|  |
| --- |
| **Рекомендация МСЭ-R P.835-5**  **(02/2012)** |
| **Эталонные стандартные атмосферы** |
| **Серия P**  **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-Т/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-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/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 |
| **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 1 МСЭ-R.* |

*Электронная публикация*Женева, 2013 г.

© ITU 2013

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.835-5

Эталонные стандартные атмосферы

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2005-2012)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.835 приводятся выражения и данные для эталонных стандартных атмосфер, требуемые для расчета ослабления в атмосферных газах на трассах Земля-космос.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что имеется необходимость в эталонной стандартной атмосфере, которую можно было бы использовать при расчетах ослабления в атмосферных газах на трассе Земля-космос,

рекомендует,

**1** чтобы в тех случаях, когда более надежные, полученные на месте данные отсутствуют, при определении зависимости температуры, давления и давления паров воды от высоты, необходимой для расчета ослабления в атмосферных газах, использовалась стандартная атмосфера, описанная в Приложении 1;

**2** чтобы при анализе сезонных и месячных вариаций в рассматриваемых местах использовались экспериментальные данные, представленные в Приложениях 2 и 3.

Приложение 1

# 1 Среднегодовая глобальная стандартная атмосфера

Описываемая ниже среднегодовая стандартная атмосфера отражает среднегодовые профили, усредненные по всему земному шару.

## 1.1 Температура и давление

Эталонная стандартная атмосфера основана на Стандартной атмосфере Соединенных Штатов, 1976 г., в которой атмосфера разделена на семь последовательно расположенных слоев с линейной зависимостью температуры от высоты, как показано на рисунке 1.

Температура *T* на высоте *h* определяется как:

*T*(*h*)  *Ti*  *Li* (*h* – *Hi*)               K, (1)

где:

*Ti*  *T*(*Hi*),(2)

а *Li* – градиент температуры, начиная с высоты *Hi* , который приведен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Нижний индекс, *i* | Высота, *Hi* (км) | Градиент температуры, *Li* (K/км) |
| 0 | 0 | –6,5 |
| 1 | 11 | 0,0 |
| 2 | 20 | 1,0 |
| 3 | 32 | 2,8 |
| 4 | 47 | 0,0 |
| 5 | 51 | –2,8 |
| 6 | 71 | –2,0 |
| 7 | 85 |  |

РИСУНОК 1

Эталонный профиль атмосферной температуры



Если градиент температуры *Li*  0, давление определяется с помощью уравнения:

                , (3)

а когда градиент температуры *Li*  0, давление определяется следующим образом:

                . (4)

Стандартные значения температуры и давления на уровне земной поверхности следующие:

. (5)

Следует отметить, что выше высоты 85 км локальное гидродинамическое равновесие в атмосфере начинает нарушаться, и гидростатическое уравнение, на котором основаны приведенные выше уравнения, оказывается неверным.

## 1.2 Давление водяного пара

Распределение давления водяного пара в атмосфере, как правило, крайне изменчиво, однако его можно аппроксимировать уравнением:

(*h*)  0 exp (–*h* / *h*0)               г/м3, (6)

где приведенная высота *h*0  2 км, а стандартное значение плотности водяных паров на уровне Земли:

0  7,5               г/м3. (7)

Давление пара определяется по величине плотности с помощью уравнения (см. Рекомендацию МСЭ‑R P.453):

                . (8)

Плотность водяных паров уменьшается по экспоненциальному закону при увеличении высоты, вплоть до высоты, на которой коэффициент смешения *e*(*h*)/*P*(*h*)  2  10–6. Выше коэффициент смешения считается постоянной величиной.

## 1.3 Сухая атмосфера для расчета ослабления

Профиль плотности атмосферных газов, отличных от паров воды ("сухая атмосфера"), можно найти по профилям температуры и давления, приведенным выше, в п. 1.1.

Для расчета ослабления профиль плотности можно аппроксимировать экспоненциальным профилем, соответствующим уравнению (6), положив:

*h*0  6 км. (9)

# 2 Годовая эталонная атмосфера на низких широтах

Для низких широт (менее 22°) сезонные вариации не играют существенной роли, а потому можно использовать постоянный годовой профиль.

