

# **Рекомендация МСЭ-R P.840-9 (08/2023)**

Серия Р: Распространение радиоволн

## **Ослабление из-за облачности и тумана**



## Предисловие

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

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

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/ru>, 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/ru>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<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 МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2024 г.

© ITU 2024

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.840-9

**Ослабление из-за облачности и тумана**

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2009-2012-2013-2017-2019-2023)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации описаны:

- a) метод оценки мгновенного значения ослабления из-за облачности на наклонных трассах для диапазона частот 1–200 ГГц, когда совокупный объем жидкой воды в облаке<sup>1</sup> известен из местных данных, справочного профиля или справочных цифровых карт;
- b) метод оценки статистических данных об ослаблении из-за облачности на наклонных трассах в диапазоне частот 1–200 ГГц, когда статистические данные о совокупном объеме жидкой воды в облаке известны из местных данных, справочного профиля или справочных цифровых карт;
- c) логарифмически нормальная аппроксимация ослабления из-за облачности на наклонных трассах для использования в Рекомендации МСЭ-R P.1853.

**Ключевые слова**

Ослабление из-за облачности, объем жидкой воды в облаке, совокупный объем столбчатой жидкой воды в облаке, погонное ослабление из-за жидкой воды в облаке.

**Акронимы/Сокращения/Глоссарий**

ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Американский стандартный код для обмена информацией
CCDF	Complementary cumulative distribution function	Дополнительная интегральная функция распределения
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	ЕЦСПП Европейский центр среднесрочного прогнозирования погоды

**Соответствующие Рекомендации и Справочник**

Рекомендация МСЭ-R P.530

Рекомендация МСЭ-R P.618

Рекомендация МСЭ-R P.619

Рекомендация МСЭ-R P.840

Рекомендация МСЭ-R P.1853

Рекомендация МСЭ-R P.2041

Рекомендация МСЭ-R P.2145

Справочник по радиометеорологии

ПРИМЕЧАНИЕ. – В каждом случае следует использовать последнюю действующую редакцию/издание Рекомендации.

---

<sup>1</sup> Совокупный объем жидкой воды в облаке – это общее количество жидкой воды в облаке в вертикальном столбе, простирающемся от поверхности Земли до верхней части атмосферы. Термины "совокупный объем жидкой воды в облаке", "общий объем жидкой воды в облаке", "общий объем столбчатой жидкой воды в облаке", "совокупный объем столбчатой жидкой воды в облаке" являются синонимами.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что существует необходимость в обеспечении руководства для инженеров 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 необходима логарифмически нормальная аппроксимация ослабления из-за облачности на наклонных трассах для использования в Рекомендации МСЭ-R P.1853;
- d) что данные местных измерений общего столбчатого объема жидкой воды в облаке могут быть недоступны;
- e) что системы численного прогнозирования погоды могут обеспечить информацию о параметрах облака,

*рекомендует,*

1 что в отношении мгновенных значений совокупного объема жидкой воды в облаке, известных из местных данных, следует использовать метод, описанный в разделе 3.1, для оценки мгновенного значения ослабления из-за облачности на наклонных трассах для диапазона частот 1–200 ГГц;

2 что в отношении статистических значений совокупного объема жидкой воды в облаке, известных из долгосрочных исторических данных или из карт, указанных в разделе 4, следует использовать метод, описанный в разделе 3.2, для оценки статистических значений ослабления из-за облачности на наклонных трассах для диапазона частот 1–200 ГГц;

3 что для использования в Рекомендации МСЭ-R P.1853 следует использовать метод, описанный в разделе 3.3, для оценки логарифмически нормальной аппроксимации ослабления из-за облачности на наклонных трассах.

