

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.676-12
(08/2019)

**Затухание в атмосферных газах
и связанное с ним воздействие**

Серия Р
Распространение радиоволн



Международный
союз
электросвязи

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/en>, 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/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	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, 2021 г.

© ITU 2021

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.676-12*

Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2016-2019)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приведены методы оценки затухания радиоволн в атмосферных газах на наземных и наклонных трассах с использованием:

- a) метода расчета путем суммирования отдельных линий поглощения для оценки затухания в атмосферных газах, который применяется для диапазона частот 1–1000 ГГц (изложен в Приложении 1);
- b) двух упрощенных методов приблизительной оценки затухания в атмосферных газах, которые применяются для диапазона частот 1–350 ГГц (изложены в Приложении 2); а также
- c) других видов воздействия, которые могут рассчитываться путем суммирования функций отдельных линий поглощения.

Ключевые слова

Поглощение в атмосферных газах, погонное затухание, затухание на наклонных трассах, полное затухание, водяной пар, кислород, сухой воздух, дисперсия, восходящее, нисходящее

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

что необходимо оценивать обусловленные атмосферными газами затухание, дисперсию, восходящий шум и нисходящий шум на наклонных трассах, а также затухание радиоволн на наземных трассах,

рекомендует,

1 чтобы для расчета затухания в атмосферных газах и связанного с ним воздействия в общем случае использовалась процедура, описанная в Приложении 1;

2 чтобы для приблизительной оценки затухания в атмосферных газах использовалась требующая меньшего объема вычислений процедура, приведенная в Приложении 2.

Руководство к настоящей Рекомендации

В настоящей Рекомендации представлены следующие три метода прогнозирования погонного затухания и затухания на трассе в атмосферных газах вследствие влияния кислорода и водяного пара:

- 1 расчет погонного затухания и затухания на трассе в атмосферных газах с использованием способа суммирования спектральных линий, приведенного в Приложении 1, исходя из значений атмосферного давления, температуры и плотности водяного пара в зависимости от высоты;
- 2 приблизительная оценка погонного затухания и затухания на трассе в атмосферных газах, описанная в Приложении 2, исходя из значений плотности водяного пара у поверхности Земли;
- 3 приблизительная оценка затухания на трассе, представленная в Приложении 2, исходя из значений суммарного содержания водяного пара вдоль трассы.

* В 2020 и 2021 годах 3-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла поправки редакционного характера в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

В этих методах прогнозирования могут использоваться местные метеорологические данные или, в отсутствие местных данных, значения эталонных атмосфер или метеорологические карты, соответствующие заданной вероятности превышения, которые представлены в других Рекомендациях МСЭ-R серии Р.

Помимо методов расчета погонного затухания и затухания в атмосферных газах на трассе, в настоящей Рекомендации приведены методы прогнозирования дисперсии, восходящей и нисходящей шумовой температуры, искривления траектории в атмосфере и избыточной задержки на трассе в атмосфере путем суммирования спектральных линий (см. Приложение 1).

Погонное затухание

Для прогнозирования погонного затухания может использоваться уравнение (1), применимое для частот до 1000 ГГц. Этот метод требует знания значений давления, температуры и плотности водяного пара в применимом местоположении. В отсутствие местных данных вместо стандартного значения плотности водяного пара на уровне Земли, равной $7,5 \text{ г/м}^3$, возможно использовать: а) значения среднегодовой глобальной стандартной атмосферы, описанной в Рекомендации МСЭ-R P.835, б) значения карты годовой приземной температуры, представленной в Рекомендации МСЭ-R P.1510, и с) значения карты вероятности превышения плотности водяного пара у поверхности Земли, представленной в Рекомендации МСЭ-R P.836.

Затухание на наклонных трассах (Земля-космос)

Могут быть использованы уравнения (13), (40) либо (41).

- Для применения уравнения (13) требуются данные профилей температуры, давления и плотности водяного пара вдоль трассы. В отсутствие местных данных профилей можно использовать стандартные атмосферные профили, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.835. Вместо стандартного значения плотности водяного пара на уровне Земли, равного $7,5 \text{ г/м}^3$, можно использовать значения карты вероятности превышения плотности водяного пара у поверхности Земли, представленной в Рекомендации МСЭ-R P.836.
- Для применения уравнения (40) требуются значения приземного давления, приземной температуры и плотности водяного пара у поверхности Земли. Уравнение (40) представляет собой аппроксимацию к уравнению (13) и применимо для частот до 350 ГГц, исходя из значений среднегодовой глобальной стандартной атмосферы и произвольной плотности водяного пара с отрицательным экспоненциальным профилем плотности водяного пара в зависимости от высоты. Уравнение (40) можно использовать для прогнозирования: а) мгновенного затухания в атмосферных газах для конкретного значения приземного давления, приземной температуры и плотности водяного пара у поверхности Земли; или б) затухания в атмосферных газах, соответствующего значениям плотности водяного пара у поверхности Земли при заданной вероятности превышения. В отсутствие местных данных о плотности водяного пара у поверхности Земли можно использовать данные карт плотности водяного пара у поверхности Земли, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.836.
- Для применения уравнения (41) требуются значения приземной температуры, приземного давления и суммарного содержания водяного пара вдоль трассы. Аналогично уравнению (40), уравнение (41) можно использовать для прогнозирования: а) мгновенного затухания в атмосферных газах для конкретного значения приземного давления, приземной температуры и суммарного содержания водяного пара; или б) затухания в атмосферных газах, соответствующего суммарному содержанию водяного пара при заданной вероятности превышения. В отсутствие местных данных о суммарном содержании водяного пара у поверхности Земли можно использовать данные карт суммарного содержания водяного пара, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836.

