**Рекомендация МСЭ-R P.835-7**

**(08/2024)**

Серия P: Распространение радиоволн

**Эталонные атмосферы**

**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: <https://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: <https://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, 2025 г.

© ITU 2025

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.835-7

Эталонные атмосферы

(Вопрос МСЭ-R 214/3)

(1992-1994-1997-1999-2005-2012-2017-2024)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.835 приводятся эталонные атмосферы для расчета затухания в атмосферных газах и связанного с ним воздействия на наземных трассах и трассах Земля-космос.

Ключевые слова

Суммарное давление, барометрическое давление, температура, плотность водяного пара.

Сокращения/аббревиатуры

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |  | Американский стандартный код для обмена информацией |
| ECMWF | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts | ЕЦСПП | Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды |
| ERA5 | ECMWF Fifth Generation Reanalysis Product |  | Продукт реанализа ЕЦСПП пятого поколения |
| a.m.s.l. | above mean sea level |  | над средним уровнем моря |

Соответствующие Рекомендации и Справочник МСЭ-R

[[Справочник по радиометеорологии (Издание 2013 г.)](https://www.itu.int/pub/R-HDB-26)](https://www.itu.int/pub/R-HDB-26)

Рекомендация [МСЭ-R P.528](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.528/en)

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.676](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en)

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

Рекомендация [МСЭ-R P.1144](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.1510](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1510/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.1511](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1511/en)

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

Рекомендация [МСЭ-R P.2001](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2001/en)

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

Рекомендация [МСЭ-R P.2145](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2145/en)

Примечание. – Следует использовать последний по времени пересмотр/издание Рекомендации/Справочника.

Условные обозначения

геопотенциальная высота над средним уровнем моря

геометрическая высота над средним уровнем моря

суммарное (барометрическое) давление

температура

плотность паров воды

парциальное давление водяного пара

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

*a)* что эталонные атмосферы необходимы для расчета различных параметров распространения в атмосфере на наземных трассах и трассах Земля-космос;

*b)* что системы численного прогнозирования погоды обеспечивают среднегодовые и месячные вертикальные профили параметров атмосферы в пространственно-временном разрешении,

рекомендует

1 использовать эталонную атмосферу МСЭ-R, приведенную в Приложении 1, для определения температуры, суммарного (барометрического) давления и плотности водяного пара в зависимости от геометрической высоты, когда требуется единый глобальный вертикальный профиль параметров атмосферы;

2 использовать сезонные эталонные атмосферы, приведенные в Приложении 2, для определения температуры, суммарного (барометрического) давления и плотности водяного пара в зависимости от геометрической высоты, когда требуются средние сезонные данные в виде функции от широты;

3 использовать средние глобальные профили температуры, суммарного (барометрического) давления и плотности водяного пара в зависимости от геометрической высоты, приведенные в Приложении 3, которые получены из численных прогнозов погоды, когда необходимы эталонные данные для конкретного места.

Приложение 1

# 1 Эталонная атмосфера МСЭ-R

Следующая эталонная атмосфера МСЭ-R содержит простые эталонные профили суммарного (барометрического) давления, температуры и плотности водяного пара на геометрической высоте от среднего уровня моря до 100 км над средним уровнем моря.

## 1.1 Температура и давление

Суммарное (барометрическое) давление и температура для эталонной атмосферы МСЭ-R получены на основе Стандартной атмосферы США 1976 года. Стандартная атмосфера США 1976 года представляет собой идеализированное устойчивое гипотетическое вертикальное распределение температуры и суммарного (барометрического) давления атмосферы, которое примерно соответствует круглогодичным условиям в средних широтах. Профили атмосферной температуры и атмосферного давления определяются в двух шкалах высоты[[1]](#footnote-1): 1) геопотенциальная высота ( от 0 км до 84 852 км; и 2) геометрическая высота от 86 км до 100 км. Взаимный перевод геопотенциальной высоты (км) и геометрической высоты (км) определяется по формулам, принятым в Стандартной атмосфере США 1976 года:

(1a)

и

, (1b)

где значение геопотенциальной высоты, равное 84 852 км, соответствует 86 км геометрической высоты. Поскольку в различных Рекомендациях серии P (например, в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.676) используется геометрическая высота, температуру и давление на геометрической высоте < 86 км можно рассчитать путем преобразования геометрической высоты в соответствующую геопотенциальную высоту и вычисления температуры и давления на соответствующей геопотенциальной высоте .

