

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1817\*

**Данные о распространении радиоволн, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве**

(Вопрос МСЭ-R 228/3)

(2007)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации содержатся данные о распространении сигнала, требуемые для разработки оптических линий для связи в свободном пространстве (FSO) и для планирования оптических систем связи в свободном пространстве в соответствующих областях применения, указанных в Рекомендации.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что в условиях Земли для радиосвязи доступен видимый оптический и инфракрасный спектр;
- b) что для правильного планирования оптических систем для радиосвязи в свободном пространстве (FSO), работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра, необходимы соответствующие данные о распространении сигналов;
- c) что разработаны методы, которые позволяют рассчитывать наиболее важные параметры распространения, необходимые для планирования оптических систем связи в свободном пространстве, работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра;
- d) что, насколько возможно, эти методы были проверены для доступных данных, и было показано, что они обеспечивают точность, которая как совместима с естественными изменениями свойств распространения, так и пригодна для большинства существующих применений при планировании систем, работающих в участках видимого оптического и инфракрасного спектра,

*признавая,*

- a) что в п. 78 Статьи 12 Конвенции МСЭ говорится, что функции Сектора радиосвязи включают в себя "...проведение исследований без ограничения диапазона частот и принятие рекомендаций...",

*рекомендует,*

**1** что методы предсказания параметров распространения, приведенные в Приложении I должны использоваться для планирования оптических систем связи в свободном пространстве в соответствующих областях применения, указанных в настоящем Приложении.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Дополнительная информация, относящаяся к методам предсказания параметров распространения для частот видимого и инфракрасного спектра содержится в Рекомендации МСЭ-R по методам предсказания, необходимым для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве.

---

\* Данная Рекомендация должна быть доведена до сведения 1-й и 9-й Исследовательских комиссий по радиосвязи.

## Приложение 1

### 1 Атмосфера

Работа оптических линий связи FSO нарушается из-за поглощения и рассеяния света под воздействием атмосферы Земли. Атмосфера взаимодействует со светом благодаря своему составу, в который, обычно, входит множество различных видов молекул и небольших частичек распыленных веществ, которые называются аэрозолями. Результатом такого взаимодействия могут быть самые разные явления: частотно-селективное поглощение, рассеяние и сцинтилляция.

- Частотно-селективное поглощение на определенных длинах оптических волн является результатом взаимодействия фотонов и атомов или молекул, которое приводит к угасанию затронутых фотонов, повышению температуры и радиоактивному излучению.
- Атмосферное рассеяние является результатом взаимодействия фотонов и атомов или молекул среды распространения. Рассеяние приводит к угловому перераспределению излучения, как с изменением, так и без изменения длины волны.
- Сцинтилляция является результатом термической турбулентности в среде распространения, которая приводит к появлению случайно распределенных ячеек. Эти ячейки имеют различные размеры (от 10 см до 1 км), температуры и индексы рефракции, что вызывает рассеяние, многолучевость и изменение углов прихода лучей. В результате амплитуда принимаемого сигнала флуктуирует с частотами от 0,01 до 200 Гц. Сцинтилляция приводит также к искажению фронта сигнала, и, следовательно, к расфокусировке луча.

Кроме того, на качество работы линии FSO может влиять солнечный свет, когда солнце светит параллельно направлению оптической линии для связи в свободном пространстве.

### 2 Молекулярное поглощение в оптических линиях для связи в свободном пространстве

Молекулярное поглощение является результатом взаимодействия оптического излучения с атомами и молекулами среды ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $Ag$  и т. д.). Коэффициент поглощения зависит от типа и концентрации молекул газов. Изменение значения коэффициента поглощения для различных частот определяет спектр поглощения. Природа этого спектра обусловлена изменениями возможных уровней энергии газа, создаваемой, главным образом, за счет переходов электронов, колебаний атомов и вращения молекул. Увеличение давления или температуры приводит к расширению спектральных линий поглощения при снижении наиболее высоких уровней энергии за счет эффекта Доплера. Молекулярное поглощение – это селективное явление, которое приводит к появлению относительно прозрачных атмосферных окон прозрачности, и относительно мутных атмосферных полос поглощения.

Окна прозрачности в оптическом диапазоне таковы:

- Видимый спектр и ближний ИК диапазон: от 0,4 до 1,4 мкм;
- Ближний инфракрасный диапазон или ИК I: от 1,4 до 1,9 мкм и от 1,9 до 2,7 мкм;
- Средний инфракрасный диапазон или ИК II: от 2,7 до 4,3 мкм и от 4,5 до 5,2 мкм;
- Дальний инфракрасный диапазон или ИК III: от 8 до 14 мкм;
- Удаленный инфракрасный диапазон или ИК IV: от 16 до 28 мкм.

Молекулы газов обладают различными уровнями энергии, и могут поглощать энергию (или фотоны) под воздействием проходящего электромагнитного излучения и переходить с исходного уровня энергии  $e_i$  на более высокий уровень энергии  $e_f$ . Таким образом, в результате потери одного или нескольких фотонов энергия излучения ослабляется.

Этот процесс происходит только тогда, когда частота проходящего сигнала точно равна одной из резонансных частот рассматриваемой молекулы, которая определяется уравнением:

$$\nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h}, \quad (1)$$

где:

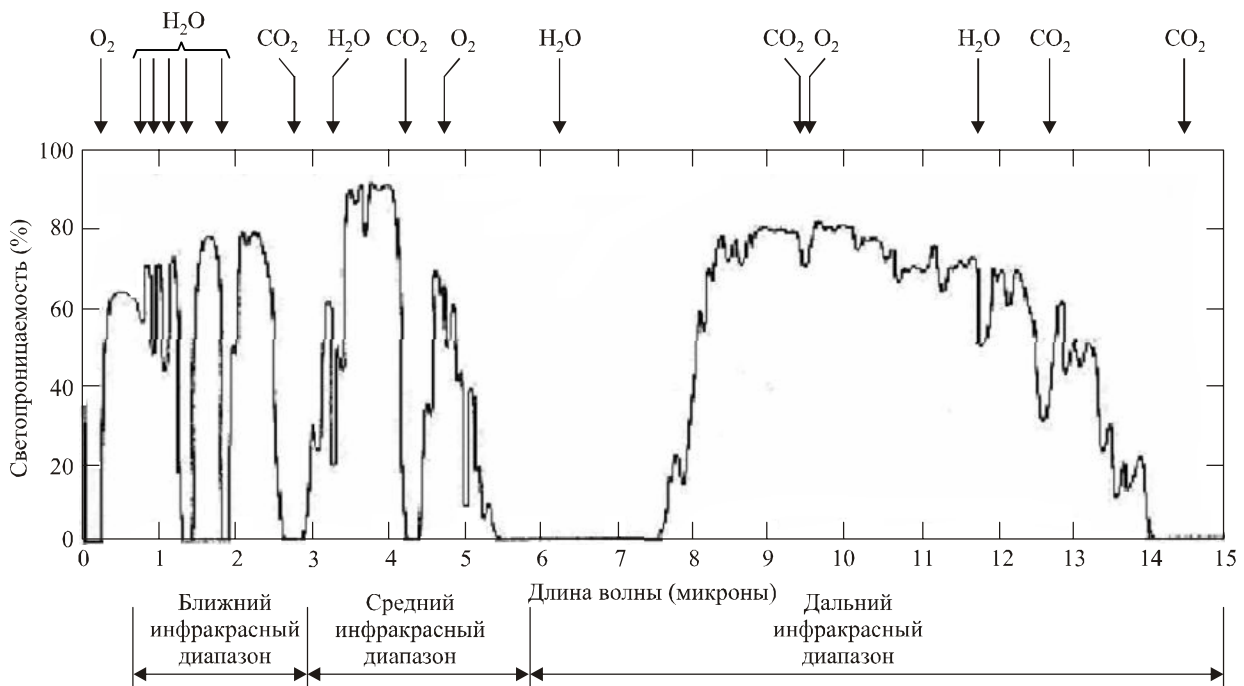
$\nu_0$ : частота проходящего сигнала (Гц);  
 $h$ : постоянная Планка,  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  J·s.