В случае наличия местных данных о плотности водяного пара у поверхности Земли и суммарном содержании водяного пара уравнение (41) с использованием местных данных о суммарном содержании водяного пара считается более точным, чем уравнение (40) с использованием местных данных о плотности водяного пара у поверхности Земли. Аналогично, в отсутствие местных данных уравнение (41) с использованием данных карт суммарного содержания водяного пара, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836, считается более точным, чем уравнение (40) с использованием данных карт плотности водяного пара у поверхности Земли, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836.

	Уравнение (13)	Уравнение (40)	Уравнение (41)
Диапазон частот	<1000 ГГц	<350 ГГц	<350 ГГц
Точность	Наивысшая, суммирование спектральных линий	Аппроксимация	
Давление в зависимости от высоты	Произвольные значения	Профиль среднегодовой глобальной стандартной атмосферы	
Температура в зависимости от высоты			
Плотность водяного пара в зависимости от высоты		Значение у поверхности Земли с отрицательным экспоненциальным профилем в зависимости от высоты	Суммарное содержание водяного пара вместо плотности водяного пара в зависимости от высоты

Приложение 1

Расчет затухания в атмосферных газах методом суммирования спектральных линий

1 Погонное затухание

Погонное затухание в сухом воздухе и за счет водяного пара для любых значений давления, температуры и влажности на частотах до 1000 ГГц может быть точно рассчитано методом суммирования отдельных спектральных линий кислорода и водяного пара с использованием дополнительных небольших по величине коэффициентов, учитывающих нерезонансный, или дебаевский, спектр поглощения кислородом на частотах ниже 10 ГГц, поглощение молекулами азота при определенном давлении на частотах выше 100 ГГц и добавочное поглощение в полосе непрерывного поглощения водяным паром, найденное экспериментальным путем. На рисунке 1 показано погонное затухание, рассчитанное с помощью метода прогнозирования для частот от 0 до 1000 ГГц с шагом 1 ГГц, при давлении 1013,25 гПа, температуре 15° С, плотности водяного пара 7,5 г/м³ (Стандартная атмосфера) и для сухой атмосферы (Сухой воздух).

Около частоты 60 ГГц при давлении на уровне моря множество линий поглощения кислорода сливаются, образуя одну широкую полосу поглощения, что в деталях показано на рисунке 2. На этом же рисунке показано затухание за счет кислорода в более высоких слоях атмосферы, где с увеличением высоты давление уменьшается и становятся различимы отдельные линии поглощения. Ряд дополнительных видов молекул (например, виды изотопов кислорода, колебательно возбужденные молекулы кислорода, озон, виды изотопов озона, колебательно возбужденные молекулы озона и прочие незначительные виды молекул) не учитываются при использовании метода прогнозирования путем суммирования спектральных линий. Эти дополнительные спектральные линии несущественны для обычной атмосферы, однако могут быть важны при сухой атмосфере.

Погонное затухание в атмосферных газах определяется следующим образом:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 f (N''_{\text{кислород}}(f) + N''_{\text{водяной пар}}(f)) \quad \text{дБ/км}, \quad (1)$$

где γ_o и γ_w – погонные затухания (дБ/км), обусловленные сухим воздухом (кислородом, азотом при определенном давлении и нерезонансным дебаевским затуханием) и водяным паром, соответственно, f – частота (ГГц), а $N''_{\text{кислород}}(f)$ и $N''_{\text{водяной пар}}(f)$ – мнимые части частотно-зависимых комплексных рефракций:

$$N''_{\text{кислород}}(f) = \sum_i (\text{кислород}) S_i F_i + N''_D(f) \quad (2a)$$

$$N''_{\text{водяной пар}}(f) = \sum_i (\text{водяной пар}) S_i F_i \quad (2b)$$

S_i – интенсивность i -й спектральной линии кислорода или водяного пара, F_i – коэффициент формы линии кислорода или водяного пара, а знаки суммы распространяются на все спектральные линии в таблицах 1 и 2;

$N_D''(f)$ – непрерывный спектр для сухого воздуха, обусловленный поглощением азота при определенном давлении и дебаевским спектром, как задано уравнением (8).

