Рекомендация МСЭ-R P.840-9

(08/2023)

Серия P: 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-Т/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-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

|  |
| --- |
| **Серии Рекомендаций МСЭ-R**(Представлены также в онлайновой 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 |
| **P** | **Распространение радиоволн** |
| **RA** | Радиоастрономия |
| **RS** | Системы дистанционного зондирования |
| **S** | Фиксированная спутниковая служба |
| **SA** | Космические применения и метеорология |
| **SF** | Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы |
| **SM** | Управление использованием спектра |
| **SNG** | Спутниковый сбор новостей |
| **TF** | Передача сигналов времени и эталонных частот |
| **V** | Словарь и связанные с ним вопросы |

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

*Электронная публикация*Женева, 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[[1]](#footnote-1) известен из местных данных, справочного профиля или справочных цифровых карт;

b) метод оценки статистических данных об ослабления 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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/en)

Рекомендация МСЭ-R [P.618](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en)

Рекомендация МСЭ-R [P.619](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.619/en)

Рекомендация МСЭ-R [P.840](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.836/en)

Рекомендация МСЭ-R [P.1853](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1853/en)

Рекомендация МСЭ-R [P.2041](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2041/en)

Рекомендация МСЭ-R P.2145

[Справочник по](https://www.itu.int/pub/R-HDB-26) радиометеорологии

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

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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1853/en);

*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:

  $γ\_{c}\left(f,T\right)=K\_{l}\left(f,T\right)ρ\_{l}$               (дБ/км), (1)

где:

 *c* : погонное ослабление (дБ/км) из-за облачности;

 *Kl* : коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды в облаке ((дБ/км)/(г/м3));

 $ρ\_{l}$ : плотность жидкой воды в облаке или тумане (г/м3);

 *f* : частота (ГГц);

 *T* : температура жидкой воды в облаке (K).

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/м3 при среднем тумане (видимость порядка 300 м) и 0,5 г/м3 при густом тумане (видимость порядка 50 м).

# 2 Коэффициент погонного ослабления из-за жидкой воды в облаке

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

 $K\_{l}\left(f,T\right)=\frac{0,819f}{ε^{''}\left(f\right)\left(1+η\left(f\right)^{2}\right)}$               (дБ/км)/(г/м3), (2)

где *f* − частота (ГГц) и:

 $η\left(f\right)=\frac{2+ε^{'}\left(f\right)}{ε^{''}\left(f\right)}$. (3)

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды задается выражениями:

 $ε^{''}\left(f\right)=\frac{f\left(ε\_{0}-ε\_{1}\right)}{f\_{p}\left[1+\left({f}/{f\_{p}}\right)^{2}\right]}+\frac{f\left(ε\_{1}-ε\_{2}\right)}{f\_{s}\left[1+\left({f}/{f\_{s}}\right)^{2}\right]}$, (4)

 $ε^{'}\left(f\right)=\frac{ε\_{0}-ε\_{1}}{\left[1+\left({f}/{f\_{p}}\right)^{2}\right]}+\frac{ε\_{1}-ε\_{2}}{\left[1+\left({f}/{f\_{s}}\right)^{2}\right]}+ε\_{2}$, (5)

где:

 $ε\_{0}=77,66+103,3\left(\frac{300}{T}-1\right)$ (6)

 $ε\_{1}=0,0671ε\_{0}$ (7)

 $ε\_{2}=3,52$. (8)

и *T* − температура жидкой воды (K).

Главная частота релаксации *fp* и вторичная частота релаксации *fs* определяются следующим образом:

 $f\_{p}=20,20-146\left(\frac{300}{T}-1\right)+316\left(\frac{300}{T}-1\right)^{2}$               (ГГц) (9)

 $f\_{s}=39,8f\_{p}$               (ГГц). (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:

a) местных данных; или

b) 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:

a) местных данных; или

b) 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:

 $A\_{C}\left(f\right)=\frac{K\_{L}\left(f\right)∙L }{\sin(θ)}$, (11)

где:

 $f$ : рассматриваемая частота, ГГц;

 $K\_{L}$ : массовый коэффициент поглощения жидкой воды, дБ/(кг/м2) или дБ/мм;

 $L$ : совокупный объем жидкой воды в облаке, кг/м2 или мм, от поверхности Земли в заданном местоположении;