Основными параметрами, которые определяют поглощение, создаваемое молекулярным резонансом, являются: возможные уровни энергии для каждого вида молекул, вероятность перехода с уровня энергии  $e_i$  на уровень энергии  $e_f$ . Интенсивность резонансных линий в спектре и естественный профиль каждой линии.

Как правило, профиль каждой линии поглощения изменяется из-за эффекта Доплера, когда молекулы движутся относительно проходящего сигнала, и под влиянием столкновений, происходящих в ходе взаимодействия молекул. Эти явления приводят к расширению естественной спектральной линии каждой молекулы. Для некоторых молекул, например двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), водяных паров ( $\text{H}_2\text{O}$ ), азота ( $\text{N}_2$ ) и кислорода ( $\text{O}_2$ ), профили линий поглощения могут простираются на довольно большие расстояния от центральной линии. Это свойство приводит к формированию континуума поглощения. На рисунке 1 показана номинальная измеренная светопрозрачность атмосферы из-за молекулярного поглощения на горизонтальной линии, расположенной на высоте 1820 от уровня моря.

РИСУНОК 1

Светопрозрачность атмосферы из-за молекулярного поглощения



1817-01

### 3 Молекулярное рассеяние

Молекулярное рассеяние является результатом взаимодействия света с частичками атмосферы, размеры которых меньше длины волны проходящего сквозь них света. Рассеяние на молекулах атмосферных газов (рэлеевское рассеяние) также вносит свой вклад в общее ослабление электромагнитного излучения.

Коэффициент ослабления из-за молекулярного рассеяния,  $\beta_m(\lambda)$ , равен:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left( \frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left( \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \right), \quad (2)$$

где:

$\beta_m(\lambda)$ : коэффициент молекулярного рассеяния ( $\text{км}^{-1}$ );

$\lambda$ : длина волны ( $\text{мкм}$ );

$\rho$ : молекулярная плотность ( $\text{м}^{-3}$ );

$\delta$ : коэффициент деполяризации воздуха ( $\cong 0,03$ );

$n(\lambda)$ : коэффициент рефракции воздуха.

Примерное значение коэффициента  $\beta_m(\lambda)$  равно:

$$\beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4}, \quad (3)$$

где:

$$A = 1,09 * 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \text{км}^{-1} \text{ м}^4 \quad (4)$$

и

$P$ : атмосферное давление ( $\text{мбар}$ );

$P_0$ : 1013 мбар;

$T$ : атмосферная температура ( $\text{К}$ ), и

$T_0$ : 273,15 К.

На длинах волны инфракрасного излучения молекулярным рассеянием можно пренебречь, а рэлеевское рассеяние воздействует, главным образом, на сигналы с длинами волн от ультрафиолетовых до волн видимого диапазона. Синий цвет неба обусловлен именно таким рассеянием.

#### 4 Поглощение в неоднородностях атмосферы

Распыленные неоднородности представляют собой чрезвычайно мелкие частички твердых или жидких веществ, распыленные в атмосфере и имеющие очень медленную скорость падения (лед, пыль, дым и т. д.). Их размеры, как правил, лежат в пределах от  $10^{-2}$  до 100 мкм. Примерами неоднородностей атмосферы являются туман, пыль и морские брызги.

Влияние неоднородностей атмосферы на условия ослабления сигнала в атмосфере зависит от их химического состава, размера и концентрации. В морских условиях неоднородности атмосферы, главным образом, формируются из капелек воды (пена, туман, изморось, дождь), кристаллов соли и различных частичек континентального происхождения. Тип и плотность частичек континентального происхождения зависит от расстояния до ближайшего побережья и от его характеристик.

Коэффициент ослабления из-за поглощения в неоднородностях атмосферы  $\alpha_n(\lambda)$  равен:

$$\alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_a \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{км}^{-1}, \quad (5)$$

где:

$\lambda$ : длина волны ( $\text{мкм}$ );

$dN(r)/dr$ : распределение размеров частичек в единице объема ( $\text{см}^{-4}$ );

$n''$ : мнимая часть индекса рефракции  $n$  рассматриваемого типа неоднородностей;

$r$ : радиус отдельной частицы (см);

$Q_a(2\pi r/\lambda, n'')$ : эффективное сечение поглощения для рассматриваемого типа неоднородностей.

Теория Ми предсказывает как электромагнитное поле рассеивается на однородных атмосферных частицах. Эффективное сечение поглощения ( $Q_a$ ) и отражения ( $Q_d$ ) зависят от размеров частицы, индекса рефракции и длины падающей волны. Они определяют ту часть падающей волны, для которой поглощенная (отраженная) энергия равна энергии падающего сигнала.

Индекс рефракции распыленных неоднородностей зависит от их химического состава и длины волны. Он обозначается как  $n = n' + n''$ , где  $n'$  – функция отражающей способности частицы, а  $n''$  – функция поглощения частицы.

В участках спектра видимого и ближнего инфракрасного излучений, мнимая часть индекса рефракции чрезвычайно мала, и при вычислении общего ослабления (затухания) ею можно пренебречь. В участках спектра дальнего инфракрасного излучения мнимую часть индекса рефракции необходимо учитывать.

## 5 Отражение от неоднородностей атмосферы

Отражение от неоднородностей атмосферы (Отражение Ми) возникает, когда размер частицы имеет тот же порядок, что и длина волны падающего на нее света. Ослабление – это функция частоты и заметности, а заметность связана с распределением размеров частиц. Это явление формирует самый ограничивающий фактор для систем оптической связи в свободном пространстве на дальние расстояния. В оптическом участке спектра оно обусловлено, главным образом, водяной пылью и туманом. Ослабление в оптическом режиме может достигать 300 дБ/км, для сравнения в диапазоне миллиметровых волн, ослабление в дожде составляет, как правило, всего несколько дБ/км.

