

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R Р.840-7**  
(12/2017)

**Ослабление из-за облачности и тумана**

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



Международный  
союз  
электросвязи

## Предисловие

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

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

### Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

### Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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

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

Электронная публикация  
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

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

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.840-7

**Ослабление из-за облачности и тумана**

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации описаны методы прогнозирования ослабления из-за облачности и тумана на трассах Земля-космос.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a)* что существует необходимость в обеспечении инженеров руководством по проектированию систем электросвязи Земля-космос на частотах выше 10 ГГц;
- b)* что ослабление из-за облачности может быть важным фактором, особенно для микроволновых систем, работающих на частотах гораздо выше 10 ГГц, или для малодоступных систем;
- c)* что для расчета временных рядов общего ослабления и для методов пространственно-временного прогнозирования необходимо аналитическое выражение статистических данных общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках,
- d)* что данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, могут быть недоступны,

*рекомендует*

- 1** в случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, недоступны, использовать для прогнозирования ослабления из-за облачности и тумана метод, приведенный в п. 3.1 Приложения 1;
- 2** в случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках, недоступны, использовать для расчета ослабления из-за облачности метод, приведенный в п. 3.2 Приложения 1;
- 3** использовать информацию, содержащуюся в п. 4 Приложения 1, для общих расчетов эффектов распространения, которые необходимы, среди прочего, для пространственно-временных моделей каналов, для которых требуется аналитическое выражение статистических данных общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках.

**Приложение 1****1 Введение**

На частотах до 200 ГГц для облаков или тумана, полностью состоящих из небольших капелек, размер которых, как правило, меньше 0,01 см, действительна релеевская аппроксимация, и погонное ослабление в облачности или тумане может быть записано как:

$$\gamma_c(f, T) = K_l(f, T)M \quad (\text{дБ/км}), \quad (1)$$

где:

$\gamma_c$ : погонное ослабление (дБ/км) в облачности;

$K_l$ : коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды, содержащейся в облаках ((дБ/км)/(г/м<sup>3</sup>));

$M$ : плотность жидкой воды в облачности или тумане (г/м<sup>3</sup>);

$f$ : частота (ГГц);

$T$ : температура жидкой воды, содержащейся в облаках (К).

На частотах порядка 100 ГГц и выше ослабление из-за тумана может быть значительным. Плотность жидкой воды в тумане обычно составляет около 0,05 г/м<sup>3</sup> при среднем тумане (видимость порядка 300 м) и 0,5 г/м<sup>3</sup> при густом тумане (видимость порядка 50 м).

## 2 Коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды, содержащейся в облаках

Для вычисления значения  $K_l$  для частот до 200 ГГц можно использовать математическую модель, основанную на релеевском рассеянии, в которой применяется двумерная модель Дебая для диэлектрической проницаемости,  $\varepsilon(f)$ , воды:

$$K_l(f, T) = \frac{0,819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \quad (\text{дБ/км})/(\text{г/м}^3), \quad (2)$$

где  $f$  – частота (ГГц) и

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}. \quad (3)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды задается выражениями:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \varepsilon_2, \quad (5)$$

где:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3(\theta - 1); \quad (6)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_0; \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = 3,52; \quad (8)$$

$$\theta = 300 / T, \quad (9)$$

и  $T$  – температура жидкой воды (К).

Главная частота релаксации,  $f_p$ , и вторичная частота релаксации,  $f_s$ , определяются следующим образом:

$$f_p = 20,20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \quad (\text{ГГц}), \quad (10)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{ГГц}). \quad (11)$$

### 3 Ослабление из-за облачности на наклонных трассах

В случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках,  $L$  (кг/м<sup>2</sup> или, эквивалентно, мм), недоступны, следует использовать для прогнозирования ослабления из-за облачности на наклонных трассах метод, приведенный в п. 3.1. Этот метод прогнозирования основан на данных ERA-40, в которых используется общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках, с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К,  $L_{red}$  (кг/м<sup>2</sup> или, эквивалентно, мм).

В случае если данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды, содержащейся в облаках,  $L$ , доступны из других источников, например данные радиометрических измерений, наблюдения Земли или метеорологические цифровые данные, для расчета ослабления из-за облачности на наклонных трассах следует использовать метод, приведенный в п. 3.2.

#### 3.1 Распределение ослабления из-за облачности на наклонных трассах на основе цифровых карт мира

Ослабление из-за облачности на наклонных трассах,  $A$ , для данного уровня вероятности,  $p$ , определяется следующим образом:

$$A = \frac{L_{red} K_l(f, 273,15)}{\sin \varphi} \quad \text{дБ для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (12)$$

где  $L_{red}$  – общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках, с температурой, сниженной до фиксированного значения 273,15 К,  $L_{red}$  (кг/м<sup>2</sup> или, эквивалентно, мм), для данного уровня вероятности  $p$ ,  $\varphi$  – угол места, и  $K_l$  рассчитывается по уравнениям (2)–(11) для температуры воды 273,15 К.

