

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1622-1
(08/2022)

**Методы прогнозирования,
необходимые для проектирования
систем связи Земля-космос,
работающих в диапазоне 20–375 ТГц**

Серия Р
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-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
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, 2023 г.

© ITU 2023

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.1622-1

Методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос, работающих в диапазоне 20–375 ТГц

(2003-2022)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описаны эффекты распространения, учитываемые при планировании систем связи Земля-космос, работающих в диапазоне частот от 20 до 375 ТГц. В ней предоставлены методы прогнозирования распространения радиоволн с учетом эффектов, вызванных рэлеевским рассеянием и рассеянием на шаровых частицах, а также турбулентностью, возникающей в атмосфере. В ней также дается ссылка на Рекомендацию МСЭ-R P.676, в которой представлены методы прогнозирования потерь на поглощение в атмосфере.

Ключевые слова

Поглощение в атмосфере, турбулентность, амплитудное мерцание, рэлеевское рассеяние, рассеяние на шаровых частицах.

Соответствующие Рекомендации МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R P.676

Рекомендация МСЭ-R P.1621

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует использовать последнюю действующую версию/редакцию Рекомендаций.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что спектр частот между 20 ТГц и 375 ТГц пригоден для определенных видов космической связи в средах околоземного пространства и дальнего космоса;
- b) что для надлежащего планирования систем связи Земля-космос, работающих в диапазоне частот 20–375 ТГц, необходимо иметь соответствующие методы прогнозирования распространения радиоволн;
- c) что были разработаны методы прогнозирования наиболее значительных эффектов, связанных с распространением радиоволн, для систем связи Земля-космос, работающих в диапазоне частот 20–375 ТГц;
- d) что в максимально возможной степени эти методы были проверены по имеющимся данным и продемонстрировали точность, которая совместима с естественной изменчивостью явлений распространения и адекватна для большинства существующих применений, используемых при планировании систем, работающих в диапазоне частот 20–375 ТГц,

признавая,

что в пункте 78 Статьи 12 Устава МСЭ указано, что в функции Сектора радиосвязи входит "...проведение изучений без ограничения диапазона частот и принятие рекомендаций...",

рекомендует,

чтобы для планирования систем связи Земля-космос в соответствующих диапазонах их работоспособности, указанных в Приложениях 1 и 2, использовались методы прогнозирования эффектов, связанных с распространением радиоволн, приведенные в Приложениях 1 и 2.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Дополнительную информацию, связанную с фундаментальными данными по распространению радиоволн для частот от 20 ТГц до 375 ТГц, можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.1621.

Приложение 1

1 Введение

Атмосфера Земли сложна и динамична, она будет оказывать влияние на работу системы связи между Землей и орбитальным космическим аппаратом, действующей в диапазоне частот от 20 ТГц до 375 ТГц. К такому влиянию на систему относятся:

- общая потеря амплитуды сигнала из-за поглощения молекулами атмосферных газов, присутствующих на трассе распространения;
- общая потеря амплитуды сигнала и увеличение фонового шума из-за рассеяния присутствующими на трассе распространения частицами размером от долей длины волны до нескольких длин волн;
- флуктуации амплитуды и фазы принимаемого сигнала из-за турбулентности, вызванной температурными колебаниями в атмосфере.

В следующих разделах настоящего Приложения представлены репрезентативные методы и уравнения, необходимые для прогнозирования.