Коэффициент ослабления из-за отражений от неоднородностей атмосферы  $\beta_n$  определяются следующим соотношением:

$$\beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^{\infty} Q_d\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'\right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{км}^{-1}, \quad (6)$$

где:

$\lambda$ : длина волны (мкм);

$dN(r)/dr$ : распределение размеров частиц на единицу объема ( $\text{см}^{-4}$ );

$n'$ : действительная часть индекса рефракции  $n$  распыленных неоднородностей;

$r$ : радиус отдельной частицы (см);

$Q_d(2\pi r/\lambda, n')$ : эффективное сечение отражения для рассматриваемого типа неоднородностей.

Теория Ми предсказывает величину коэффициента отражения  $Q_d$  из-за действия распыленных неоднородностей, в предположении, что частицы имеют сферическую форму и распределены достаточно равномерно, так что поле рассеяния можно рассчитать, предполагая (однократное) отражение в дальней зоне.

Эффективное сечение отражения  $Q_d$  сильно зависит от размеров распыленного вещества по сравнению с длиной волны, и эта функция очень сильно зависит от частоты для тех частичек, радиус которых меньше длины волны. Оно достигает своего максимума (3,8) для радиуса частицы равного длине волны, в этом случае отражение максимально. С увеличением размера частиц, эффективное сечение отражения асимптотически приближается к значению, равному примерно 2.

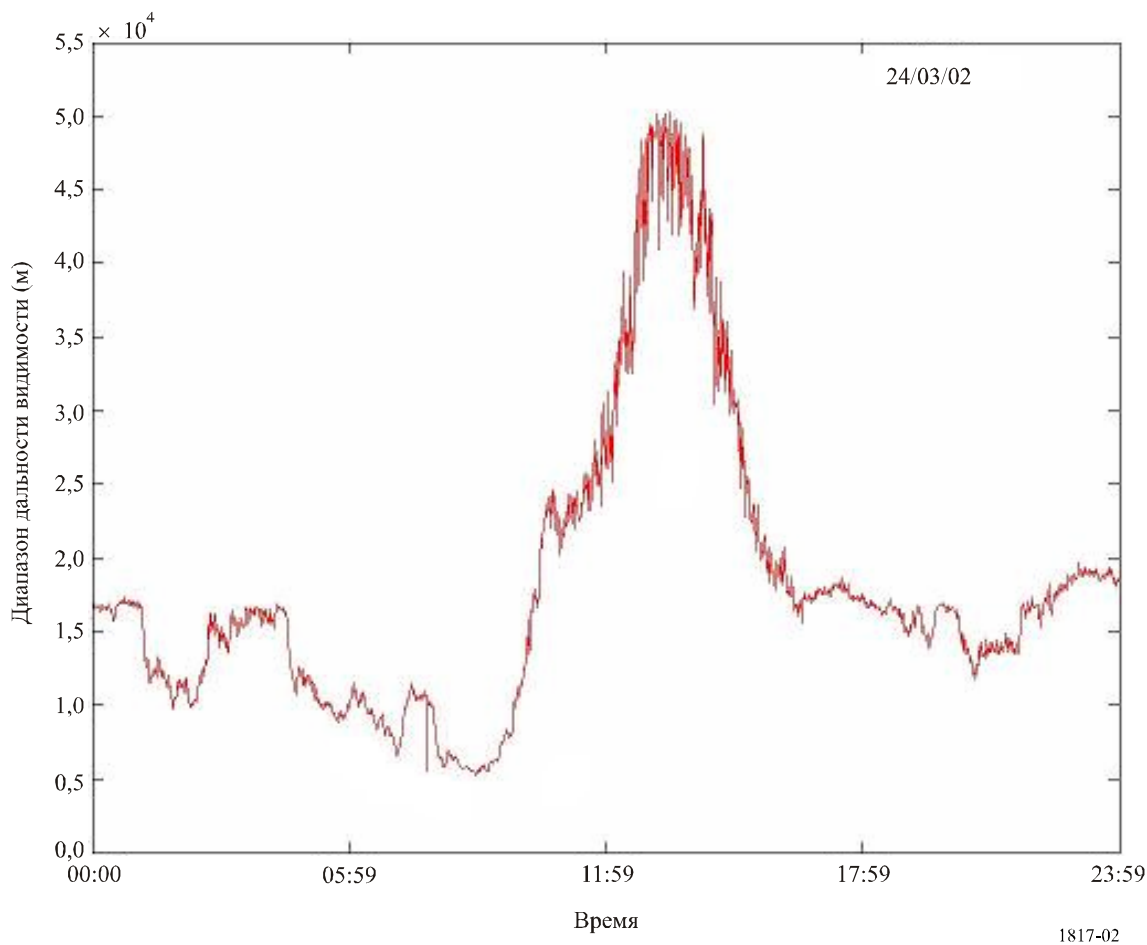
Поскольку концентрация распыленного вещества, его состав и распределение размеров изменяются во времени и в пространстве, ослабление в распыленном веществе предсказать трудно. Хотя концентрация тесно связана с оптической видимостью, не существует точной связи между размерами частиц и значением видимости.

Видимость определяет прозрачность атмосферы с точки зрения человека. Она измеряется дальностью видимости (RVR), и представляет собой расстояние, на которое должен распространяться луч света в атмосфере для того, чтобы его интенсивность (или сила света) упала до 0,05 от его первоначального значения. Ее можно измерить при помощи измерителя дальности видимости или диффузиометра.

На рисунке 2 приведен пример изменения дальности видимости, наблюдаемого со здания La Turbie (Франция), в течение дня с хорошей видимостью.