## 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 рэлеевская аппроксимация, и погонное ослабление из-за облачности или тумана имеет следующий вид:

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

где:

- $\gamma_c$ : погонное ослабление (дБ/км) из-за облачности;
- $K_l$ : коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды в облаке ((дБ/км)/(г/м<sup>3</sup>));
- $\rho_l$ : плотность жидкой воды в облаке или тумане (г/м<sup>3</sup>);
- $f$ : частота (ГГц);
- $T$ : температура жидкой воды в облаке (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 в облаке

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

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

где  $f$  – частота (ГГц) и:

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

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:

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 \left( \frac{300}{T} - 1 \right) \quad (6)$$

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

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

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

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

$$f_p = 20,20 - 146 \left( \frac{300}{T} - 1 \right) + 316 \left( \frac{300}{T} - 1 \right)^2 \quad (\text{ГГц}) \quad (9)$$

$$f_s = 39,8f_p \quad (\text{ГГц}). \quad (10)$$

## 3 Метод прогнозирования ослабления из-за облачности на наклонных трассах

Существует три метода прогнозирования:

- 1) метод прогнозирования мгновенного значения, описанный в разделе 3.1, когда совокупный объем жидкой воды в облаке известен из местных данных измерений мгновенного значения;
- 2) метод статистического прогнозирования, описанный в разделе 3.2, когда статистические данные совокупного объема жидкой воды в облаке известны из:
  - а) местных данных; или
  - б) неотъемлемых карт для заданного местоположения, см. разделе 4.1;
- 3) метод статистического прогнозирования на основании логарифмически нормальной аппроксимации для наклонных трасс, описанный в разделе 3.3, когда параметры логарифмически нормального среднего значения и стандартного отклонения известны из:
  - а) местных данных; или
  - б) неотъемлемых карт для заданного местоположения, см. разделе 4.1.

### 3.1 Метод прогнозирования мгновенного значения ослабления из-за облачности на наклонных трассах

Прогнозируемое мгновенное значение ослабления из-за облачности на наклонных трассах,  $A_c$ , имеет следующий вид:

$$A_c(f) = \frac{K_L(f) \cdot L}{\sin \theta}, \quad (11)$$

где:

- $f$  : рассматриваемая частота, ГГц;  
 $K_L$  : массовый коэффициент поглощения жидкой воды, дБ/(кг/м<sup>2</sup>) или дБ/мм;  
 $L$  : совокупный объем жидкой воды в облаке, кг/м<sup>2</sup> или мм, от поверхности Земли в заданном местоположении;  
 $\theta$  : угол места,

и

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left( A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (12)$$

при:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522; A_2 = 11,51; A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589; f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3; \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases} .$$

### 3.2 Метод прогнозирования статистического ослабления из-за облачности на наклонных трассах

Прогнозируемое статистическое ослабление из-за облачности на наклонных трассах,  $A_c$ , имеет следующий вид:

$$A_c(f, p) = \frac{K_L(f) \cdot L(p)}{\sin \theta}, \quad (13)$$

где:

- $f$  : рассматриваемая частота, ГГц;  
 $K_L$  : массовый коэффициент поглощения жидкой воды, дБ/(кг/м<sup>2</sup>) или дБ/мм;  
 $p$  : рассматриваемая вероятность превышения (CCDF), %;  
 $L(p)$  : совокупный объем жидкой воды в облаке при вероятности превышения  $p$ , кг/м<sup>2</sup> или мм, от поверхности Земли в заданном местоположении;  
 $\theta$  : угол места,

и

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left( A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (14)$$

при:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522; A_2 = 11,51; A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589; f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3; \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases} .$$

### 3.3 Логарифмически нормальная аппроксимация статистического ослабления из-за облачности на наклонных трассах

Логарифмически нормальная аппроксимация прогнозируемого статистического ослабления из-за облачности на наклонных трассах,  $A_c$ , имеет следующий вид:

$$A_c(f, p) = \frac{K_L(f) \cdot e^{m_L + s_L Q^{-1}\left(\frac{p}{P_L}\right)}}{\sin \theta}, \quad (15)$$

где:

- $f$  : рассматриваемая частота, ГГц;
- $p$  : рассматриваемая вероятность превышения (CCDF), %;
- $m_L$  : параметр логарифмически нормального среднего значения в заданном местоположении;
- $S_L$  : параметр логарифмически нормального стандартного отклонения в заданном местоположении;
- $P_L$  : вероятность превышения в заданном местоположении, %;
- $\theta$  : угол места;
- $Q^{-1}(x)$  : обратная дополнительная интегральная функция нормального распределения, определенная в Рекомендации МСЭ-R P.1057,