2 Потери на поглощение

Возможны расчеты атмосферного поглощения радиоволн с использованием полинейного метода, аналогичного тому, который представлен в Рекомендации МСЭ-R P.676. Однако поскольку в спектральном диапазоне частот от 10 ТГц до 1000 ТГц (от 30 мкм до 0,3 мкм) присутствуют тысячи отдельных линий, такой метод громоздок и требует значительных вычислительных ресурсов. В астрономическом сообществе определяют окна низкого атмосферного поглощения с помощью стандартизированных фильтров, как описано в таблице 1. Центральные частоты этих фильтров обеспечивают оценку областей спектра, пригодных для связи на трассах Земля-космос, лишь в отношении поглощающих характеристик атмосферы. Поскольку поглощение частично зависит от локальной температуры, давления и химического состава атмосферы, ширина полосы фильтров не обязательно соответствует ширине полосы областей со слабым атмосферным поглощением. Четыре полосы самых высоких частот составляют не отдельные области со слабым поглощением, а континуум видимого и ультрафиолетового спектра с относительно слабым атмосферным поглощением. По возможности следует проводить измерения атмосферного поглощения до развертывания земной станции.

ТАБЛИЦА 1

Стандартные астрономические фильтры для частот выше 15 ТГц

Фильтр	Q	N	M	L'	L	K	H
Центральная частота (ТГц)	15	30	63	79	86	136	180
Длина волны (мкм)	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
Ширина полосы (ТГц) (мкм)	15,2 6,50	18,2 5,70	15,9 1,20	14,7 0,70	17,3 0,70	30,1 0,48	33,3 0,30

Фильтр	J	I _L	I _S	R	V	B	U
Центральная частота (ТГц)	240	330	370	430	560	700	830
Длина волны (мкм)	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
Ширина полосы (ТГц) (мкм)	74,7 0,38	90,5 0,24	115,1 0,24	138,1 0,22	93,2 0,09	164,5 0,10	163,6 0,07

3 Потери из-за рассеяния

Рассеяние обычно определяется как изменение направления распространения энергии частицами, присутствующими на его пути. Наиболее значительное воздействие на системы связи, работающие на частотах от 20 ТГц до 375 ТГц, в открытом космосе оказывают:

- частицы диаметром примерно равным длине волны передаваемого сигнала, присутствующие на пути распространения, которые отклоняют передаваемый сигнал в сторону от предполагаемой трассы;
- частицы диаметром значительно меньше длины волны передаваемого сигнала, присутствующие в среде распространения, которые перенаправляют в приемник постороннюю энергию.

3.1 Ослабление передаваемого сигнала из-за рассеяния на шаровых частицах

Преобладающим источником потерь на частотах ниже 375 ТГц является рассеяние на шаровых частицах, в значительной степени вызываемое микроскопическими частицами воды.

Когда локальные измерения, характеризующие атмосферу, невозможны, для расчета ослабления из-за рассеяния на трассах Земля-космос можно использовать описанный ниже метод. Если измерения возможны, то можно использовать детальный расчет, приведенный в Приложении 2.

Следующий метод подходит для земных станций, расположенных на высоте от 0 до 5 км над уровнем моря и работающих в диапазоне частот от 150 ТГц до 375 ТГц, который чаще всего используется для связи в открытом космосе. Точность метода составляет примерно 0,1 дБ при углах места более 45°. Однако локальные атмосферные условия могут привести к изменчивости в несколько децибел.

Требуются следующие параметры:

λ – длина волны (мкм);

h_E – высота земной станции над средним уровнем моря (км);

θ – угол места (градусы).

Шаг 1. Расчет эмпирических коэффициентов, зависящих от длины волны:

$$a = 0,000487\lambda^3 - 0,002237\lambda^2 + 0,003864\lambda - 0,004442; \quad (1a)$$

$$b = -0,00573\lambda^3 + 0,02639\lambda^2 - 0,04552\lambda + 0,05164; \quad (1b)$$

$$c = 0,02565\lambda^3 - 0,1191\lambda^2 + 0,20385\lambda - 0,216; \quad (1c)$$

$$d = -0,0638\lambda^3 + 0,3034\lambda^2 - 0,5083\lambda + 0,425. \quad (1d)$$

Шаг 2. Расчет коэффициента поглощения τ' от h_E до ∞ :

$$\tau' = a h_E^3 + b h_E^2 + c h_E + d \quad \text{Нп.} \quad (2)$$

Шаг 3. Расчет коэффициента затухания из-за рассеяния в атмосфере A_S вдоль трассы:

$$A_S = \frac{4,3429\lambda'}{\sin(\theta)} \quad \text{дБ.} \quad (3)$$

3.2 Увеличение фонового шума из-за рэлеевского рассеяния солнечной энергии

Для систем, работающих на частотах ниже 375 ТГц, действие рэлеевского рассеяния незначительно. Самый существенный результат влияния рэлеевского рассеяния на системы, работающие на частотах выше 375 ТГц – внесение фонового шума в приемники. Фоновый шум появляется в направлениях как Земля-космос, так и космос-Земля. Основным источником шума для земных станций, поддерживающих связь с космическими аппаратами, обусловлен рэлеевским рассеянием солнечного света в дневных условиях. На космический аппарат, направленный на Землю, также будет воздействовать шум от солнечного света, рассеиваемый поверхностью Земли.

4 Влияние турбулентности на системы, работающие в диапазоне частот от 20 до 375 ТГц

Как указано в Рекомендации МСЭ-R P.1621, величина турбулентности измеряется в соответствии с профилем C_n^2 .

Воздействия турбулентности можно в целом разделить на следующие категории:

- амплитудное мерцание, вызванное перераспределением энергии внутри луча;
- явные изменения угла прихода входящего сигнала;
- блуждание луча, приводящее к отклонению центроида луча от оси распространения;
- расширение луча, вызванное неравномерным преломлением поперек волнового фронта, что приводит к уменьшению мощности в плоскости апертуры приемной антенны.

4.1 Амплитудное мерцание

Турбулентность на частотах от 150 ТГц до 375 ТГц вызывает флуктуации с гауссовым распределением логарифмической освещенности N приходящей волны, называемые мерцанием, за счет случайного пространственного перераспределения ее мощности по поверхности волнового фронта во времени.

Сила мерцания измеряется по дисперсии амплитуды луча. Для расчета силы мерцания необходимы следующие параметры:

h_0 – высота земной станции над уровнем земли (м);

λ – длина волны;

θ – угол места;

Z – эффективная высота турбулентности (обычно 20 000 м).

Мерцание традиционно выражается через дисперсию σ^2 от $\ln(N)$ по формуле:

$$\sigma_{\ln N}^2 = 2,253k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh \quad \text{Нп}^2, \quad (4a)$$

где:

k : волновое число ($= 2\pi/\lambda$);

λ : длина волны (м);

φ : зенитный угол;

h : высота над уровнем земли (м).

Это эквивалентно:

$$\sigma_{\ln N}^2 = \frac{1,924 \times 10^8 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{Нп}^2, \quad (4b)$$

где длина волны λ выражена в микронах, а остальные параметры соответствуют указанным выше.

При желании это легко преобразовать в $\text{dB}N$ от флуктуации, умножив коэффициент в числителе на коэффициент изменения базы и коэффициент 10, в результате чего получим:

$$\sigma_{\text{dB}N}^2 = \left(\frac{10}{\ln(10)} \right)^2 \sigma_{\ln N}^2 = \frac{3,622 \times 10^9 \int_{h_0}^Z C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6} \theta} \quad \text{дБ}^2. \quad (4c)$$

Если локальные измерения C_n^2 недоступны, можно использовать профиль $C_n^2(h)$ из пункта 5.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.1621.

В таблице 2 приведены примеры выбранных частот в спектральной области от 10 ТГц до 1000 ТГц (от 30 мкм до 0,3 мкм). Значения $\sigma_{\ln N}^2$ и $\sigma_{\text{dB}N}^2$ для каждой из частот вычислены, исходя из предположения, что профиль структуры турбулентности взят из пункта 5.1.1 Рекомендации

МСЭ-R P.1621, размер апертуры меньше, чем интервал когерентности атмосферы r_0 угол места равен 75° , антенна земной станции находится на высоте 5,5 м над землей, а среднеквадратичная скорость ветра вдоль вертикальной трассы v_{rms} составляет 21 м/с и 30 м/с.