Интенсивность линии определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] && \text{для кислорода} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp[b_2(1 - \theta)] && \text{для водяного пара} \end{aligned} \quad (3)$$

где:

p : давление сухого воздуха (гПа);

e : парциальное давление водяного пара (гПа) (полное барометрическое давление, $p_{tot} = p + e$);

$\theta = 300/T$;

T : температура (К).

РИСУНОК 1
Погонное затухание в атмосферных газах, рассчитанное с шагом 1 ГГц, включая центры линий поглощения

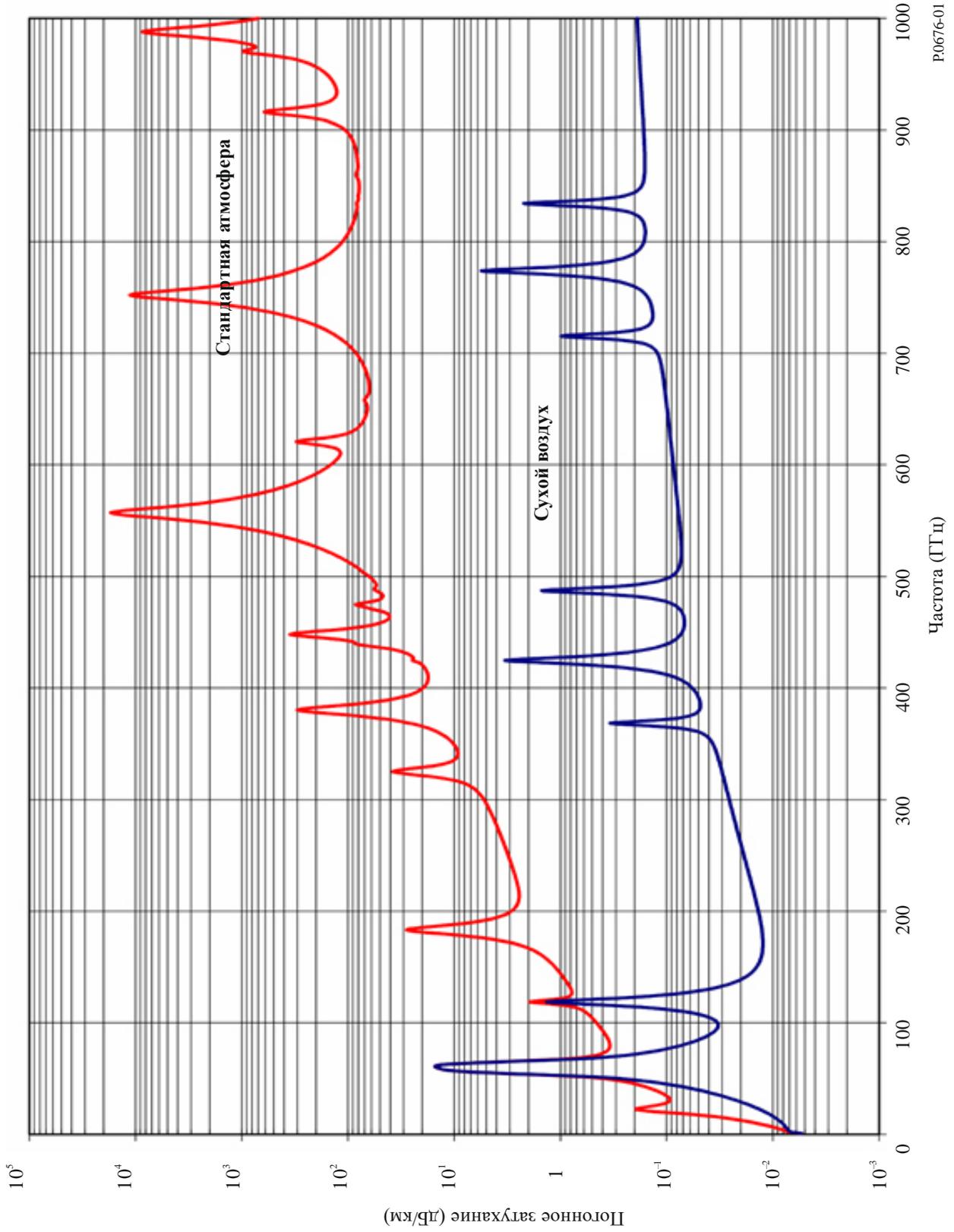
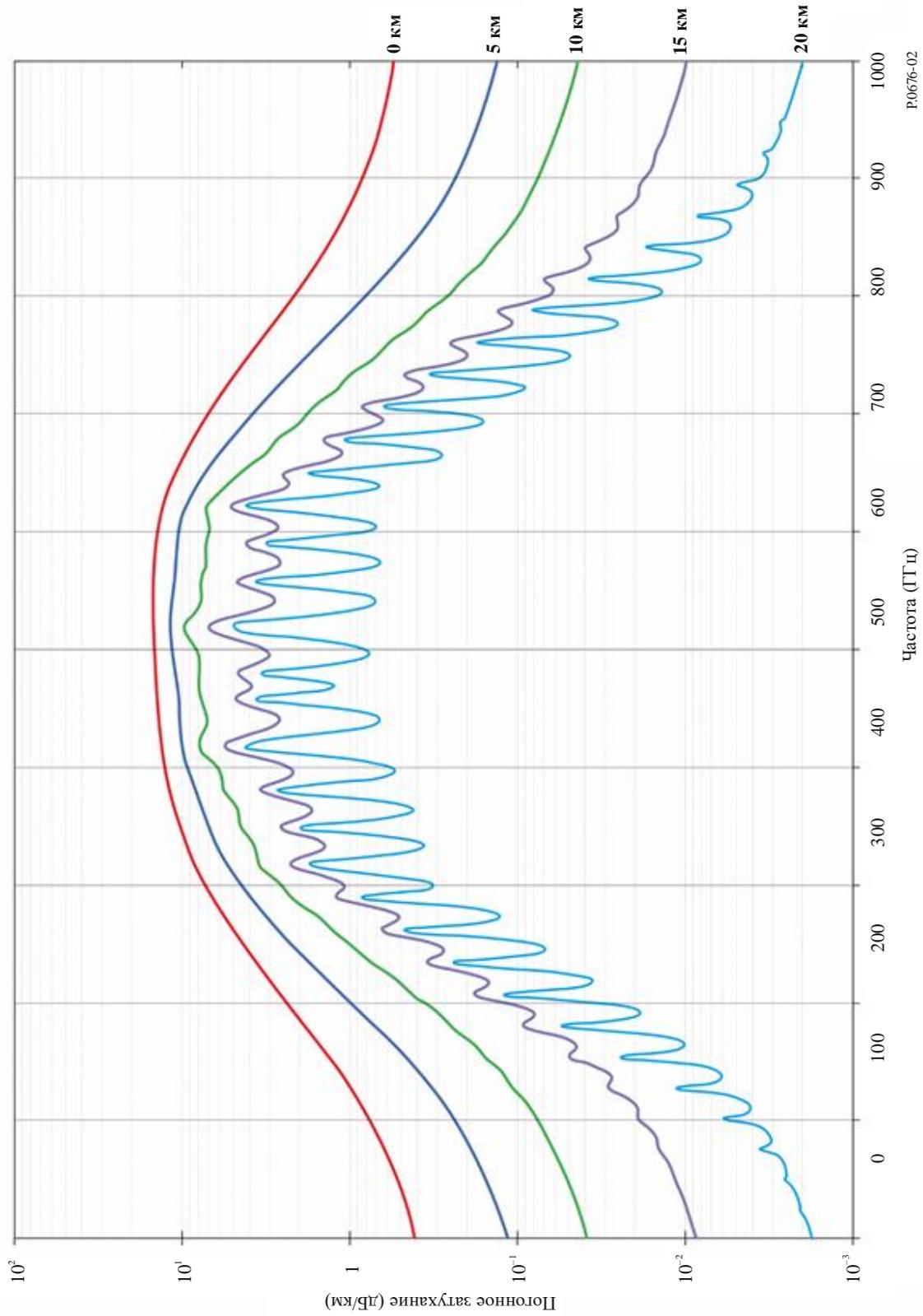


