

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.835-4

Эталонные стандарты атмосферы

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

а) 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:

$$T(h) = T_i + L_i (h - H_i) \quad \text{К}, \quad (1)$$

где:

$$T_i = T(H_i), \quad (2)$$

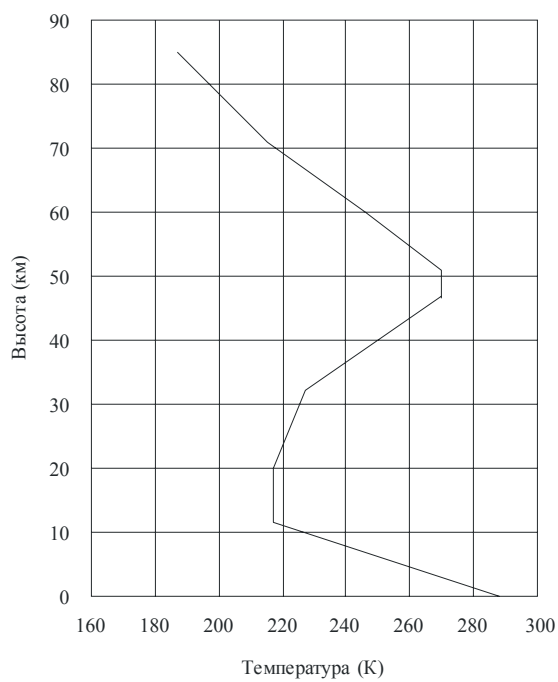
а L_i – градиент температуры, начиная с высоты H_i , который приведен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Нижний индекс, i	Высота, H_i (км)	Градиент температуры, L_i (К/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



0835-01

Если градиент температуры $L_i \neq 0$, давление определяется с помощью уравнения:

$$P(h) = P_i \left[\frac{T_i}{T_i + L_i(h - H_i)} \right]^{34,163/L_i} \quad \text{гПа,} \quad (3)$$

а когда градиент температуры $L_i = 0$, давление определяется следующим образом:

$$P(h) = P_i \exp \left[\frac{-34,163(h - H_i)}{T_i} \right] \quad \text{гПа} \quad (4)$$

Стандартные значения температуры и давления на уровне земной поверхности следующие:

$$\begin{aligned} T_0 &= 288,15 & \text{К} \\ P_0 &= 1013,25 & \text{гПа} \end{aligned} \quad (5)$$

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:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h / h_0) \quad \text{г/м}^3, \quad (6)$$

где приведенная высота $h_0 = 2$ км, а стандартное значение плотности водяных паров на уровне Земли:

$$\rho_0 = 7,5 \quad \text{г/м}^3 \quad (7)$$

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

$$e(h) = \frac{\rho(h) T(h)}{216,7} \quad \text{гПа} \quad (8)$$

Плотность водяных паров уменьшается по экспоненциальному закону при увеличении высоты, вплоть до высоты, на которой коэффициент смешения $e(h)/P(h) = 2 \times 10^{-6}$. 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:

$$h_0 = 6 \text{ км} \quad (9)$$

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 (К) на высоте h (км) определяется как:

$$\begin{aligned} T(h) &= 300,4222 - 6,3533 h + 0,005886 h^2 && \text{для } 0 \leq h < 17 \\ T(h) &= 194 + (h - 17) 2,533 && \text{для } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 270 && \text{для } 47 \leq h < 52 \\ T(h) &= 270 - (h - 52) 3,0714 && \text{для } 52 \leq h < 80 \\ T(h) &= 184 && \text{для } 80 \leq h \leq 100, \end{aligned}$$

тогда как давление P (гПа) равно:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,0306 - 109,0338 h + 3,6316 h^2 && \text{для } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{для } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] && \text{для } 72 \leq h \leq 100, \end{aligned}$$

где P_{10} и P_{72} – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м³):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 19,6542 \exp [-0,2313 h - 0,1122 h^2 \\ &\quad + 0,01351 h^3 - 0,0005923 h^4] && \text{для } 0 \leq h \leq 15 \\ \rho(h) &= 0 && \text{для } h > 15 \end{aligned}$$

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 (К) на высоте h (км) определяется как:

$$\begin{aligned} T(h) &= 294,9838 - 5,2159 h - 0,07109 h^2 && \text{для } 0 \leq h < 13 \\ T(h) &= 215,5 && \text{для } 13 \leq h < 17 \\ T(h) &= 215,5 \exp [(h - 17) 0,008128] && \text{для } 17 \leq h < 47 \\ T(h) &= 275 && \text{для } 47 \leq h < 53 \\ T(h) &= 275 + \{1 - \exp [(h - 53) 0,06]\} 20 && \text{для } 53 \leq h < 80 \\ T(h) &= 175 && \text{для } 80 \leq h \leq 100, \end{aligned}$$