ТАБЛИЦА 2

Пример статистики мерцания для $C_0 = 1,7 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$

Частота (ТГц)	Длина волны (мкм)	σ_{InN}^2	σ_{dBV}^2	σ_{InN}^2	σ_{dBV}^2
		$(v_{rms} = 21 \text{ м/с})$		$(v_{rms} = 30 \text{ м/с})$	
563,9	0,532	0,23	4,35	0,36	6,84
352,9	0,850	0,13	2,52	0,21	3,96
282,0	1,064	0,10	1,94	0,16	3,05
193,5	1,55	0,07	1,25	0,10	1,97

4.1.1 Амплитудное мерцание на трассах в направлении Земля-космос

Дисперсия логарифмической освещенности на трассах в направлении Земля-космос σ_{E-s}^2 остается небольшой ($\ll 4$). Эксперименты подтвердили, что вероятность превышения этого предела низка. Обычно по мере увеличения частоты с 24 ТГц до 750 ТГц (от 12,5 мкм до 0,4 мкм) σ_{InN}^2 уменьшается примерно на два порядка.

Усреднение по апертуре на трассах в направлении Земля-космос обычно не рассматривается. Волновой фронт, выходящий из атмосферы, испытывает такое же пространственное перераспределение энергии по своей поверхности, как и в направлении космос-Земля. Однако дифракция волнового фронта при его распространении в пространстве приводит к рассеянию отдельных амплитудных и фазовых возмущений по большим площадям. Таким образом, радиус фазовой когерентности на апертуре приемной антенны космического аппарата намного больше вероятного размера этой апертуры ($< 1 \text{ м}$). Следовательно, усреднение по апертуре не происходит, и мерцание, возникающее на приемной антенне, определяется выражением:

$$\sigma_{E-s}^2 = \sigma_{InN}^2 \quad \text{Нп}^2. \quad (5)$$

При работе на частоте 150 ТГц (2,0 мкм), когда σ_{InN}^2 составляет около 0,15, примерно в течение 1% времени происходят замирания на 4 дБ с частотой около 150 Гц и продолжительностью 10^{-5} с .

4.1.2 Амплитудное мерцание на трассах в направлении космос-Земля

Воздействие мерцания на трассы в направлении космос-Земля может быть достаточно сильным, чтобы серьезно ограничить работу приемников. Если приемник имеет конечную апертуру, превышающую длину атмосферной когерентности r_0 , то эффект мерцания пространственно усредняется по апертуре, что приводит к уменьшению σ_{InN}^2 . Хотя усреднение по апертуре способно смягчить эффекты амплитудного мерцания, искаженная фаза может значительно ухудшить характеристики систем оптического приемника с одним пространственным режимом, таких как когерентное детектирование или прямое детектирование с предварительным усилением.

Значение σ_{InN}^2 на трассах в направлении космос-Земля σ_{S-E}^2 модифицируется коэффициентом усреднения по апертуре A . Коэффициент усреднения по апертуре определяется как отношение дисперсии логарифмической освещенности, полученной от собирающей апертуры конечного размера, к соответствующей величине, полученной от точечной апертуры, и рассчитывается по следующей формуле.

Шаг 1. Расчет высоты шкалы турбулентности z_0 по формуле:

$$z_0 = \left[\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^2 dh}{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) h^{5/6} dh} \right]^{6/7} \quad \text{м}, \quad (6)$$

где:

h_0 : высота земной станции над уровнем земли (м);

h : высота над уровнем земли (м);

Z : эффективная высота турбулентности над уровнем земли (обычно 20 000 м).

Шаг 2. Расчет коэффициента усреднения по апертуре A по формуле:

$$A = \frac{1}{1 + 1,1 \times 10^7 \left(\frac{D^2 \sin \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}}, \quad (7)$$

где:

D : диаметр апертуры земной станции (м);

θ : угол места;

λ : длина волны (мкм).