РИСУНОК 2

Погонное затухание в диапазоне 50–70 ГГц на указанных высотах, рассчитанное с шагом 10 МГц, включая центры линий поглощения (0 км, 5 км, 10 км, 15 км и 20 км)



P.0676-02

Частота (ГГц)

Погонное затухание (дБ/км)

Если имеются, следует использовать местные профили высоты p , e и T (например, измеренные с помощью радиозондирования). В отсутствие местных данных следует использовать значение соответствующей эталонной стандартной атмосферы, приведенное в Рекомендации МСЭ-R P.835. (Следует отметить, что, когда вычисляется полное затухание в атмосфере, для затухания, относимого к кислороду, и затухания, относимого к водяному пару, используется одно и то же парциальное давление водяного пара.)

Парциальное давление водяного пара e на любой высоте можно рассчитать исходя из значений плотности водяного пара ρ и температуры T на этой высоте, используя следующую формулу:

$$e = \frac{\rho T}{216,7}. \quad (4)$$

Спектроскопические данные для кислорода приведены в таблице 1, а спектроскопические данные для водяного пара – в таблице 2. Последняя запись в таблице 2 – это псевдолиния с центральной частотой 1780 ГГц, нижнее крыло которой представляет собой совместный вклад на частоте ниже 1000 ГГц резонансных частот водяного пара (т. е. непрерывный спектр водяного пара), не учитываемых при использовании метода прогнозирования путем суммирования спектральных линий. Параметры псевдолиний корректируются в целях учета различия между измеряемым поглощением в атмосферных "окнах" прозрачности и рассчитанным поглощением на местных линиях.