Для первой шкалы высоты температура *T* (K) на геопотенциальной высоте (км) составляет:

*T*()  288,15 – 6,5 для 0  < 11; (2a)

*T*()  216,65 для 11  < 20; (2b)

*T*()  216,65 + (− 20) для 20  < 32; (2c)

*T*()  228,65 + 2,8 ( − 32) для 32  < 47; (2d)

*T*()  270,65 для 47  < 51; (2e)

*T*()  270,65 – 2,8 (51) для 51   71; (2f)

*T*()  214,65 – 2,0 (− 71) для 71   84,852; (2g)

и давление *P* (гПa) на геопотенциальной высоте (км) составляет:

*P*()  для 0 < < 11 (3a)

*P*()  для 11   20; (3b)

*P*()  для 20   32; (3c)

*P*()  для 32   47; (3d)

*P*()  для 47   51; (3e)

*P*()  для 51   71; (3f)

*P*()  для 71   84,852. (3g)

Для второй шкалы высоты температура *T* (K) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

*T*(*Z*)  186,8673 для 86  *Z* < 91; (4a)

*T*(*Z*)  для 91  *Z*  100; (4b)

и давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

*P*(*Z*)  для 86  *Z*  100, (5)

где:

;

;

;

;

.

Для сведения, температура и давление в зависимости от геометрической высоты представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

РИСУНОК 1

Температура в зависимости от геометрической высоты



РИСУНОК 2

Суммарное давление в зависимости от геометрической высоты



## 1.2 Плотность водяного пара

В отсутствие надежных местных данных плотность водяного пара в атмосфере ρ в зависимости от геометрической высоты может быть аппроксимирована с использованием следующего отрицательного экспоненциального профиля:

               г/м3, (6)

где значение уменьшается по экспоненте при увеличении геометрической высоты вплоть до геометрической высоты, на которой коэффициент смешения *e* (*Z*)/*P*(*Z*)  2  10−6, а значение парциальной плотности водяного пара составляет:

                гПа (7)

Таким образом, плотность водяного пара выше этой геометрической высоты равна:

              г/м3 (8)

Приложение 2

# 1 Сезонные эталонные атмосферы

В следующих разделах представлены простые сезонные эталонные атмосферы для низких (15° с. ш.), средних (45° с. ш.) и высоких (60° с. ш.) широт северного полушария. Эталонная атмосфера для низких широт определяется для всех четырех времен года; эталонные атмосферы для средних и высоких широт определяются для лета и зимы.

Эталонные профили для других широт могут быть получены следующим образом:

• Для 0° с. ш.  значений широт  15° с. ш. для любого времени года следует использовать годовую эталонную атмосферу для низких широт.

• Для 15° с. ш. < значений широт < 45° с. ш. для лета и зимы эталонная атмосфера рассчитывается путем линейной интерполяции годовой эталонной атмосферы в низких широтах и соответствующей сезонной эталонной атмосферы в средних широтах до интересующей широты.

• Для 45° с. ш.  значений широт < 60° с. ш. для лета и зимы эталонная атмосфера рассчитывается путем линейной интерполяции соответствующих сезонных эталонных атмосфер в средних и высоких широтах.

• Для значений широт ≥ 60° с. ш. для лета и зимы следует использовать соответствующую сезонную эталонную атмосферу в высоких широтах.

Хотя эти сезонные эталонные атмосферы рассчитаны специально для широт северного полушария, они также могут применяться для соответствующих широт южного полушария.

## 1.1 Годовая эталонная атмосфера в низких широтах

Для низких широт (15° с. ш.) для всех четырех времен года могут использоваться следующие профили.

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

*T*(*Z*)  300,4222 – 6,3533 *Z*  0,005 886 *Z*2 для 0  *Z* < 17 (9a)

*T*(*Z*)  194  2,533 (*Z* – 17) для 17  *Z* < 47 (9b)

*T*(*Z*)  270 для 47  *Z* < 52 (9c)

*T*(*Z*)  270 – 3,0714 (*Z* – 52) для 52  *Z* < 80 (9d)

*T*(*Z*)  184 для 80  *Z*  100, (9e)

тогда как суммарное (барометрическое) давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) определяется как:

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

*P*(*Z*)  *P*10 exp[–0,147 (*Z* – 10)] для 10  *Z*  72 (10b)

*P*(*Z*)  *P*72 exp[–0,165 (*Z*– 72)] для 72  *Z*  100, (10c)

где *P*10 и *P*72 – значения суммарного давления на высоте 10 и 72 км соответственно.

Плотность водяного пара (г/м3) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

для 0  Z  15 (11a)

для *Z*  15 (11b)

## 1.2 Эталонная атмосфера в средних широтах

Для средних широт (45° с. ш.) для лета и зимы могут использоваться следующие профили.