Шаг 3. Расчет дисперсии логарифмической освещенности на трассе в направлении космос-Земля σ_{s-E}^2 по формуле:

$$\sigma_{s-E}^2 = A \sigma_{\ln N}^2 \quad \text{Нп}^2. \quad (8)$$

4.2 Угол прихода

Вызванные турбулентностью флуктуации кажущегося угла прихода принимаемого луча обусловлены изменениями показателей преломления воздушных частиц на пути распространения. Влияние этих флуктуаций в направлении Земля-космос незначительно. Типичные среднеквадратичные отклонения угла прихода составляют порядка 1 мкрад и таким образом оказывают незначительное влияние. Однако в направлении космос-Земля среднеквадратичные флуктуации составляют порядка нескольких микрорadian, и их следует учитывать.

Описанный ниже метод можно использовать для расчета дисперсии угла прихода σ_{β}^2 на трассах в направлении космос-Земля через заданный профиль турбулентности C_n^2 для углов места более 45° . Требуется следующие параметры:

h_0 – высота земной станции над уровнем земли (м);

θ – угол места;

D_R – диаметр апертуры приемника (м);

Z – эффективная высота турбулентности (обычно 20 000 м).

Шаг 1. Получение вертикального профиля турбулентности атмосферы. Если эту долгосрочную статистику нельзя получить из местных источников данных, то можно получить оценку с использованием пункта 5.1.1 Рекомендации МСЭ-R P.1621.

Шаг 2. Расчет интегрального профиля турбулентности ζ по формуле:

$$\zeta = \int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh \quad \text{м}^{1/3}, \quad (9)$$

где h – высота над уровнем земли (м).

Если локальные измерения интегрального профиля C_n^2 недоступны, удовлетворительные результаты для большинства применений дает эмпирическая аппроксимация, приведенная в уравнениях (9)–(12) Рекомендации МСЭ-R P.1621.

Шаг 3. Расчет дисперсии угла прихода σ_β^2 по формуле:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{2,914 \zeta D_R^{-1/3}}{\sin \theta} \quad \text{рад}^2. \quad (10)$$

На трассах в направлении космос-Земля расходимость луча и большое расстояние распространения через открытый космос сделают волновой фронт к тому моменту, когда он достигнет турбулентности, намного большим, чем r_0 . Поэтому эффекты атмосферы усредняются по ширине луча. Член размера антенны в формуле (11) учитывает долю луча, видимую земной станцией.

4.3 Отклонение луча

Отклонение луча – это смещение луча от предполагаемого направления распространения. В направлении Земля-космос отклонение луча значительно и может иметь порядок ширины луча. На расстоянии L среднеквадратичное смещение отклоненного луча r_c определяется выражением:

$$\sigma_{rc} = 2080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{м}, \quad (11a)$$

где:

- L : расстояние распространения от земной станции до спутника (км);
- D_T : диаметр апертуры передающей антенны (м);
- h_0 : высота земной станции над уровнем земли (м);
- h : высота над уровнем земли (м);
- Z : эффективная высота турбулентности (обычно 20 000 м).

Среднеквадратичное угловое смещение ω_c отклоненного луча можно рассчитать, исключив длину пути распространения из уравнения:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2,08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^Z C_n^2(h) dh}{D_T^{1/3} \sin(\theta)}} \quad \text{рад}. \quad (11b)$$

Если локальные измерения интегрального профиля C_n^2 недоступны, удовлетворительные результаты для большинства применений дает эмпирическая аппроксимация, приведенная в уравнениях (9)–(12) Рекомендации МСЭ-R P.1621.

Отклонение луча в направлении Земля-космос потенциально может быть уменьшено за счет использования нескольких лучей или передатчика, управляемого устройством слежения. Отклонение луча в направлении космос-Земля не является серьезной проблемой. Лучи в этом направлении распространяются за счет турбулентности только на последних 10–20 км пути.