РИСУНОК 2

**Изменение дальности видимости, наблюдаемое со здания La Turbie (Франция), в течение суток с хорошей видимостью**



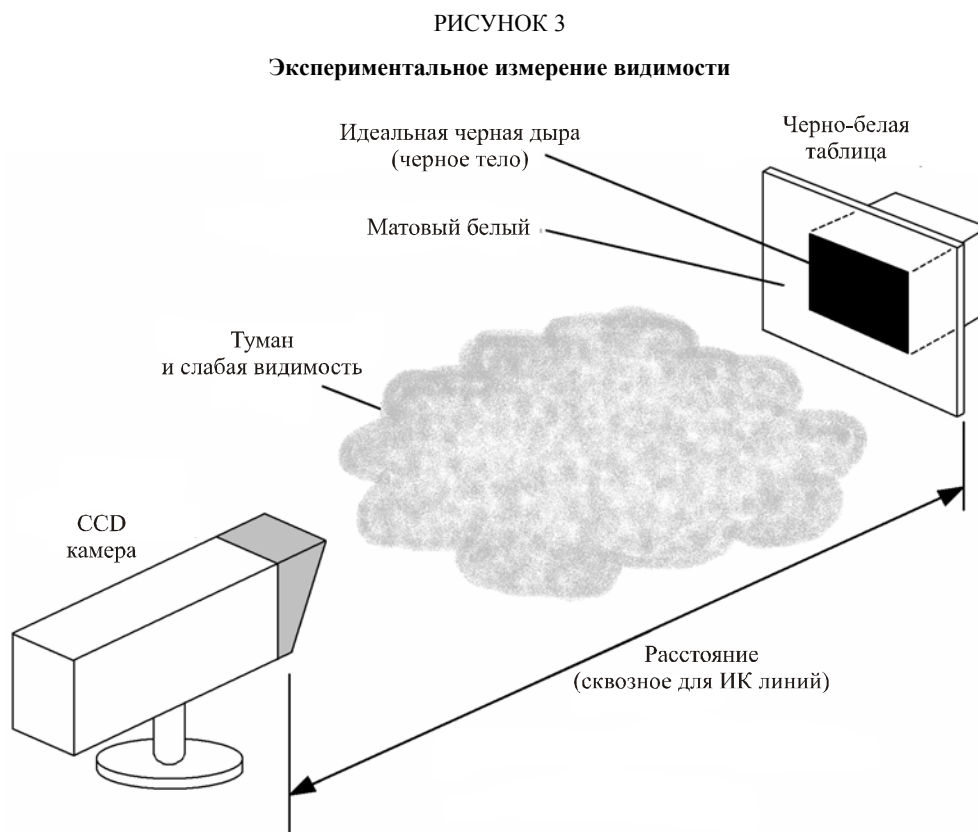
Иначе, видимость на трассе передачи можно измерить с применением CCD камеры и черно-белой контрольной таблицы. При использовании этого метода дальность видимости  $V_r$ , определяется выражением:

$$V_r = \frac{\ln(0,02)}{\ln(C/C_0)} d, \quad (7)$$

$C$  – это измеренная контрастность между белыми и черными участками таблицы,  $C_0$  – исходный контраст таблицы (измеренный вблизи от нее), и  $d$  – расстояние до таблицы. Значение  $C$  определяется выражением:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0,02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r} \quad (8)$$

где  $L_w$  и  $L_b$  – это значения яркости белой и черной частей мишени,  $b_{EX}$  – коэффициент ослабления, а  $V_r$  – дальность видимости. На рисунке 3 показана идеальная таблица, имеющая черный углубленный ободок на панели, покрашенной в белый цвет, в центре которой имеется отверстие, внутренняя часть которого покрашена в черный цвет во избежание отражения света, падающего прямо на нее.



1817-03

Все оптические характеристики распыленных веществ и, в частности, туман, имеют определенное распределение размеров частиц, которое можно считать ключевым параметром для определения физических и оптических свойств тумана.

Обычно такое распределение представлено в виде аналитических функций, например, логонормального распределения частиц распыленного вещества и модифицированного гамма-распределения для тумана. Последнее часто используется для моделирования различных типов тумана и облаков, и описывается выражением:

$$N(r) = ar^a \exp(-br), \quad (9)$$

где  $N(r)$  – количество частиц на единицу объема и на единицу увеличения радиуса  $r$ , а  $a$ ,  $a$  и  $b$  – параметры, характеризующие распределение размеров частиц.

Программные продукты (см. Дополнение 1 к Приложению 1) обычно учитывают два особых случая: плотный адвективный туман и умеренный радиационный туман, которые моделируются при помощи модифицированного гамма-распределения, как показано выше. Типичные параметры модифицированного гамма-распределения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

**Различные параметры распределение размеров частиц для плотного адвективного тумана  
и среднего радиационного тумана**

	$\alpha$	$a$	$b$	$N$ (см <sup>-3</sup> )	$W$ (г/м <sup>3</sup> )	$r_m$ (мкм)	$V$ (м)
Плотный адвективный туман	3	0,027	0,3	20	0,37	10	130
Умеренный радиационный туман	6	607,5	3	200	0,02	2	450

где:

$N$ : общее количество капель воды на единицу объема (см<sup>3</sup>);

$r_m$ : модальный радиус (мкм), для которого распределение максимально;

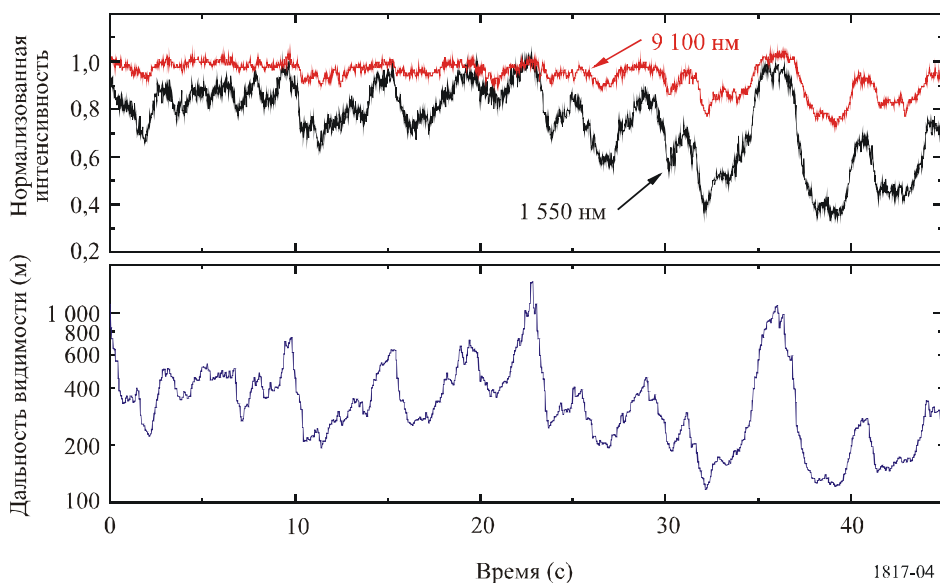
$W$ : содержание жидкой воды (г/м<sup>3</sup>);

$V$ : видимость, связанная с типом тумана (м).

Уровень принимаемого сигнала может существенно изменяться в течение коротких промежутков времени из-за изменения видимости. На рисунке 4 показаны нормализованные значения интенсивности для линий связи дальнего и среднего инфракрасного излучения, и видимость для этих линий в течение минуты.