### 1.2.1 Лето, средние широты

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

*T*(*Z*)  294,9838 – 5,2159 *Z* – 0,07109 *Z*2 для 0  *Z* < 13 (12a)

*T*(*Z*)  215,15 для 13  *Z* < 17 (12b)

*T*(*Z*)  215,15 exp[0,008128 (*Z* – 17)] для 17  *Z* < 47 (12c)

*T*(*Z*)  275 для 47  *Z* < 53 (12d)

*T*(*Z*)  275  111,57755{1 – exp[0,0237 (*Z* – 53)]} для 53  *Z* < 80 (12e)

*T*(*Z*)  175 для 80  *Z*  100, (12f)

тогда как суммарное (барометрическое) давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) определяется как:

*P*(*Z*)  1012,8186 – 111,5569 *Z*  3,8646 *Z*2 для 0  *Z*  10 (13a)

*P*(*Z*)  *P*10 exp[− 0,147 (*Z* – 10)] для 10  *Z*  72 (13b)

*P*(*Z*)  *P*72 exp[−0,165 (*Z* – 72)] для 72  *Z*  100, (13c)

где *P*10 и *P*72 – значения суммарного давления на высоте 10 и 72 км соответственно.

Плотность водяного пара (г/м3) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

(*Z*)  14,3542 exp[–0,4174 *Z* – 0,02290 *Z*2  0,001007 *Z*3] для 0  *Z*  15 (14a)

(*Z*)  0 для *Z*  15 (14b)

### 1.2.2 Зима, средние широты

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

*T*(*Z*)  272,7241 – 3,6217 *Z* – 0,1759 *Z*2 для 0  *Z* < 10 (15a)

*T*(*Z*)  218 для 10  *Z* < 33 (15b)

*T*(*Z*)  218  3,3571 (*Z* – 33) для 33  *Z* < 47 (15c)

*T*(*Z*)  265 для 47  *Z* < 53 (15d)

*T*(*Z*)  265 – 2,0370 (*Z* – 53) для 53  *Z* < 80 (15e)

*T*(*Z*)  210 для 80  *Z*  100, (15f)

тогда как суммарное (барометрическое) давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) определяется как:

*P*(*Z*)  1018,8627 – 124,2954 *Z*  4,8307 *Z*2 для 0  *Z*  10 (16a)

*P*(*Z*)  *P*10 exp[– 0,147 (*Z* – 10)] для 10  *Z*  72 (16b)

*P*(*Z*)  *P*72 exp[– 0,155 (*Z* – 72)] для 72  *Z*  100, (16c)

где *P*10 и *P*72 – значения суммарного давления на высоте 10 и 72 км соответственно.

Плотность водяного пара (г/м3) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

(*Z*)  3,4742 exp[–0,2697 *Z –* 0,03604 *Z*2  0,0004489 *Z*3] для 0  *Z*  10 (17a)

(*Z*)  0 для *Z*  10 (17b)

### 1.3 Эталонная атмосфера в высоких широтах

Для высоких широт (60° с. ш.) для лета и зимы могут использоваться следующие профили.

## 1.3.1 Лето, высокие широты

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

*T*(*Z*)  286,8374 – 4,7805 *Z* – 0,1402 *Z*2 для 0  *Z* < 10 (18a)

*T*(*Z*)  225 для 10  *Z* < 23 (18b)

*T*(*Z*)  225 exp[0,008317 (*Z* – 23)] для 23  *Z* < 48 (18c)

*T*(*Z*)  277 для 48  *Z* < 53 (18d)

*T*(*Z*)  277 – 4,0769 (*Z* – 53) для 53  *Z* < 79 (18e)

*T*(*Z*)  171 для 79  *Z*  100, (18f)

тогда как суммарное (барометрическое) давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) определяется как:

*P*(*Z*)  1008,0278 – 113,2494 *Z*  3,9408 *Z*2 для 0  *Z*  10 (19a)

*P*(*Z*)  *P*10 exp[–0,140 (*Z* – 10)] для 10  *Z*  72 (19b)

*P*(*Z*)  *P*72 exp[–0,165 (*Z* – 72)] для 72  *Z*  100, (19c)

где *P*10 и *P*72 – значения суммарного давления на высоте 10 и 72 км соответственно.