Коэффициент формы спектральных линий определяется по формуле:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right], \quad (5)$$

где f_i – частота линии кислорода или водяного пара, а Δf – ширина линии:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1 e \theta) && \text{для кислорода} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_5}) && \text{для водяного пара} \end{aligned} \quad (6a)$$

Ширина спектральной линии Δf изменяется для учета зеемановского расщепления линий кислорода и доплеровского расширения линий водяного пара:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} && \text{для кислорода} \\ &= 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{для водяного пара} \end{aligned} \quad (6b)$$

δ – поправочный коэффициент, обусловленный интерференцией спектральных линий кислорода:

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} && \text{для кислорода} \\ &= 0 && \text{для водяного пара} \end{aligned} \quad (7)$$

ТАБЛИЦА 1

Спектроскопические данные для затухания за счет кислорода

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50,474214	0,975	9,651	6,690	0,0	2,566	6,850
50,987745	2,529	8,653	7,170	0,0	2,246	6,800
51,503360	6,193	7,709	7,640	0,0	1,947	6,729
52,021429	14,320	6,819	8,110	0,0	1,667	6,640
52,542418	31,240	5,983	8,580	0,0	1,388	6,526
53,066934	64,290	5,201	9,060	0,0	1,349	6,206
53,595775	124,600	4,474	9,550	0,0	2,227	5,085
54,130025	227,300	3,800	9,960	0,0	3,170	3,750
54,671180	389,700	3,182	10,370	0,0	3,558	2,654
55,221384	627,100	2,618	10,890	0,0	2,560	2,952
55,783815	945,300	2,109	11,340	0,0	-1,172	6,135
56,264774	543,400	0,014	17,030	0,0	3,525	-0,978
56,363399	1 331,800	1,654	11,890	0,0	-2,378	6,547
56,968211	1 746,600	1,255	12,230	0,0	-3,545	6,451
57,612486	2 120,100	0,910	12,620	0,0	-5,416	6,056
58,323877	2 363,700	0,621	12,950	0,0	-1,932	0,436
58,446588	1 442,100	0,083	14,910	0,0	6,768	-1,273
59,164204	2 379,900	0,387	13,530	0,0	-6,561	2,309
59,590983	2 090,700	0,207	14,080	0,0	6,957	-0,776
60,306056	2 103,400	0,207	14,150	0,0	-6,395	0,699
60,434778	2 438,000	0,386	13,390	0,0	6,342	-2,825
61,150562	2 479,500	0,621	12,920	0,0	1,014	-0,584
61,800158	2 275,900	0,910	12,630	0,0	5,014	-6,619
62,411220	1 915,400	1,255	12,170	0,0	3,029	-6,759
62,486253	1 503,000	0,083	15,130	0,0	-4,499	0,844
62,997984	1 490,200	1,654	11,740	0,0	1,856	-6,675
63,568526	1 078,000	2,108	11,340	0,0	0,658	-6,139
64,127775	728,700	2,617	10,880	0,0	-3,036	-2,895
64,678910	461,300	3,181	10,380	0,0	-3,968	-2,590
65,224078	274,000	3,800	9,960	0,0	-3,528	-3,680
65,764779	153,000	4,473	9,550	0,0	-2,548	-5,002
66,302096	80,400	5,200	9,060	0,0	-1,660	-6,091
66,836834	39,800	5,982	8,580	0,0	-1,680	-6,393
67,369601	18,560	6,818	8,110	0,0	-1,956	-6,475
67,900868	8,172	7,708	7,640	0,0	-2,216	-6,545
68,431006	3,397	8,652	7,170	0,0	-2,492	-6,600
68,960312	1,334	9,650	6,690	0,0	-2,773	-6,650
118,750334	940,300	0,010	16,640	0,0	-0,439	0,079
368,498246	67,400	0,048	16,400	0,0	0,000	0,000
424,763020	637,700	0,044	16,400	0,0	0,000	0,000
487,249273	237,400	0,049	16,000	0,0	0,000	0,000
715,392902	98,100	0,145	16,000	0,0	0,000	0,000
773,839490	572,300	0,141	16,200	0,0	0,000	0,000
834,145546	183,100	0,145	14,700	0,0	0,000	0,000