РИСУНОК 4

Принимаемые в реальном времени значения интенсивности для линий связи дальнего и среднего инфракрасного излучения (а), и дальность видимости (б), одновременно записанная в течение минуты

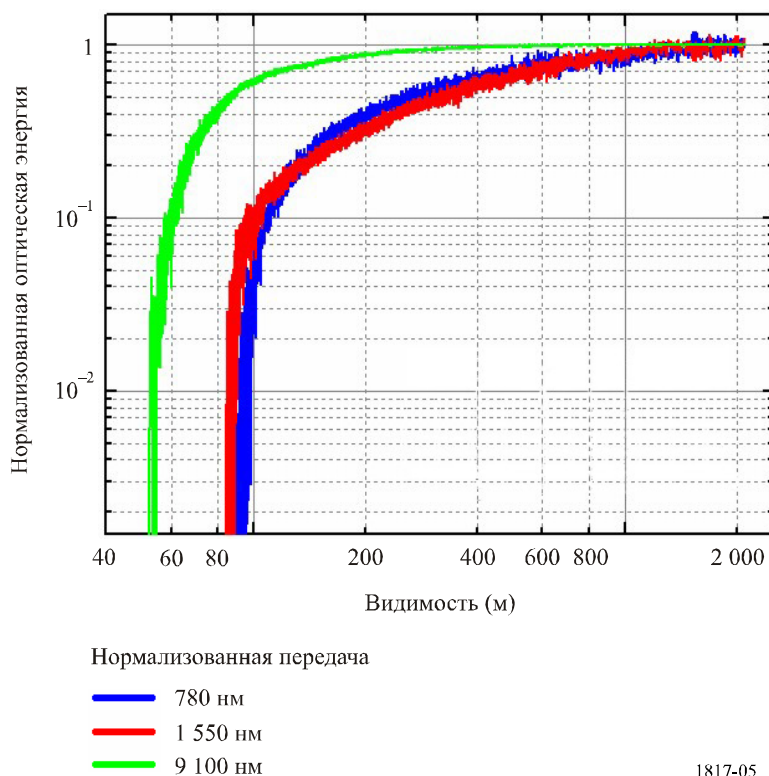


На рисунке 5 показана нормализованная оптическая энергия в зависимости от дальности видимости, измеренная при длине волны 780 нм, 1550 нм и 9100 нм.



РИСУНОК 5

Нормализованная принимаемая оптическая энергия в зависимости от дальности видимости линии связи для трех различных значений длины волны



Для многих случаев плотного тумана частицы распределены неоднородно. В таком случае самая высокая готовность обеспечивается для дальнего ИК-диапазона, потому что свет с длиной волны 10 мкм может преодолевать плотный туман и поддерживать готовность линии, тогда как более короткие волны этого не могут.

## 6 Сцинтилляция

В среде распространения под действием термальной турбулентности могут формироваться случайным образом распределенные ячейки с различным индексом рефракции. Эти ячейки обуславливают отражение, многолучевость распространения, изменение углов прихода, в результате чего уровень принимаемого сигнала флуктуирует с частотами от 0,01 до 200 Гц. Изменения фронта волны аналогичным образом приводят к изменению фокусировки луча с течением времени. Такие флуктуации сигнала называются сцинтилляцией. Амплитуда и частота сцинтилляций зависит от размера и диаметра луча. На приведенных далее рисунках показан этот эффект, а также изменения (по амплитуде и частоте) принимаемого сигнала. Луч отклоняется (рисунок 6), когда неоднородности превышают площадь сечения луча, и луч расширяется (рисунок 7), когда неоднородности малы по сравнению с площадью сечения луча. Смесь различных неоднородностей приводит к сцинтилляции (рисунок 8).

РИСУНОК 6

Отклонение луча под влиянием турбулентных ячеек, с размером больше диаметра луча

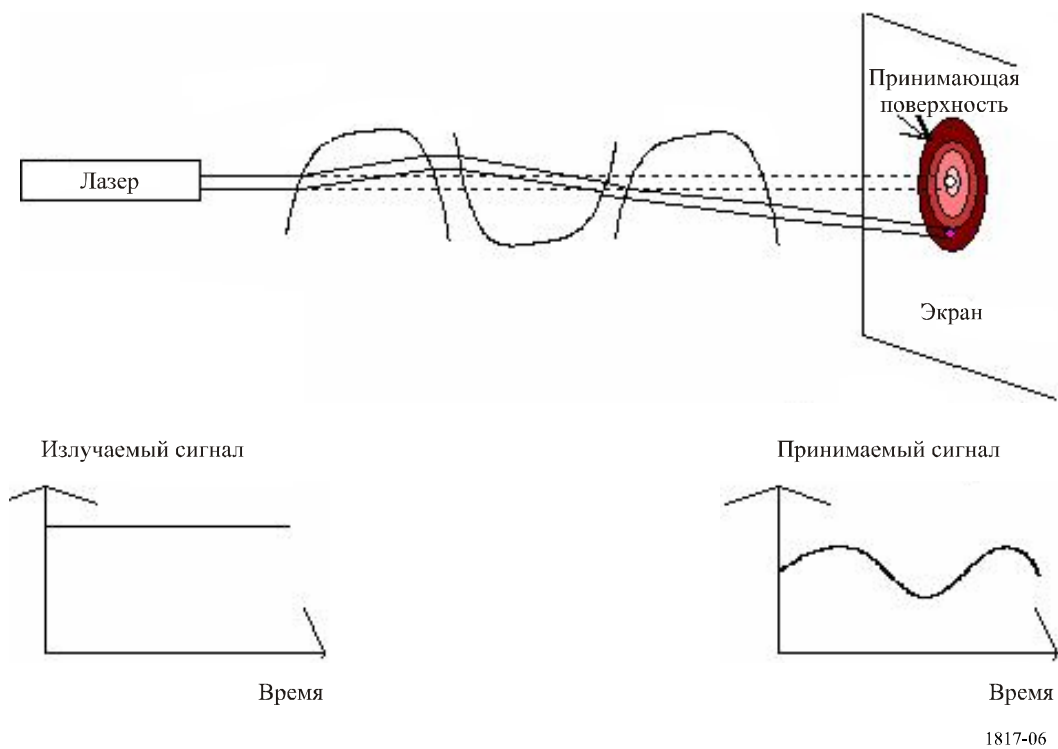


РИСУНОК 7

Отклонение луча под действием турбулентных ячеек с размером меньше диаметра луча (расширение луча)