Температура *T* (K) на высоте *h* (км) определяется как:

*T*(*h*)  300,4222 – 6,3533 *h*  0,005886 *h*2 для 0  *h* < 17

*T*(*h*)  194  (*h* – 17) 2,533 для 17  *h* < 47

*T*(*h*)  270 для 47  *h* < 52

*T*(*h*)  270 – (*h* – 52) 3,0714 для 52  *h* < 80

*T*(*h*)  184 для 80  *h*  100,

тогда как давление *P* (гПа) равно:

*P*(*h*)  1012,0306 – 109,0338 *h*  3,6316 *h*2 для 0  *h* 10

*P*(*h*)  *P*10 exp [–0,147 (*h* – 10)] для 10 < *h*  72

*P*(*h*)  *P*72 exp [–0,165 (*h* – 72)] для 72 < *h*  100,

где *P*10 и *P*72 – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м3):

(*h*)  19,6542 exp [–0,2313 *h* – 0,1122 *h*2  0,01351 *h*3

– 0,0005923 *h*4] для 0  *h*  15

(*h*)  0 для *h*  15.

# 3 Эталонная атмосфера на средних широтах

На средних широтах (между 22 и 45) зимой и летом можно использовать следующие профили.

## 3.1 Лето, средние широты

Температура *T* (K) на высоте *h* (км) определяется как:

*T*(*h*)  294,9838 – 5,2159 *h* – 0,07109 *h*2 для 0  *h* < 13

*T*(*h*)  215,15 для 13  *h* < 17

*T*(*h*)  215,15 exp [(*h* – 17) 0,008128] для 17  *h* < 47

*T*(*h*)  275 для 47  *h* < 53

*T*(*h*)  275  {1 – exp [(*h* – 53) 0,06] } 20 для 53  *h* < 80

*T*(*h*)  175 для 80  *h*  100,

тогда как давление *P* (гПа) равно:

*P*(*h*)  1012,8186 – 111,5569 *h*  3,8646 *h*2 для 0  *h*  10

*P*(*h*)  *P*10 exp [–0,147 (*h* – 10)] для 10 < *h*  72

*P*(*h*)  *P*72 exp [–0,165 (*h* – 72)] для 72 < *h*  100,

где *P*10 и *P*72 – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м3):

(*h*)  14,3542 exp [–0,4174 *h* – 0,02290 *h*2

 0,001007 *h*3] для 0  *h*  15

(*h*)  0 для *h*  15.

## 3.2 Зима, средние широты

Температура *T* (K) на высоте *h* (км) определяется как:

*T*(*h*)  272,7241 – 3,6217 *h* – 0,1759 *h*2 для 0  *h* < 10

*T*(*h*)  218 для 10  *h* < 33

*T*(*h*)  218  (*h* – 33) 3,3571 для 33  *h* < 47

*T*(*h*)  265 для 47  *h* < 53

*T*(*h*)  265 – (*h* – 53) 2,0370 для 53  *h* < 80

*T*(*h*)  210 для 80  *h*  100,

тогда как давление *P* (гПа) равно:

*P*(*h*)  1018,8627 – 124,2954 *h*  4,8307 *h*2 для 0  *h*  10

*P*(*h*)  *P*10 exp [–0,147 (*h* – 10)] для 10 < *h*  72

*P*(*h*)  *P*72 exp [–0,155 (*h* – 72)] для 72 < *h*  100,

где *P*10 и *P*72 – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м3):

(*h*)  3,4742 exp [–0,2697 *h –* 0,03604 *h*2

 0,0004489 *h*3] для 0  *h*  10

(*h*)  0 для *h*  10.

# 4 Эталонная атмосфера на высоких широтах

На высоких широтах (выше 45) зимой и летом можно использовать следующие профили.