тогда как давление P (гПа) равно:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1012,8186 - 111,5569 h + 3,8646 h^2 && \text{для } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{для } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)] && \text{для } 72 \leq h < 100, \end{aligned}$$

где P_{10} и P_{72} – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м³):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14,3542 \exp [-0,4174 h - 0,02290 h^2 \\ &\quad + 0,001007 h^3] && \text{для } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{для } h > 10 \end{aligned}$$

3.2 Зима, средние широты

Температура T (К) на высоте h (км) определяется как:

$T(h) = 272,7241 - 3,6217 h - 0,1759 h^2$	для	$0 \leq h < 10$
$T(h) = 218$	для	$10 \leq h < 33$
$T(h) = 218 + (h - 33) 3,3571$	для	$33 \leq h < 47$
$T(h) = 265$	для	$47 \leq h < 53$
$T(h) = 265 - (h - 53) 2,0370$	для	$53 \leq h < 80$
$T(h) = 210$	для	$80 \leq h \leq 100,$

тогда как давление P (гПа) равно:

$P(h) = 1018,8627 - 124,2954 h + 4,8307 h^2$	для	$0 \leq h < 10$
$P(h) = P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)]$	для	$10 \leq h < 72$
$P(h) = P_{72} \exp [-0,155 (h - 72)]$	для	$72 \leq h \leq 100,$

где P_{10} и P_{72} – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м^3):

$\rho(h) = 3,4742 \exp [-0,2697 h - 0,03604 h^2 + 0,0004489 h^3]$	для	$0 \leq h \leq 10$
$\rho(h) = 0$	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 (К) на высоте h (км) определяется как:

$T(h) = 286,8374 - 4,7805 h - 0,1402 h^2$	для	$0 \leq h < 10$
$T(h) = 225$	для	$10 \leq h < 23$
$T(h) = 225 \exp [(h - 23) 0,008317]$	для	$23 \leq h < 48$
$T(h) = 277$	для	$48 \leq h < 53$
$T(h) = 277 - (h - 53) 4,0769$	для	$53 \leq h < 79$
$T(h) = 171$	для	$79 \leq h \leq 100,$

тогда как давление P (гПа) равно:

$P(h) = 1008,0278 - 113,2494 h + 3,9408 h^2$	для	$0 \leq h < 10$
$P(h) = P_{10} \exp [-0,140 (h - 10)]$	для	$10 \leq h < 72$
$P(h) = P_{72} \exp [-0,165 (h - 72)]$	для	$72 \leq h \leq 100,$

где P_{10} и P_{72} – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м^3):

$\rho(h) = 8,988 \exp [-0,3614 h - 0,005402 h^2 - 0,001955 h^3]$	для	$0 \leq h \leq 15$
$\rho(h) = 0$	для	$h > 15$

4.2 Зима, высокие широты

Температура T (К) на высоте h (км) определяется как:

$$\begin{aligned} T(h) &= 257,4345 + 2,3474 h - 1,5479 h^2 + 0,08473 h^3 && \text{для } 0 \leq h < 8,5 \\ T(h) &= 217,5 && \text{для } 8,5 \leq h < 30 \\ T(h) &= 217,5 + (h - 30) 2,125 && \text{для } 30 \leq h < 50 \\ T(h) &= 260 && \text{для } 50 \leq h < 54 \\ T(h) &= 260 - (h - 54) 1,667 && \text{для } 54 \leq h \leq 100, \end{aligned}$$

тогда как давление P (гПа) равно:

$$\begin{aligned} P(h) &= 1010,8828 - 122,2411 h + 4,554 h^2 && \text{для } 0 \leq h < 10 \\ P(h) &= P_{10} \exp [-0,147 (h - 10)] && \text{для } 10 \leq h < 72 \\ P(h) &= P_{72} \exp [-0,150 (h - 72)] && \text{для } 72 \leq h \leq 100, \end{aligned}$$

где P_{10} и P_{72} – давление на высоте 10 и 72 км, соответственно.

Для паров воды (г/м³):

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 1,2319 \exp [0,07481 h - 0,0981 h^2 + 0,00281 h^3] && \text{для } 0 \leq h \leq 10 \\ \rho(h) &= 0 && \text{для } h > 10 \end{aligned}$$

Литература

BRUSSAARD, G., DAMOSSO, E. and STOLA, L. [October, 1983] Characterisation of the 50-70 GHz band for space communications. *CSELT Rapporti Tecnici*, Vol. XI, No. 5.

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 до 16 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 (К)	Vapd (г/м ³)
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

Varp (г/м³) = Плотность водяных паров

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Процедуры Матлаба и Фортрана для получения доступа к набору данных ESA_STD_PROF доступны на Web-сайте МСЭ-R, относящемся к 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи