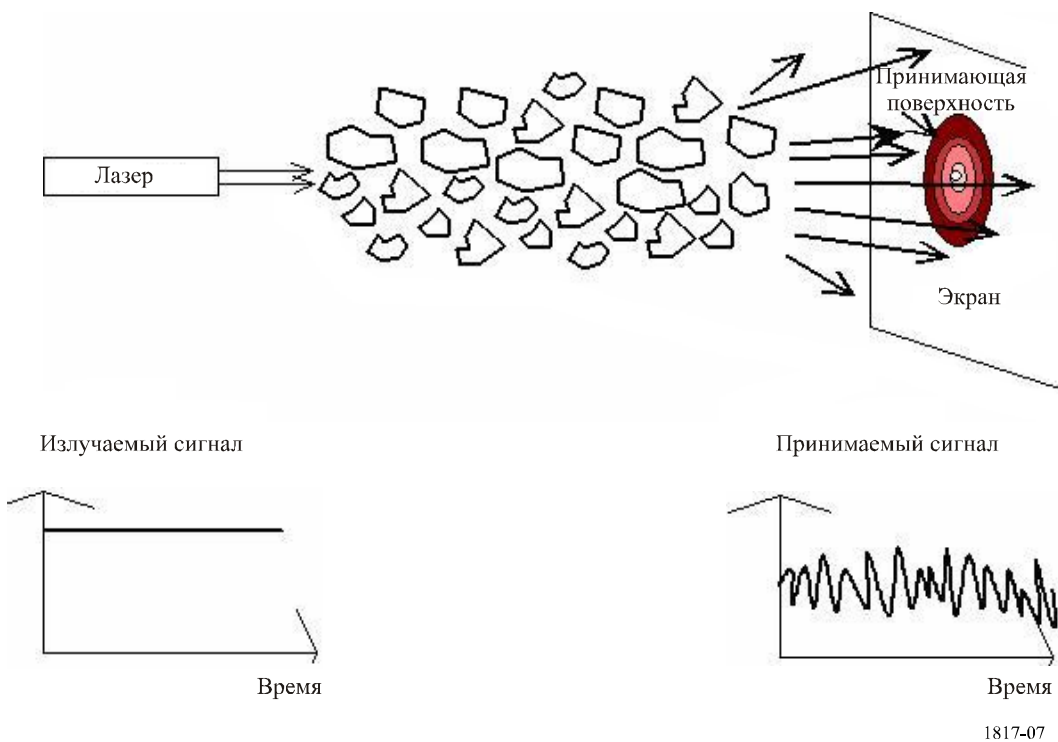
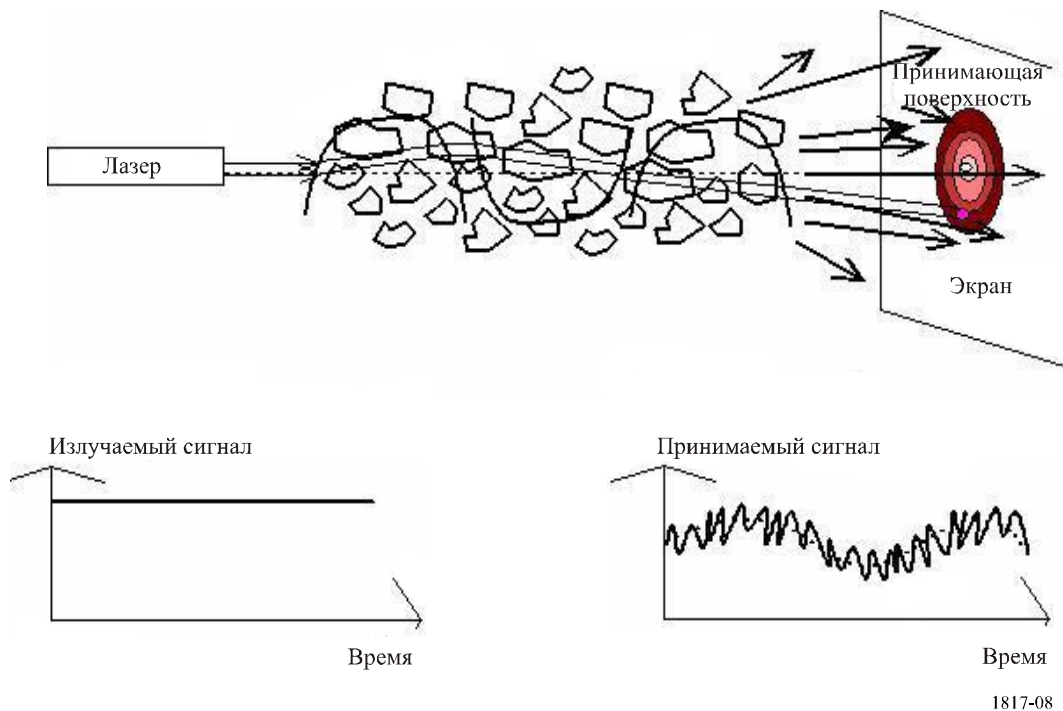


РИСУНОК 8

Влияние неоднородностей различных размеров на распространение луча лазера (сцинтилляция)



## 7 Ослабление в дожде

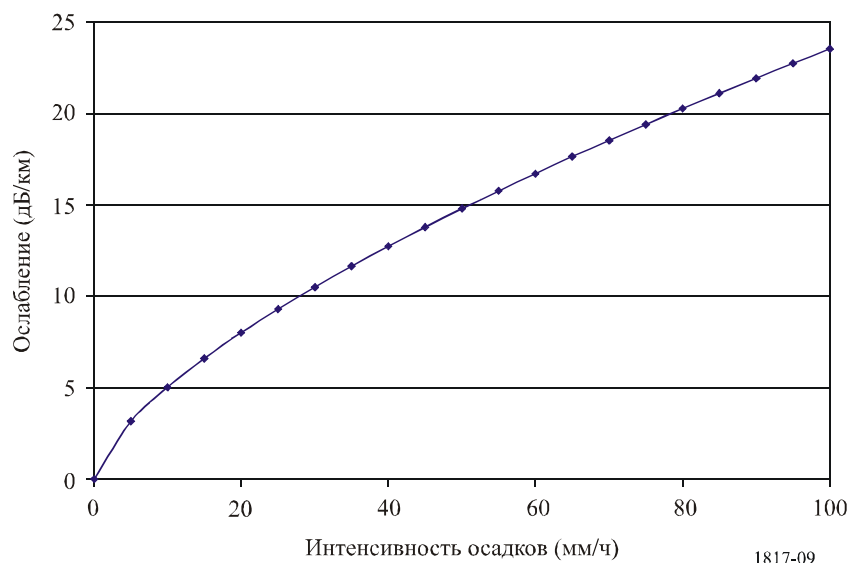
Конкретное ослабление в дожде (дБ/км) из-за дождя обычно аппроксимируется соотношением:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^\alpha. \quad (10)$$

На рисунке 9 показаны типичные изменения ослабления в осадках (дБ/км), наблюдаемые в оптическом и инфракрасном диапазонах частот.

РИСУНОК 9

Ослабление в осадках (дБ/км) в оптическом и инфракрасном диапазонах частот



В Рекомендации МСЭ-R P.837 приводятся значения интенсивности дождя  $R_p$  (мм/ч), превышаемые для данного процента времени среднего года ( $p$ ) и для всех мест размещения.