Годовые значения общего столбчатого объема жидкой воды  $L_{red}$  (кг/м<sup>2</sup>) со сниженной температурой, содержащейся в облаках, превышаемые при уровнях вероятности 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% относительно среднегодовых значений, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт.

Месячные значения общего столбчатого объема жидкой воды  $L_{red}$  (кг/м<sup>2</sup>) со сниженной температурой, содержащейся в облаках, превышаемые при уровнях вероятности 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% относительно среднемесячных значений, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт.

Эти цифровые карты доступны в дополнительном файле R-REC-P.840-7-Maps.zip.

Данные приведены от 0° до 360° по долготе и от +90° до –90° по широте с разрешением 1,125° по широте и долготе. Общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, в любом желаемом местонахождении на поверхности Земли может быть получен с помощью следующего метода интерполяции:

- определить две вероятности,  $p_{above}$  и  $p_{below}$ , большую и меньшую желаемой вероятности  $p$ , из набора: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% для годовых статистических данных и из набора: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 и 99% для месячных статистических данных;
- для двух вероятностей,  $p_{above}$  и  $p_{below}$ , определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках,  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$  и  $L_{red4}$ , в четырех ближайших узловых точках;
- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках,  $L_{redabove}$  и  $L_{redbelow}$ , при вероятностях  $p_{above}$  и  $p_{below}$  путем выполнения билинейной интерполяции четырех значений общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной температурой,  $L_{red1}$ ,  $L_{red2}$ ,  $L_{red3}$ , и  $L_{red4}$ , в четырех узловых точках, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144;
- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках,  $L_{red}$ , при желаемой вероятности,  $p$ , путем интерполирования  $L_{redabove}$  и  $L_{redbelow}$  в зависимости от  $p_{above}$  и  $p_{below}$  к  $p$  по линейной шкале  $L_{red}$  в зависимости от  $\log p$ .

### 3.2 Ослабление из-за облачности на наклонных трассах на основе местных данных

Ослабление из-за облачности на наклонных трассах,  $A$ , определяется следующим образом:

$$A = \frac{LK_1^*(f, 273, 15)}{\sin \varphi} \quad (\text{дБ}) \quad \text{для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (13)$$

где  $L$  – общий столбчатый объем жидкой воды, содержащейся в облаках ( $\text{кг}/\text{м}^2$  или, эквивалентно, мм),  $\varphi$  – угол места, и  $K_1^*$  рассчитывается следующим образом:

$$K_1^*(f, T) = \frac{0,819 (1,9479 \cdot 10^{-4} f^{2,308} + 2,9424 f^{0,7436} - 4,9451)}{\varepsilon^n (1 + \eta^2)} \quad (\text{дБ}/\text{км})/(\text{г}/\text{м}^3), \quad (14)$$

где  $\eta$  – определяется в уравнении (3),  $\varepsilon^n$  – определяется в уравнении (4), и температура жидкой воды,  $T$ , составляет 273,15 К.

### 4 Аппроксимация $L_{red}$ с помощью логарифмически нормального распределения

Годовые статистические данные общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, могут быть аппроксимированы с помощью логарифмически нормального распределения. Цифровые карты средних значений  $m$ , стандартного отклонения  $\sigma$  и вероятности общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной температурой, сниженной до ненулевого значения,  $P_{clw}$ , параметры логарифмически нормального распределения являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт.

Общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, в любом желаемом местонахождении на поверхности Земли может быть получен с помощью следующего метода интерполяции:

- определить параметры  $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$  и  $P_{CLW4}$  в четырех ближайших узловых точках;
- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках,  $L_{red1}, L_{red2}, L_{red3}$ , и  $L_{red4}$ , для желаемой вероятности,  $p$ , в четырех ближайших узловых точках, исходя из параметров  $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, P_{CLW1}, P_{CLW2}, P_{CLW3}$  и  $P_{CLW4}$  следующим образом:

$$L_{red,i} = e^{m_i + \sigma_i Q^{-1}\left(\frac{P}{P_{CLWi}}\right)} \quad \text{для } i = 1, 2, 3, 4, \quad (15)$$

где:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (16)$$

- определить общий столбчатый объем жидкой воды со сниженной температурой, содержащейся в облаках, в желаемом местоположении путем осуществления билинейной интерполяции четырех значений общего столбчатого объема жидкой воды со сниженной температурой,  $L_{red1}, L_{red2}, L_{red3}$  и  $L_{red4}$ , в четырех узловых точках, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.