ТАБЛИЦА 2

Спектроскопические данные для затухания за счет водяного пара

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22,235080	0,1079	2,144	26,38	0,76	5,087	1,00
67,803960	0,0011	8,732	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0007	8,353	29,48	0,70	4,780	0,79
183,310087	2,273	0,668	29,06	0,77	5,022	0,85
321,225630	0,0470	6,179	24,04	0,67	4,398	0,54
325,152919	1,514	1,541	28,23	0,64	4,893	0,74
336,227764	0,0010	9,825	26,93	0,69	4,740	0,61
380,197353	11,67	1,048	28,11	0,54	5,063	0,89
390,134508	0,0045	7,347	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0632	5,048	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150807	0,9098	3,595	20,07	0,63	4,483	0,52
443,018343	0,1920	5,048	15,55	0,60	5,083	0,50
448,001085	10,41	1,405	25,64	0,66	5,028	0,67
470,888999	0,3254	4,597	21,34	0,66	4,506	0,65
474,687092	1,260	2,379	23,20	0,65	4,804	0,64
488,490108	0,2529	2,852	25,86	0,69	5,201	0,72
503,568532	0,0372	6,731	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0124	6,731	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	0,9785	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	1840	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
556,935985	497,0	0,159	30,86	0,69	4,552	1,00
620,700807	5,015	2,391	24,38	0,71	5,856	0,68
645,766085	0,0067	8,633	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,2732	7,816	32,10	0,69	4,140	1,00
752,033113	243,4	0,396	30,86	0,68	4,352	0,84
841,051732	0,0134	8,177	15,90	0,33	5,760	0,45
859,965698	0,1325	8,055	30,60	0,68	4,090	0,84
899,303175	0,0547	7,914	29,85	0,68	4,530	0,90
902,611085	0,0386	8,429	28,65	0,70	5,100	0,95
906,205957	0,1836	5,110	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,400	1,441	26,73	0,70	5,150	0,78
923,112692	0,0079	10,293	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	9,009	1,919	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	134,6	0,257	29,85	0,68	4,550	0,90
1 780,000000	17506	0,952	196,3	2,00	24,15	5,00

Полоса непрерывного поглощения в сухом воздухе является следствием существования нерезонансного, или дебаевского, спектра кислорода на частотах ниже 10 ГГц и, при определенном давлении, затухания за счет азота на частотах выше 100 ГГц.

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right], \quad (8)$$

где d – ширина дебаевского спектра:

$$d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8}. \quad (9)$$

2 Затухание на трассе

2.1 Наземные трассы

Для наземной трассы или для слегка наклонных трасс, проходящих вблизи Земли, затухание на трассе A может быть рассчитано как:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{дБ}, \quad (10)$$

где r_0 – длина трассы (км).

2.2 Наклонные трассы

В пунктах 2.2.1 и 2.2.2 приведены методы расчета ослабления в атмосферных газах на наклонных трассах Земля-космос, пролегающих из точки на поверхности Земли или вблизи от нее в точку над поверхностью Земли или в космосе, с использованием метода суммирования спектральных линий, описанного в Приложении 1, при известных температуре, давлении сухого воздуха и профиле плотности водяного пара. В пункте 2.2.3 этот метод распространяется на нисходящую трассу, пролегающую из точки над поверхностью Земли или в космосе в точку на поверхности Земли или вблизи от нее. В пунктах 2.2.4 и 2.2.5 представлены методы расчета искривления траектории в атмосфере и увеличения длины трассы в атмосфере для трассы Земля-космос.

2.2.1 Неотрицательные значения видимого угла места

Затухание в атмосферных газах на восходящей наклонной трассе между высотами h_1 и h_2 ($h_2 > h_1 \geq 0$ км) равняется:

$$A_{gas} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sin \varphi(h)} dh = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi(h)}} dh, \quad (11)$$

где:

$$\cos \varphi(h) = \frac{(R_E + h_1) n(h_1)}{(R_E + h) n(h)} \cos \varphi_1, \quad (12)$$

$\gamma(h)$ — погонное затухание на высоте h , R_E – средний радиус Земли (6371 км), φ_1 – местный видимый угол места на высоте h_1 , а $n(h)$ – индекс рефракции на высоте h .

При том что уравнение (11) можно решить численным интегрированием¹, ослабление в атмосферных газах на наклонной трассе хорошо аппроксимируется путем разделения атмосферы на слои с экспоненциально возрастающей толщиной, определения погонного затухания (дБ/км) в каждом слое и

¹ В зависимости от реализации уравнение (11) можно решить с помощью различных методов, таких как: а) функция `integral` системы Matlab, б) функция `quad` системы Octave, в) функция `quad` языка Python, д) несколько функций из книг серии "Numerical Recipes" и др.

длины участка трассы (км), пролегающего через каждый слой, с последующим суммированием произведений погонного ослабления в каждом слое на длину соответствующего участка трассы, как показано в уравнении (13). В отсутствие местных профилей температуры, давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара в зависимости от высоты (например, полученных по данным радиозондирования) допускается использовать любую из шести эталонных стандартных атмосфер (среднегодовая глобальная стандартная атмосфера, годовая эталонная атмосфера на низких широтах, эталонная атмосфера на средних широтах летом, эталонная атмосфера на средних широтах зимой, эталонная атмосфера на высоких широтах летом или эталонная атмосфера на высоких широтах зимой) из рекомендации МСЭ-R P.835.

$$A_{gas} = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i \gamma_i \quad (\text{дБ}), \quad (13)$$

где γ_i – погонное затухание (дБ/км) i -го слоя согласно уравнению (1), а a_i – длина участка трассы (км), пролегающего через i -й слой.