## 8 Ослабление в снеге

Ослабление в снеге (дБ/км) является функцией от интенсивности снегопада и описывается следующим соотношением:

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b, \quad (11)$$

где:

$\gamma_{snow}$ : ослабление в снеге (дБ/км);

$S$ : интенсивность снегопада (мм/ч);

$a$  и  $b$ : функции от длины волны,  $\lambda$  (нм), они приведены в таблице 2:

ТАБЛИЦА 2

Параметры " $a$ " и " $b$ " для мокрого и сухого снега

	$a$	$b$
Мокрый снег	$0,0001023\lambda_{nm} + 3,7855466$	0,72
Сухой снег	$0,0000542\lambda_{nm} + 5,4958776$	1,38

Оценка ослабления является функцией интенсивности снегопада для  $\lambda = 1,55$  мкм и показана на рисунках 10 и 11.

РИСУНОК 10

Ослабление в мокром снеге в зависимости от интенсивности снегопада для  $\lambda = 1,55$  мкм

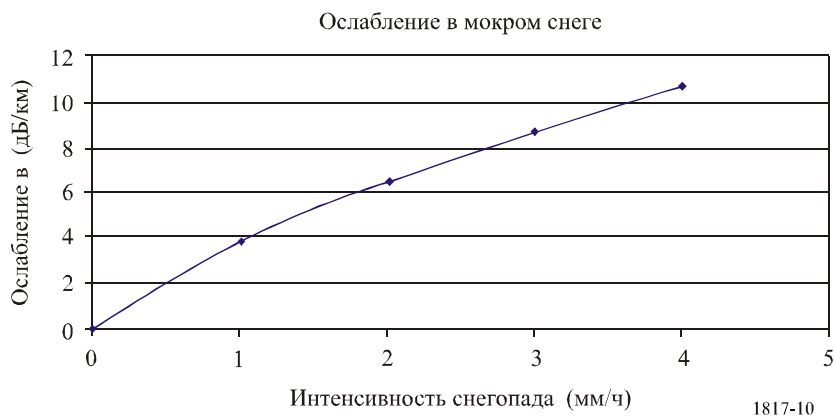
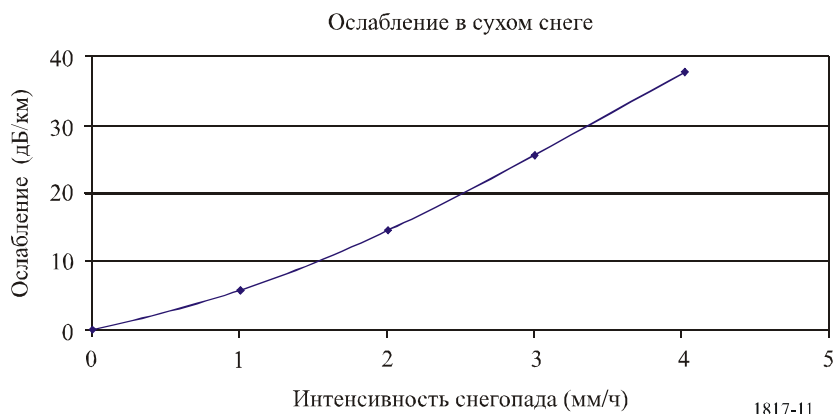


РИСУНОК 11

Ослабление в сухом снеге в зависимости от интенсивности снегопада для  $\lambda = 1,55$  мкм



## 9 Влияние общей освещенности

Солнечная засветка возникает, когда солнце или его отражение располагается в мгновенном секторе обзора (IFOV) оптического приемника или вблизи этого сектора. IFOV приема, как правило, имеет, как минимум, такой же размер, как и угол расхождения передачи. Задачей является расчет вероятности, когда положение солнца параллельно оптической линии, и энергия солнца, попадающая внутрь приемника, больше, чем энергия света, принимаемого приемником. Методика оценки этого влияния содержится в Рекомендации МСЭ-R P.1814.

## 10 Интегральная функция распределения ослабления

На рисунке 12 показана интегральная функция распределения ослабления, измеренная для длины волны 850 нм на трассе длиной 850 м из-за: всех гидрометеоров, тумана, дождя, дождя со снегом и снега в Праге, Чешская Республика, в течение 1 года. Все случаи замираний Були классифицированы в соответствии с метеоусловиями, обусловившими конкретный случай замираний. Метеоусловия определялись с использованием фотографий области между передатчиком и приемников и с использованием данных, полученных от автоматической метеостанции, расположенной вблизи приемника. Случаи замираний, обусловленных туманом и снегом, были наиболее серьезными.

## 11 Гибридные/FSO системы

На рисунке 15 дается сравнение измерений ослабления – из-за всех гидрометеоров и только из-за дождя – на частоте 58 ГГц и ослабления в оптической линии на одной и той же трассе. Во время дождя ослабление на оптической линии меньше, чем на радиолнии миллиметрового диапазона. Гибридные радио/оптические (RF/FSO) системы могут улучшить показатели качества линии FSO, используя преимущества того факта, что на радиотрассах заметно сказывается ослабление в дожде, но они практически нечувствительны к туману. И наоборот, в оптических линиях сильно сказывается ослабление в тумане и они относительно нечувствительны к дождю.

Годовое интегральное распределение ослабления, показанное на рисунке 13, является оценкой показателей качества гипотетической гибридной системы RF/FSO. Предположим, что это – гибридная система, в которой и радиочастотный, и оптический тракт имеют одинаковый запас на затухание сигнала,  $FM = 20$  дБ. Используется простой метод разнесения, поэтому в системе активна либо радиочастотная, либо оптическая часть в зависимости от мгновенных значений ослабления для радио или оптической трассы. Предполагается, что радиочастотная часть системы ослабляет влияние осадков, не являющихся дождем, а часть FSO ослабляет влияние дождя. Коэффициент готовности (AR) гибридной системы оценивается, исходя из статистических данных для FSO и дождя, как показано в таблице 3.