4.4 Расширение луча

Расширение луча – это увеличение диаметра луча сверх того, какое происходит в результате расхождения луча при распространении через турбулентность в атмосфере. Расширение луча приводит к уменьшению мощности, поступающей в приемник, ввиду того, что передаваемая энергия распределяется по большей площади. Однако величина расширения, вызванного атмосферой, обычно очень мала по сравнению с расхождением и не приводит к заметной потере сигнала ни в направлении Земля-космос, ни в направлении космос-Земля.

Приложение 2

Детальный расчет затухания из-за рэлеевского рассеяния и рассеяния на шаровых частицах

Когда возможны локальные измерения, характеризующие атмосферу, для расчета ослабления на трассах Земля-космос можно использовать описанный ниже метод. Для этой модели необходимы следующие параметры:

λ – длина волны (мкм);

h_E – высота земной станции над уровнем моря (км);

θ – угол места.

Шаг 1. Расчет коэффициента рэлеевского рассеяния β_R с шагом 1 км от высоты земной станции до высоты 30 км над уровнем моря по формуле:

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \quad \text{км}^{-1}, \quad (12)$$

где:

σ_R : рэлеевское рассеяние (м^2);

$n_R(h)$: численная плотность атмосферы (м^{-3}).

На высоте более 30 км эффекты рэлеевского рассеяния незначительны. Если измеренные значения σ_R недоступны, следует использовать значения для стандартной эталонной атмосферы, приведенные в таблице 3. Если измеренные значения n_R недоступны, следует использовать значения для стандартной эталонной атмосферы, приведенные в таблице 4.

Шаг 2. Расчет коэффициента рассеяния на шаровых частицах (то есть аэрозолях) β_A с шагом 1 км от высоты земной станции до высоты 30 км над уровнем моря по формуле:

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0) n_A(h)}{n_A(0)} \quad \text{км}^{-1}, \quad (13)$$

где:

$\beta_A(0)$: коэффициент аэрозольного рассеяния на уровне моря (км^{-1});

$n_A(h)$: численная плотность аэрозоля на высоте h км над уровнем моря (м^{-3}).

Если измеренные значения β_A недоступны, следует использовать значения для стандартной эталонной атмосферы, приведенные в таблице 3. Если измеренные значения n_A недоступны, следует использовать значения для стандартной эталонной атмосферы, приведенные в таблице 4.

ТАБЛИЦА 3

Поперечное сечение рэлеевского рассеяния σ_R и коэффициент рассеяния $\beta_A(0)$ на шаровых частицах на уровне моря $\beta_A(0)$ для некоторых длин волн

Длина волны (мкм)	$\sigma_R^{(1)}$ (м ²)	$\beta_A(0)^{(2)}$ (км ⁻¹)	Длина волны (мкм)	$\sigma_R^{(1)}$ (м ²)	$\beta_A(0)^{(2)}$ (км ⁻¹)
0,50	$6,735 \times 10^{-31}$	0,167	1,06	$3,320 \times 10^{-32}$	0,113
0,55	$4,563 \times 10^{-31}$	0,158	1,26	$1,600 \times 10^{-32}$	0,108
0,60	$3,202 \times 10^{-31}$	0,150	1,67	$5,210 \times 10^{-33}$	0,098
0,65	$2,313 \times 10^{-31}$	0,142	2,17	$1,800 \times 10^{-33}$	0,085
0,70	$1,713 \times 10^{-31}$	0,135	3,50	$2,681 \times 10^{-34}$	0,070
0,80	$9,989 \times 10^{-32}$	0,127	4,00	$1,571 \times 10^{-34}$	0,063
0,90	$6,212 \times 10^{-32}$	0,120			

(1) Значения σ_R для длин волн, не включенных в таблицу, можно интерполировать, исходя из логарифмической линейной зависимости.