## 4.1 Лето, высокие широты

Температура *T* (K) на высоте *h* (км) определяется как:

*T*(*h*)  286,8374 – 4,7805 *h* – 0,1402 *h*2 для 0  *h* < 10

*T*(*h*)  225 для 10  *h* < 23

*T*(*h*)  225 exp [(*h* – 23) 0,008317] для 23  *h* < 48

*T*(*h*)  277 для 48  *h* < 53

*T*(*h*)  277 – (*h* – 53) 4,0769 для 53  *h* < 79

*T*(*h*)  171 для 79  *h*  100,

тогда как давление *P* (гПа) равно:

*P*(*h*)  1008,0278 – 113,2494 *h*  3,9408 *h*2 для 0  *h*  10

*P*(*h*)  *P*10 exp [–0,140 (*h* – 10)] для 10 < *h*  72

*P*(*h*)  *P*72 exp [–0,165 (*h* – 72)] для 72 < *h*  100,

где *P*10 и *P*72 – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м3):

(*h*)  8,988 exp [–0,3614 *h –* 0,005402 *h*2

– 0,001955 *h*3] для 0  *h*  15

(*h*)  0 для *h*  15.

## 4.2 Зима, высокие широты

Температура *T* (K) на высоте *h* (км) определяется как:

*T*(*h*)  257,4345  2,3474 *h* – 1,5479 *h*2  0,08473 *h*3 для 0  *h* < 8,5

*T*(*h*)  217,5 для 8,5  *h* < 30

*T*(*h*)  217,5  (*h* – 30) 2,125 для 30  *h* < 50

*T*(*h*)  260 для 50  *h* < 54

*T*(*h*)  260 – (*h* – 54) 1,667 для 54  *h*  100,

тогда как давление *P* (гПа) равно:

*P*(*h*)  1010,8828 – 122,2411 *h*  4,554 *h*2 для 0  *h*  10

*P*(*h*)  *P*10 exp [–0,147 (*h* – 10)] для 10 < *h*  72

*P*(*h*)  *P*72 exp [–0,150 (*h* – 72)] для 72 < *h*  100,

где *P*10 и *P*72 – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м3):

(*h*)  1,2319 exp [0,07481 *h –* 0,0981 *h*2  0,00281 *h*3] для 0  *h*  10

(*h*)  0 для *h*  10.

Приложение 2

# 1 Экспериментальные данные о вертикальных атмосферных профилях

Усредненные за месяц вертикальные профили температуры, давления и относительной влажности были рассчитаны для 353 мест земного шара по результатам радиозондирования за 10-летний период (1980–1989 гг.). Файл с этими данными (DST.STD) хранится в БР/МСЭ и содержит среднемесячные вертикальные профили давления, температуры и относительной влажности как для 00.00 UTC, так и для 12.00 UTC. Эти профили, полученные в условиях отсутствия дождя, охватывают диапазон высот от 0 до16 км с шагом 500 м. Среднемесячные профили содержатся в файлах ASCII под названием **<*WMO\_code*>.dat**, где *WMO\_code* – это кодовое название места согласно Всемирной метеорологической организации (например: 03496.dat, 03496 – это код станции ВМО для Хемсби в Норфолке). Пример одного из профилей приведен в таблице 2. Перечень местоположений содержится в файле ASCII (используя разделенное запятой значение файла, CSV, формат файла) под названием **dst\_std\_lst.csv**. Каждая запись этого файла содержит следующее поле: WMO\_CODE, название станции, страна, широта, долгота, высота над уровнем моря. Пример такой записи приведен в таблице 3.

Выше максимальной высоты профили можно получить путем экстраполяции, используя эталонные профили, приведенные в Приложении 1. Для перевода относительной влажности в абсолютные значения плотности паров воды используются формулы, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.453.