и

$$K_L(f) = K_l(f, T = 273,75K) \cdot \left( A_1 e^{-\frac{(f-f_1)^2}{\sigma_1}} + A_2 e^{-\frac{(f-f_2)^2}{\sigma_2}} + A_3 \right) \quad (16)$$

при:

$$\begin{cases} A_1 = 0,1522; A_2 = 11,51; A_3 = -10,4912 \\ f_1 = -23,9589; f_2 = 219,2096 \\ \sigma_1 = 3,2991 \times 10^3; \sigma_2 = 2,7595 \times 10^6 \end{cases} .$$

## 4 Цифровые карты для расчета ослабления и-за облачности

### 4.1 Годовые и месячные метеорологические статистические параметры

Цифровые карты общемировых годовых и месячных статистических данных о совокупном объеме жидкой воды в облаке,  $L$ , кг/м<sup>2</sup>, или, эквивалентно, мм, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и содержатся в дополнительных частях настоящей Рекомендации.

Цифровые карты общемировых годовых и месячных статистических данных о совокупном объеме жидкой воды в облаке,  $L$ , аппроксимированные с помощью логарифмически нормального распределения, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и содержатся в дополнительных частях настоящей Рекомендации.

### 4.2 Интерполяция

В разделе 4.2.1 представлен метод статистической и пространственной интерполяции для расчета годового и ежемесячного совокупного объема жидкой воды в облаке в зависимости от вероятности превышения (CCDF) в любом заданном местоположении на поверхности Земли.

В разделе 4.2.2 представлен метод статистической и пространственной интерполяции для расчета годовых и ежемесячных среднего значения и стандартного отклонения совокупного объема жидкой воды в облаке, а также параметров формы и масштаба логарифмически нормального совокупного объема жидкой воды в облаке в любом заданном местоположении на поверхности Земли.

#### 4.2.1 Пространственная и статистическая (CCDF) интерполяция

Годовые и ежемесячные статистические значения совокупного объема жидкой воды в облаке,  $L(p)$ , в любом заданном местоположении на поверхности Земли и вероятность превышения (CCDF),  $p$ , в пределах диапазона вероятности превышения на основе неотъемлемых цифровых карт возможно рассчитать, используя следующий метод интерполяции:

- a) определить две вероятности превышения,  $p_{above}$  и  $p_{below}$ , выше и ниже заданной вероятности превышения,  $p$ , из ряда: 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 99 и 100% для годовых статистических значений и из ряда: 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 60; 70; 80; 90; 95; 99 и 100% для ежемесячных статистических значений;
- b) для каждой из четырех окружающих точек сетки,  $i = 1, 2, 3$  и  $4$  и для двух вероятностей превышения,  $p_{above}$  и  $p_{below}$ , определить совокупный объем жидкой воды в облаке,  $L_i$ , по соответствующей карте годовых и ежемесячных значений  $L(p)$ ;
- c) определить  $L_{above}$  и  $L_{below}$  в заданном местоположении и две вероятности  $p_{above}$  и  $p_{below}$  путем выполнения билинейной интерполяции  $L_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  и  $4$  в четырех окружающих точках сетки с использованием метода билинейной интерполяции, описанного в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.1144;
- d) определить совокупный объем жидкой воды в облаке,  $L$ , в заданном местоположении и вероятность превышения,  $p$ , путем интерполяции  $L_{above}$  и  $L_{below}$  в зависимости от  $p_{above}$  и  $p_{below}$  до  $p$  на линейной шкале зависимости  $L$  от  $\log_{10} p$ .

#### 4.2.2 Пространственная и статистическая (среднее значение и статистическое отклонение) интерполяция

Месячное или годовое среднее значение или стандартное отклонение совокупного объема жидкой воды в облаке,  $\bar{L}$  или  $\sigma_L$ , параметры среднего значения или стандартного отклонения годовой логарифмически нормального совокупного объема жидкой воды в облаке,  $m_L$  или  $s_L$ , либо годовую вероятность облачности,  $P_L$ , в любом заданном местоположении на поверхности Земли возможно рассчитать, используя метод билинейной интерполяции, описанный в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.1144, в четырех окружающих точках рассматриваемого параметра  $X$ , где  $X = \bar{L}, \sigma_L, m_L, s_L$  или  $P_L$  в заданном местоположении.

---