Плотность водяного пара (г/м3) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

(*Z*)  8,988 exp[–0,3614 *Z –* 0,005402 *Z*2– 0,001955 *Z*3] для 0  *Z*  15 (20a)

(*Z*)  0 для *Z*  15 (20b)

### 1.3.2 Зима, высокие широты

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

*T*(*Z*)  257,4345  2,3474 *Z* – 1,5479 *Z*2  0,08473 *Z*3 для 0  *Z* < 8,5 (21a)

*T*(*Z*)  217,5 для 8,5  *Z* < 30 (21b)

*T*(*Z*)  217,5  2,125 (*Z* – 30) для 30  *Z* < 50 (21c)

*T*(*Z*)  260 для 50  *Z* < 54 (21d)

*T*(*Z*)  260 – 1,667 (*Z* – 54) для 54  *Z*  100 (21e)

тогда как суммарное (барометрическое) давление *P* (гПa) на геометрической высоте *Z* (км) определяется как:

*P*(*Z*)  1010,8828 – 122,2411 *Z*  4,554 *Z*2 для 0  *Z*  10 (22a)

*P*(*Z*)  *P*10 exp[–0,147 (*Z* – 10)] для 10  *Z*  72 (22b)

*P*(*Z*)  *P*72 exp[–0,150 (*Z* – 72)] для 72  *Z*  100 (22c)

где *P*10 и *P*72 – значения суммарного давления на высоте 10 и 72 км соответственно.

Плотность водяного пара (г/м3) на геометрической высоте *Z* (км) составляет:

(*Z*)  1,2319 exp[0,07481 *Z –* 0,0981 *Z*2  0,00281 *Z*3] для 0  *Z*  10 (23a)

(*Z*)  0 для *Z*  10 (23b)

Приложение 3

# 1 Глобальные среднегодовые и среднемесячные вертикальные профили

В этом Приложении содержатся среднегодовые и среднемесячные вертикальные профили суммарного (барометрического) давления, температуры и плотности водяного пара на 138 уровнях высоты над средним уровнем моря, полученные путем усреднения данных ERA5 ЕЦСПП за 30 лет (1991–2020 гг.).

Эти вертикальные профили являются неотъемлемой составляющей настоящей Рекомендации и доступны в виде цифровых карт, содержащих части 1–12, соответствующие каждому месяцу года, и часть 13, соответствующую годовому периоду. Каждая часть содержит zip-файл с четырьмя файлами карт – P.bin, T.bin, WV.bin и Z.bin для соответствующего периода. Файл P.bin содержит профили давления, T.bin содержит профили температуры, WV.bin содержит профили плотности водяного пара, а Z.bin содержит профили геометрической высоты над средним уровнем моря. Характеристики каждого файла карты приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Характеристики файла карты

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значение |
| Формат | IEEE 754 |
| Порядок байтов | Обратный (little endian) |
| Точность | Одинарная (4 байта/число) |
| Общее кол-во байтов | 573 506 472 |
| Диапазон широт | От –90° с. ш. до 90° с. ш. |
| Приращение широты | +0,25° |
| Диапазон долгот | От –180° в. д. до 180° в. д. |
| Приращение долготы | +0,25° |
| Кол-во точек на сетке широты | 721 |
| Кол-во точек на сетке долготы | 1 441 |
| Кол-во уровней высоты | 138 |
| Единицы измерения суммарного давления | гПа |
| Единицы измерения температуры | K |
| Единицы измерения плотности водяного пара | г/м3 |
| Единицы измерения высоты | км над средним уровнем моря |

Каждый параметр хранится в виде трехмерной матрицы *parameter* (*ilevel*, *ilat*, *ilon*), где индексация начинается с 1: Первый из четырех байтов, соответствующих значению суммарного (барометрического) давления (, температуры (), плотности водяного пара (*WV*) или геометрической высоты над средним уровнем моря (*Z*) в любой точке сетки , ) на высоте (, представляет собой байт с номером , где варьируется от до.

, (24)

где:

(25)

(26)

(27)

В каждой точке сетки имеется 138 уровней давления, температуры и плотности водяного пара, где и – это значения суммарного давления, температуры и плотности водяного пара на высоте над средним уровнем моря . – это высота поверхности Земли над средним уровнем моря по ERA5[[2]](#footnote-2), а   – максимальная высота над средним уровнем моря в соответствующей точке сетки. может отличаться от топографической высоты, приведенной в Рекомендации [МСЭ­R P.1511](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1511/en), которая была определена путем сочетания результатов спутниковой радарной альтиметрии с высокой разрешающей способностью и местных данных альтиметрии.

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

1. км – это единицы измерения геопотенциальной высоты, а км – единицы измерения геометрической высоты. [↑](#footnote-ref-1)
2. Геометрическая высота поверхности Земли над средним уровнем моря была получена путем деления значения гравитационной потенциальной энергии единицы массы на поверхности Земли (м2/с2) согласно ERA5 на ускорение свободного падения (9,80665 м/с2) и преобразования полученной геопотенциальной высоты поверхности Земли в геометрическую высоту поверхности Земли. [↑](#footnote-ref-2)