ТАБЛИЦА 2

Формат данных DST.STD – Пример среднемесячного профиля   
(станция 10410)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| YYMMDDHH NL |  | | |
| 99 199 0 33 |  | | |
| Press (гПа) | Z (км) | Temp (K) | RH (%/100) |
| 1 016,905 | 0,00 | 273,62 | 0,864E+00 |
| 956,686 | 0,50 | 273,33 | 0,830E+00 |
| 898,555 | 1,00 | 271,74 | 0,754E+00 |
| 844,014 | 1,50 | 269,59 | 0,665E+00 |
| 791,860 | 2,00 | 267,15 | 0,591E+00 |
| 742,661 | 2,50 | 264,56 | 0,518E+00 |
| 696,285 | 3,00 | 261,89 | 0,470E+00 |
| 651,977 | 3,50 | 258,94 | 0,458E+00 |
| 610,086 | 4,00 | 255,88 | 0,448E+00 |
| 570,467 | 4,50 | 252,69 | 0,445E+00 |
| 533,076 | 5,00 | 249,33 | 0,451E+00 |
| 497,767 | 5,50 | 245,90 | 0,453E+00 |
| 464,123 | 6,00 | 242,32 | 0,450E+00 |
| 432,441 | 6,50 | 238,75 | 0,450E+00 |
| 402,414 | 7,00 | 235,16 | 0,443E+00 |
| 374,177 | 7,50 | 231,59 | 0,437E+00 |
| 347,236 | 8,00 | 228,12 | 0,433E+00 |
| 322,281 | 8,50 | 224,88 | 0,427E+00 |
| 298,474 | 9,00 | 221,89 | 0,421E+00 |
| 276,492 | 9,50 | 219,27 | 0,416E+00 |
| 255,527 | 10,00 | 217,08 | 0,411E+00 |
| 236,297 | 10,50 | 215,62 | 0,402E+00 |
| 218,415 | 11,00 | 214,79 | 0,393E+00 |
| 201,366 | 11,50 | 214,14 | 0,348E+00 |
| 186,214 | 12,00 | 214,02 | 0,205E+00 |
| 172,093 | 12,50 | 214,24 | 0,104E+00 |
| 158,709 | 13,00 | 214,66 | 0,368E-01 |
| 146,492 | 13,50 | 214,94 | 0,351E-02 |
| 135,813 | 14,00 | 214,88 | 0,120E-02 |
| 125,690 | 14,50 | 214,50 | 0,117E-02 |
| 116,027 | 15,00 | 214,01 | 0,113E-02 |
| 106,798 | 15,50 | 213,56 | 0,110E-02 |
| 98,291 | 16,00 | 213,26 | 0,107E-02 |

|  |
| --- |
| *Пояснения к таблице 2*:  YY = Год (99 для среднемесячных профилей)  MM = Месяц (1 = Январь, 2 = Февраль, ...)  DD = День месяца (99 для среднемесячных профилей)  HH = Час суток (UTC)  NL = Фиксированное число уровней вертикального профиля (NL = 33 для STD.DST)  Press (гПа) = Полное атмосферное давление  Z (км) = Высота над поверхностью Земли  Temp (K) = Температура воздуха  RH (%/100) = Относительная влажность (в виде дроби).  ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения уровней Temp и Press можно установить в нуль, если нет записи. |

ТАБЛИЦА 3

Информационный файл станции DST\_STD\_LST.CSV – Пример структуры записи

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Код ВМО | Название станции | Страна | Широта (градусы) | Долгота  (градусы) | Asl  (м) |
| 10 410 | ESSEN | DL | 51,4 | 6,967 | 153 |
| ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения широты и долготы даны в десятичных градусах (то есть 51,4 = 51°24'). | | | | | |

Приложение 3

# 1 Числовые данные о вертикальных атмосферных профилях для прогнозирования погоды

Усредненные за месяц и отнесенные к определенному часу суток вертикальные профили температуры, давления и плотности водяных паров были рассчитаны с использованием набора данных ECMWF, собранных за 15-летний период (ERA15) по проекту повторного анализа. Этот набор данных (ESA\_STD\_PROF) хранится в БР/МСЭ и содержит среднемесячные вертикальные профили полного атмосферного давления, температуры воздуха и плотности водяных паров для 00.00, 06.00, 12.00 и 18.00 UTC. Эти профили простираются от эталонной высоты, расположенной вокруг локальной поверхности Земли, до примерно 30 км над поверхностью Земли и содержат 32 уровня, полученных из уровней модели ERA15. Эти данные имеют долготу от 0° до 360° и широту от +90° до –90° с разрешением 1,5° как по широте, так и по долготе. Все данные хранятся в файлах при использовании единого стандарта точности IEEE с плавающей точкой (4 байта, 32 бита) в формате с обратным порядком байтов.

