку на распределении уровня многолучевого сигнала, данный метод не должен использоваться для расчета изменения местоположения, описанного в § 4.8 Рекомендации, и не подходит для расчетов распространения сигналов "из точки в зону".

РИСУНОК 5

Требуемая геометрия для отражений от земли



P.1812-05

На рисунке 5 показана геометрия, необходимая для отражения от земли. Точка Т справа – это рассматриваемый терминал. Точка S – точка источника отражения, которой является другой терминал трассы LoS, или радиогоризонт Т для загоризонтной трассы.

Условный профиль показан изогнутой зеленой линией. Часть профиля между точками А и В должна быть определена как плоская и гладкая, и должны иметься прямая видимость и полный зазор Френеля для линий S-A, S-B, A-T и B-T.

В настоящем Дополнении используются самосогласованные единицы измерения.

Точка С является точкой зеркального отражения в центре линии А-В с расстоянием  $d_{cp}$  от терминала, определяемым по формуле:

$$d_{pc} = d_{ps} h_{ps} / (h_{ps} + h_{pt}) , \quad (99)$$

где  $h_{ps}$  и  $h_{pt}$  – высоты S и T, соответственно, над продолжением линии А-В.

Требуемый радиус зазора Френеля  $r_{clear}$  в точке С определяется выражением:

$$r_{clear} = 0,6 \sqrt{\lambda d_{pc} (d_{ps} - d_{pc}) / d_{ps}} , \quad (100)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Отражающая поверхность должна быть плоской и гладкой, и должна иметься прямая видимость до точек S и T для зоны вплоть до  $r_{clear}$  с каждой стороны трассы (т. е. и слева, и справа) от точки T до другого терминала.

Требуемое расстояние зазора  $d_{clear}$  по обе стороны от точки C по линии радиотрассы может быть приблизительно определено выражением:

$$d_{clear} \approx r_{clear} d_{pc} / h_{pt}. \quad (101)$$

Критерии плоскостности и гладкости отражающей поверхности определяются выражением:

$$\Delta \approx \frac{\lambda d_{pc}}{10h_{pt}}, \quad (102)$$

где  $\Delta$  – допустимое отклонение отражающей поверхности от идеальной плоскости. В небольших масштабах это должно толковаться как неровность поверхности, а по всей зоне – как плоскость.

Если вышеперечисленные критерии удовлетворены, значение  $R$  в уравнении (64b) может быть рассчитано по формуле:

$$R = \frac{\lambda d_{ps}}{4h_{pt}}. \quad (103)$$

Если значение  $R$ , рассчитанное по формуле (103), используется в уравнении (64b), по мере уменьшения высоты терминала ниже  $R$  более хорошее приближение дается модели с плоской землей и двумя лучами для скользяще-наклонного отражения. С уменьшением высоты терминала плоская гладкая отражающая поверхность, показанная на рисунке 5, должна быть расширена в направлении терминала, эквивалентно перемещению точки B на рисунке вправо.

Коррекция усиления, определяемого высотой, также может быть рассчитана с использованием явного двухлучевого суммирования согласно выражению:

$$A_h = 20 \log \left[ 1 + \rho \exp \left( -j \frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right], \quad (104)$$

где:

- $\rho$  : комплексный коэффициент отражения, который для скользящего падения может быть оценен как реальное значение, приблизительно равное  $-0,95$ ;
- $\delta$  : различие в длине трассы, определяемое выражением:

$$\delta = \frac{2h_{ps}h_{pt}}{d_{ps}}. \quad (105)$$

Если применяется уравнение (104), значение  $A_h$  будет равно +6 дБ при  $h_{pt} = R$ . В этой точке будет несогласованность с уравнением (64b). По мере уменьшения  $h_{pt}$  относительно  $R$  уравнение (104) будет все более приближаться к уравнению (64b). Если уравнение (104) используется при  $h_{pt}$  ниже  $R$ , должно быть принято во внимание вышеуказанное предупреждение о степени отражающей поверхности. Если уравнение (104) используется при  $h_{pt}$  выше  $R$ , отражающая поверхность должна находиться на соответствующем большем расстоянии от терминала, и также должна быть учтена возможность того, что расстояние от источника  $d_s$  может увеличиться, т. е. положение точки S на рисунке 5 может измениться. Этой последней проблемы можно избежать при использовании данного метода отражения только для трассы LoS.