Для наклонной трассы между поверхностью Земли и космосом при геометрической конфигурации, изображенной на рисунке 5, толщина слоев возрастает экспоненциально с 10 см у поверхности Земли приблизительно до 1 км на высоте около 100 км, чтобы обеспечить точную оценку полного затухания в атмосферных газах на такой трассе. Толщина i -го слоя δ_i равна:

$$\delta_i = 0,0001 e^{\frac{i-1}{100}} \quad (\text{км}). \quad (14)$$

$h_1 = 0$, тогда h_i , при высоте нижней границы слоя i для $i \geq 2$, равняется:

$$h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j = 0,0001 \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - 1}{e^{\frac{1}{100}} - 1}. \quad (15)$$

Если используется одна из шести эталонных стандартных атмосфер, описанных в Рекомендации МСЭ-R P.835, атмосферный профиль определяется для геометрических высот до 100 км, и в этом случае $i_{max} = 922$, $\delta_{922} = 0,999\ 66$ км и $h_{922} = 99,457$ км.

Для наклонной трассы, пролегающей из нижней точки в атмосфере на высоте h_{lower} , в верхнюю точку в атмосфере на высоте h_{upper} ($0 \text{ км} \leq h_{lower} < h_{upper} \leq 100 \text{ км}$), затухание на наклонной трассе можно рассчитать, приняв r_1 равным длине радиус-вектора от центра Земли к нижней точке и видоизменив уравнения (14) и (15) так, чтобы в них приблизительно сохранялся экспоненциальный рост высоты от поверхности Земли:

a) Вычислить i_{lower} и i_{upper} :

$$i_{lower} = \text{floor} \left\{ 100 \ln \left[10^4 h_{lower} \left(e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\} \quad (16a)$$

$$i_{upper} = \text{ceiling} \left\{ 100 \ln \left[10^4 h_{upper} \left(e^{\frac{1}{100}} - 1 \right) + 1 \right] + 1 \right\}, \quad (16b)$$

где функция $\text{floor}(x)$ округляет x вниз до ближайшего целого, а функция $\text{ceiling}(x)$ округляет x вверх до ближайшего целого.

b) Заменить в уравнении (13) нижний предел на $i = i_{lower}$, а верхний предел – на $i_{upper} - 1$.

c) Заменить в уравнении (14) значение 0,0001 на m , где:

$$m = \left(\frac{e^{\frac{2}{100}} - e^{\frac{1}{100}}}{e^{\frac{i_{upper}}{100}} - e^{\frac{i_{lower}}{100}}} \right) (h_{upper} - h_{lower}). \quad (16c)$$

d) Заменить уравнение (15) следующим:

$$h_i = h_{lower} + \sum_{j=i_{lower}}^{i-1} \delta_j = h_{lower} + m \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - e^{\frac{i_{lower}-1}{100}}}{e^{\frac{1}{100}} - 1}, \quad i_{lower} \leq i \leq i_{upper}. \quad (16d)$$

Уравнениями (16a)–(16d) следует пользоваться с возможной осмотрительностью ввиду снижения точности на наклонных трассах, где $i_{upper} - i_{lower} < 50$ (например, на трассах между двумя воздушными платформами).

a_i есть длина участка трассы, пролегающего через i -й слой толщиной δ_i , а n_i – индекс рефракции радиоволн в i -м слое. n_i есть функция давления сухого воздуха, температуры и парциального давления водяного пара в i -м слое в соответствии с уравнениями (1) и (2) Рекомендации МСЭ-R P.453. α_i и β_{i+1} – углы вхождения и выхода луча на границе i -го и $(i+1)$ -го слоев, r_i – длина радиус-вектора из центра Земли к нижней границе i -го слоя, $r_{i+1} = r_i + \delta_i$, а r_1 – длина радиус-вектора из центра Земли к нижней границе нижнего слоя, т. е. обычно это средний радиус Земли (6371 км). Индекс рефракции n_i и погонное затухание γ_i в i -м слое берутся как значения в середине i -го слоя, т. е. на высоте $r_i + \delta_i/2$.

Длина участка трассы a_i равняется:

$$a_i = -r_i \cos \beta_i + \sqrt{r_i^2 \cos^2 \beta_i + 2 r_i \delta_i + \delta_i^2} \quad (\text{км}), \quad (17)$$

а угол α_i –

$$\alpha_i = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{-a_i^2 - 2 r_i \delta_i - \delta_i^2}{2 a_i (r_i + \delta_i)} \right) \quad (18a)$$

$$= \sin^{-1} \left(\frac{r_i}{r_i + \delta_i} \sin \beta_i \right). \quad (18b)$$

Уравнение (18a) не рекомендовано к дальнейшему использованию ввиду сниженной точности. β_1 – местный зенитный угол непосредственно у поверхности Земли или вблизи от нее (угол, дополнительный к видимому углу места φ , так что $\beta_1 = 90^\circ - \varphi$).