РИСУНОК 12

Интегральная функция распределения ослабления для различных условий на трассе

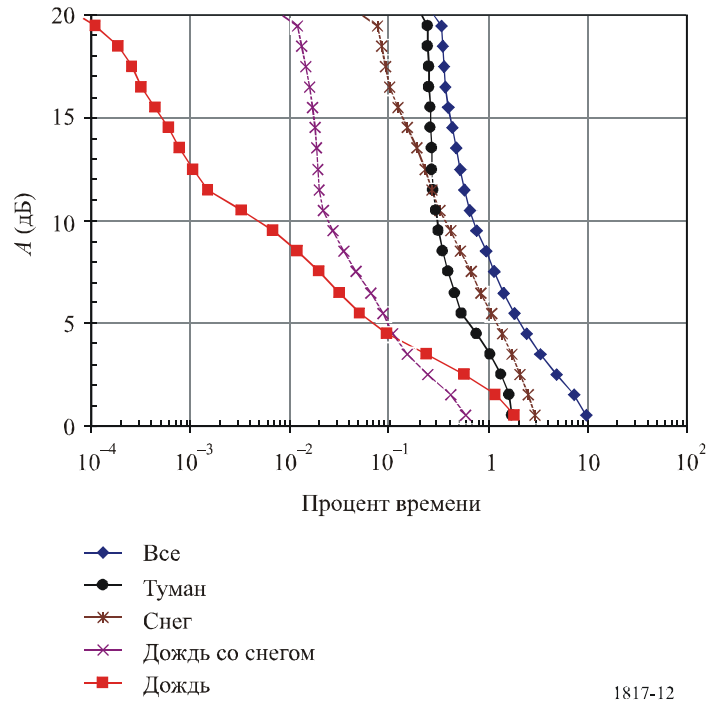


РИСУНОК 13

Ослабления в радиоканале и в FSO, превышаемые в течение различных % времени

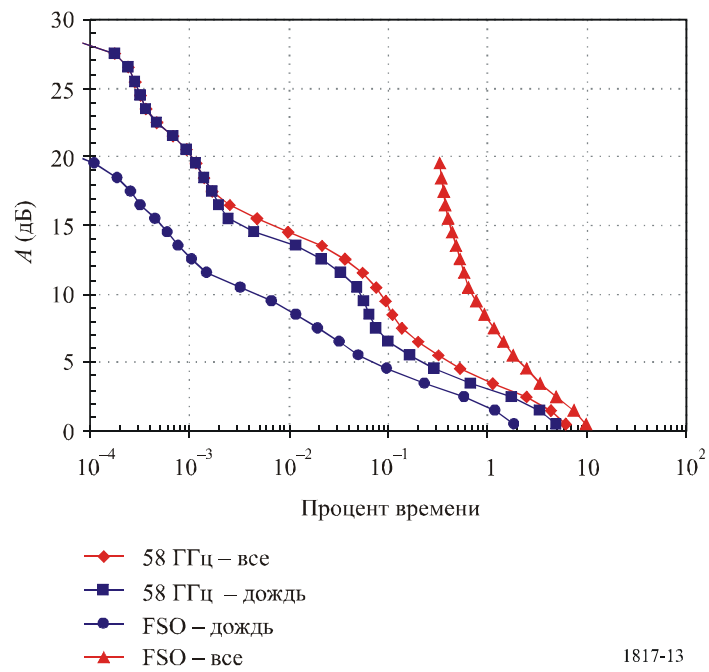


ТАБЛИЦА 3

**Сравнение коэффициента готовности радиоканала, линии FSO  
и гипотетической гибридной системы RF/FSO**

Система	AR (%)
Часть FSO (850 нм)	99,7
Радиочасть (58 ГГц)	99,999
Гибридная RF/FSO	99,9999

## 12 Измерения видимости

Видимость  $V$  (км) определяется как расстояние до объекта, при котором контрастность изображения падает до 2% от первоначального значения. Она измеряется при длине волны 550 нм, которая соответствует максимальной интенсивности спектра солнечного излучения и определяется соотношением Кошмейдера:

$$V(\text{км}) = \frac{3,912}{\gamma_{550 \text{ нм}}}, \quad (12)$$

где  $\gamma_{550 \text{ нм}}$  – это коэффициент ослабления среды (атмосфера распыленные вещества).

Для измерения видимости применяется два типа датчиков: измерители дальности видимости или диффузиометры.

Международный код видимости, показывающий ослабление (дБ/км) для различных климатических условий, показан в следующей таблице:

- Погодные условия – от ясного неба до плотного тумана.
- Осадки (мм/ч): изморось, дождь, шторм.
- Видимость – от 50 м до 50 км.

Международный код видимости						
Погодные условия	Осадки		Видимость (м)	Ослабление (дБ/км)		
		мм/ч				
Очень плотный туман			0			
Плотный туман			50	315		
Средний туман			200	75		
Легкий туман			500	28,9		
	Снег	Шторм	100	770	18,3	
Очень легкий туман				1 000	13,8	
		Сильный дождь	25	1 900	6,9	
Легкая пасмурность				2 000	6,6	
		Средний дождь	12,5	2 800	4,6	
Очень легкая пасмурность				4 000	3,1	
		Легкий дождь	2,5	5 900	2	
				10 000	1,1	
Чистый воздух			Изморось	0,25	18 100	0,6
Очень чистый воздух				20 000	0,54	
			23 000	0,47		
			50 000	0,19		



## Дополнение 1 к Приложению 1

### Компьютерное моделирование

На основании теоретического описания физических явлений было разработано определенное количество программ компьютерного моделирования для определения коэффициента передачи в атмосфере. Имеется несколько моделей: программы LOWTRAN и NAM (Navy Aerosol Model); NOVAM и WKDAER для морских условий, и т. д. Модель NOVAM включена в программы MODTRAN, FASCOD, и т. д.

Программа LOWTRAN содержит модели ослабления оптического сигнала в распыленных веществах. Она основана на модели для каждой линии, и ее можно получить в организации ONTAR (Соединенные Штаты Америки).

Программа NAM применяется, главным образом, к морским условиям. Она основана на модели распределения распыленных веществ GATHMAN.

Программа NOVAM учитывает частицы пыли континентального происхождения.

Программа WKDAER может быть отрегулирована для любой конкретной обстановки.

Программа FASCOD использует модели для каждой линии и учитывает все параметры, характеризующие линии поглощения (интенсивность, вероятность передачи, и т. д.). Она основана на базе данных молекулярного поглощения HITRAN, составленной с высоким разрешением. Параметры основной линии, включенные в HITRAN, это – резонансная частота, интенсивность линии при температуре 296 К, вероятность передачи, половина ширина линии при температуре 296 К, состояние малой энергии или основное состояние.

В Геофизической лаборатории Военно-воздушных сил США (AFGDL) разработано три взаимосвязанных модели с различным спектральным разрешением:

- LOWTRAN 7 – Передача с малым разрешением – Спектральное разрешение =  $20 \text{ см}^{-1}$  (эквивалентно 600 ГГц) с шагами по  $5 \text{ см}^{-1}$ .
- MODTRAN 3 – Передача с умеренным разрешением – Спектральное разрешение =  $2 \text{ см}^{-1}$  (эквивалентно 60 ГГц) с шагами по  $1 \text{ см}^{-1}$ .
- HITRAN 2004 – Передача с высоким разрешением – Спектральное разрешение =  $0.001 \text{ см}^{-1}$  (эквивалентно 30 МГц).

Все модели содержат спектральную информацию о множестве атмосферных составляющих, включая  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{HNO}_3$ . (Модель HITRAN содержит сведения о более чем 1 000 000 линиях поглощения для 37 молекул.) Кроме того, эти три модели содержат данные о континууме  $\text{H}_2\text{O}$  для всего спектра, о континууме  $\text{N}_2$  для диапазона от 2000 до  $2700 \text{ см}^{-1}$ , данные о молекулярном рассеянии, а также об отражении и поглощении в распыленных веществах, тумане, дожде и облаках.

---