 $θ$ : угол места,

и

 $K\_{L}\left(f\right)=K\_{l}\left(f,T=273,75K\right)∙\left(A\_{1}e^{-\frac{\left(f-f\_{1}\right)^{2}}{σ\_{1}}}+A\_{2}e^{-\frac{\left(f-f\_{2}\right)^{2}}{σ\_{2}}}+A\_{3}\right)$ (12)

при:

 $\left\{\begin{array}{c}A\_{1}=0,1522; A\_{2}=11,51;A\_{3}=-10,4912\\f\_{1}=-23,9589;f\_{2}=219,2096\\σ\_{1}=3,2991×10^{3};σ\_{2}=2,7595×10^{6}\end{array}\right.$.

## 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:

 $A\_{C}\left(f,p\right)=\frac{K\_{L}\left(f\right)∙L\left(p\right) }{\sin(θ)}$, (13)

где:

 $f$ : рассматриваемая частота, ГГц;

 $K\_{L}$ : массовый коэффициент поглощения жидкой воды, дБ/(кг/м2) или дБ/мм;

 $p$ : рассматриваемая вероятность превышения (CCDF), %;

 $L\left(p\right)$ : совокупный объем жидкой воды в облаке при вероятности превышения $p$, кг/м2 или мм, от поверхности Земли в заданном местоположении;

 $θ$ : угол места,

и

 $K\_{L}\left(f\right)=K\_{l}\left(f,T=273,75K\right)∙\left(A\_{1}e^{-\frac{\left(f-f\_{1}\right)^{2}}{σ\_{1}}}+A\_{2}e^{-\frac{\left(f-f\_{2}\right)^{2}}{σ\_{2}}}+A\_{3}\right)$ (14)

при:

 $\left\{\begin{array}{c}A\_{1}=0,1522; A\_{2}=11,51,A\_{3}=-10,4912\\f\_{1}=-23,9589;f\_{2}=219,2096\\σ\_{1}=3,2991×10^{3};σ\_{2}=2,7595×10^{6}\end{array}.\right.$

## 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:

 $A\_{c}\left(f,p\right)= \frac{K\_{L}\left(f\right)∙e^{m\_{L}+s\_{L}Q^{-1}\left(\frac{p}{P\_{L}}\right)}}{\sin(θ)}\_{ }$, (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, %;

 $θ$ : угол места;

 $Q^{-1}\left(x\right)$ : обратная дополнительная интегральная функция нормального распределения, определенная в Рекомендации МСЭ-R P.1057,

и

 $K\_{L}\left(f\right)=K\_{l}\left(f,T=273,75K\right)∙\left(A\_{1}e^{-\frac{\left(f-f\_{1}\right)^{2}}{σ\_{1}}}+A\_{2}e^{-\frac{\left(f-f\_{2}\right)^{2}}{σ\_{2}}}+A\_{3}\right)$ (16)

при:

 $\left\{\begin{array}{c}A\_{1}=0,1522; A\_{2}=11,51;A\_{3}=-10,4912\\f\_{1}=-23,9589,f\_{2}=219,2096\\σ\_{1}=3,2991×10^{3};σ\_{2}=2,7595×10^{6}\end{array}\right.$.

# 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/м2, 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, *pabove* и *pbelow*, 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, *pabove* и *pbelow*, определить совокупный объем жидкой воды в облаке, $L\_{i}$, по соответствующей карте годовых и ежемесячных значений $L(p)$;

c) определить *Labove* и *Lbelow* в заданном местоположении и две вероятности *pabove* и *pbelow* 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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en);

d) определить совокупный объем жидкой воды в облаке, *L*, в заданном местоположении и вероятность превышения, *p*, путем интерполяции *Labove* и *Lbelow* в зависимости от *pabove* и *pbelow* до *p* на линейной шкале зависимости *L* от log10 *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, $\overbar{L}$ или $σ\_{L}$, параметры среднего значения или стандартного отклонения годовой логарифмически нормального совокупного объема жидкой воды в облаке, $m\_{L}$ или $σ\_{L}$, 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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en), в четырех окружающих точках рассматриваемого параметра *X*, где $X$ = $\overbar{L}$, $σ\_{L}$, $m\_{L}$, $s\_{L}$ или $P\_{L}$ в заданном местоположении.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. 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. [↑](#footnote-ref-1)