Среднемесячные профили каждого метеорологического параметра содержатся в двоичных файлах под названием **<*param*>\_<*hh*>.bin**, где *param* – это название метеорологического параметра (**pres**= полное атмосферное давление [гПа], **temp**= температура воздуха [K], **vapd**= плотность водяных паров [г/м3]) и *hh* – это часы суток (то есть 00, 06, 12 и 18 [UTC]). Значения высот для уровней профиля содержатся в отдельном двоичном файле, под названием **hght.bin**, в котором приведены вертикальные профили среднемесячных высот уровней. Пример данных, содержащихся в базе данных для конкретной точки, приведен в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Содержание ESA\_STD\_PROF – Пример профиля в точке координат  
(широта = 45 (градусов) и долгота = 9 (градусов))  
в 12 UTC июля месяца

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Высота (м) | Press  (гПа) | Temp (K) | Vapd (г/м3) |
| 668,309 | 939,255 | 298,373 | 9,823 |
| 701,645 | 935,673 | 298,125 | 9,617 |
| 819,406 | 923,092 | 296,598 | 9,302 |
| 1 029,200 | 900,957 | 294,292 | 8,811 |
| 1 312,119 | 871,693 | 291,459 | 8,099 |
| 1 653,510 | 837,298 | 288,287 | 6,992 |
| 2 042,286 | 799,373 | 285,107 | 5,706 |
| 2 470,212 | 759,191 | 282,116 | 4,555 |
| 2 931,283 | 717,723 | 279,045 | 3,641 |
| 3 421,197 | 675,691 | 275,934 | 2,692 |
| 3 937,159 | 633,633 | 272,913 | 1,855 |
| 4 477,475 | 591,936 | 269,707 | 1,286 |
| 5 040,996 | 550,876 | 266,183 | 0,911 |
| 5 627,126 | 510,656 | 262,354 | 0,636 |
| 6 235,769 | 471,427 | 258,213 | 0,428 |
| 6 867,105 | 433,307 | 253,687 | 0,277 |
| 7 521,528 | 396,390 | 248,780 | 0,173 |
| 8 199,571 | 360,767 | 243,521 | 0,103 |
| 8 901,801 | 326,527 | 237,971 | 0,058 |
| 9 629,047 | 293,764 | 232,319 | 0,034 |
| 10 382,883 | 262,580 | 226,984 | 0,019 |
| 11 167,396 | 233,064 | 222,845 | 0,009 |
| 11 990,928 | 205,263 | 220,483 | 0,003 |
| 12 864,380 | 179,195 | 219,279 | 0,001 |
| 13 799,389 | 154,827 | 218,154 | 0,001 |
| 14 812,536 | 132,043 | 217,057 | 0,001 |
| 15 934,765 | 110,604 | 216,026 | 0,000 |
| 17 228,709 | 90,110 | 215,674 | 0,000 |
| 18 821,158 | 70,037 | 216,262 | 0,000 |
| 20 964,607 | 50,038 | 219,300 | 0,000 |
| 24 270,756 | 30,039 | 223,166 | 0,000 |
| 31 430,756 | 10,320 | 232,854 | 0,000 |

|  |
| --- |
| *Пояснения к таблице 4*:  Z (m) = Высота над уровнем моря  Press (гПа) = Полное атмосферное давление  Temp (K) = Температура воздуха  Vapd (г/м3) = Плотность водяных паров.  ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Процедуры Матлаба и Фортрана для получения доступа  к набору данных ESA\_STD\_PROF доступны на веб-сайте МСЭ-R, относящемся  к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи. |

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