(2) Значения $\beta_A(0)$ для длин волн, не включенных в таблицу, можно интерполировать, исходя из степенной зависимости.

ТАБЛИЦА 4

Численные значения плотности аэрозоля n_A и численная плотность атмосферы n_R для некоторых значений высоты над уровнем моря

Высота (км)	n_A (м ⁻³)	n_R (м ⁻³)	Высота (км)	n_A (м ⁻³)	n_R (м ⁻³)
0	$2,0 \times 10^8$	$2,548 \times 10^{25}$	16	$6,7 \times 10^4$	$3,462 \times 10^{24}$
1	$8,7 \times 10^7$	$2,312 \times 10^{25}$	17	$7,3 \times 10^4$	$2,959 \times 10^{24}$
2	$3,8 \times 10^7$	$2,093 \times 10^{25}$	18	$8,0 \times 10^4$	$2,530 \times 10^{24}$
3	$1,6 \times 10^7$	$1,891 \times 10^{25}$	19	$9,0 \times 10^4$	$2,163 \times 10^{24}$
4	$7,2 \times 10^6$	$1,704 \times 10^{25}$	20	$8,6 \times 10^4$	$1,849 \times 10^{24}$
5	$3,1 \times 10^6$	$1,532 \times 10^{25}$	21	$8,2 \times 10^4$	$1,574 \times 10^{24}$
6	$1,3 \times 10^6$	$1,373 \times 10^{25}$	22	$8,0 \times 10^4$	$1,341 \times 10^{24}$
7	$4,0 \times 10^5$	$1,227 \times 10^{25}$	23	$7,6 \times 10^4$	$1,144 \times 10^{24}$
8	$1,4 \times 10^5$	$1,093 \times 10^{25}$	24	$5,2 \times 10^4$	$9,760 \times 10^{23}$
9	$5,0 \times 10^4$	$9,713 \times 10^{24}$	25	$3,6 \times 10^4$	$8,335 \times 10^{23}$
10	$2,6 \times 10^4$	$8,599 \times 10^{24}$	26	$2,5 \times 10^4$	$7,123 \times 10^{23}$
11	$2,3 \times 10^4$	$7,586 \times 10^{24}$	27	$2,4 \times 10^4$	$6,092 \times 10^{23}$
12	$2,1 \times 10^4$	$6,487 \times 10^{24}$	28	$2,2 \times 10^4$	$5,214 \times 10^{23}$
13	$2,3 \times 10^4$	$5,544 \times 10^{24}$	29	$2,0 \times 10^4$	$4,466 \times 10^{23}$
14	$2,5 \times 10^4$	$4,739 \times 10^{24}$	30	$1,9 \times 10^4$	$3,848 \times 10^{23}$
15	$4,1 \times 10^4$	$4,050 \times 10^{24}$			

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Значения n_A и n_R на высотах, не включенных в таблицу, можно линейно интерполировать.

Шаг 3. Расчет коэффициента поглощения из-за рассеяния β_T на каждой высоте от высоты земной станции до 30 км над уровнем моря по формуле:

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \quad \text{км}^{-1}. \quad (14)$$

Шаг 4. Расчет коэффициента поглощения из-за рассеяния τ'_T на каждой высоте от высоты земной станции до 30 км над уровнем моря по формуле:

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \overline{\beta_T}(h) \Delta h, \quad (15)$$

где:

- h_E : высота земной станции над уровнем моря (км);
- $\overline{\beta_T}(h)$: среднее значение $\beta_T(h)$ и $\beta_T(h-1)$ (км⁻¹);
- Δh : расстояние между h и $h-1$ (км).

Шаг 5. Расчет общего затухания из-за рассеяния A_S на трассе Земля-космос по формуле:

$$A_S = 10 \log_{10}(e^{\tau'_T / \sin \theta}) \approx \frac{4,3429}{\sin \theta} \tau'_T \quad \text{дБ.} \quad (16)$$