β_{i+1} можно вычислить рекурсивно по α_i , воспользовавшись законом Снеллиуса:

$$\beta_{i+1} = \sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \sin \alpha_i \right). \quad (19a)$$

Иначе, β_i можно вычислить непосредственно, не прибегая к вычислению α_i , воспользовавшись законом Снеллиуса в полярных координатах:

$$\beta_i = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_i} \sin \beta_1 \right), \quad (19b)$$

а α_i вычислить аналогично:

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \sin \beta_1 \right). \quad (19c)$$

В направлении Земля-космос уравнения (19a) или (19b) и (19c) могут быть несправедливы при начальных значениях видимого угла места, меньших 1° (т. е. начальное значение видимого угла зенита $\beta_1 > 89^\circ$), когда градиент индекса рефракции dN/dh составляет менее -157 N-единиц/км, что может иметь место при использовании в атмосферном профиле данных радиозондирования из некоторых регионов мира, где наблюдается волноводное распространение. В этих случаях радиоволна отражается от атмосферы и следует кривизне Земли (т. е. имеет место волноводное распространение), и значение аргумента арксинуса в уравнениях (19a) или (19b) и (19c) превышает 1. Уравнения (19a), (19b) и (19c) справедливы для всех неотрицательных значений видимого угла места при использовании в качестве входных данных любой из шести эталонных стандартных атмосфер, описанных в Рекомендации МСЭ-R P.835, поскольку эти эталонные атмосферы не характеризуются градиентами индекса рефракции, типичными для волноводного распространения.

На рисунке 4 дан график зенитного затухания, рассчитанного с интервалом в 1 ГГц, для среднегодовой глобальной стандартной эталонной атмосферы из Рекомендации МСЭ-R P.835. "Стандартная" атмосфера здесь – это среднегодовая глобальная эталонная атмосфера с $\rho_o = 7,5$ г/м³, а "сухая" атмосфера – среднегодовая глобальная эталонная атмосфера с $\rho_o = 0$ г/м³.

2.2.2 Отрицательные значения видимого угла места

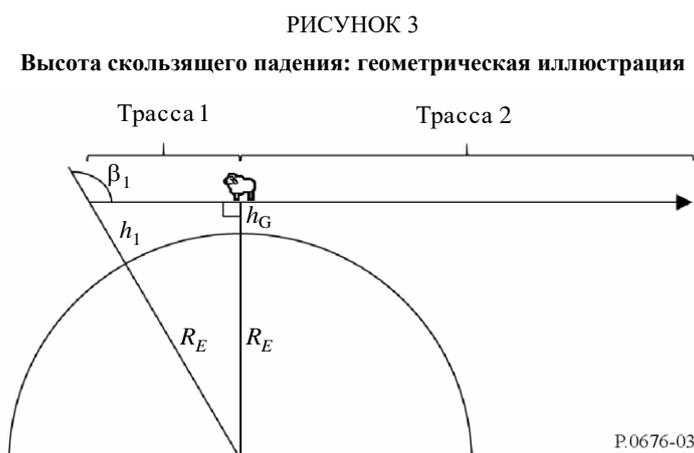
В уравнении (13) предполагается, что высота на трассе между земной станцией и космосом возрастает. Но при отрицательных значениях видимого угла места, наблюдаемого с земной станции на высотной платформе, высота вдоль трассы распространения уменьшается от высоты расположения станции до минимальной высоты скользящего падения и затем увеличивается от этой высоты до конечной точки трассы в космосе. Это показано на рисунке 3 для земной станции на высоте h_1 при видимом угле места $90^\circ - \beta_1$.

Из закона Снеллиуса в полярных координатах имеем:

$$n(h_G)(R_E + h_G) = n(h_1)(R_E + h_1) \sin \beta_1, \quad (20)$$

и тогда высоту скользящего падения h_G можно определить, решив итеративно уравнение (20). Индекс рефракции $n(h)$ можно определить из уравнений (1) и (2) Рекомендации МСЭ-R P.453 для конкретного представляющего интерес атмосферного профиля – обычно одного из стандартных профилей, представленных в Рекомендации МСЭ-R P.835.

Суммарное затухание в атмосферных газах есть сумма значений затухания в атмосферных газах для трасс 1 и 2. Трасса 1 представляет затухание в атмосферных газах между виртуальной земной станцией на высоте h_G км и реальной земной станцией на высоте h_1 км при видимом угле места 0° , а трасса 2 – затухание в атмосферных газах между виртуальной земной станцией на высоте h_G км и максимальной высотой в атмосфере (обычно 100 км) при видимом угле места 0° .



2.2.3 Взаимность распространения на трассах космос-Земля и Земля-космос

Для трассы между космической и земной станциями, где видимый угол места φ_s , наблюдаемый с космической станции, имеет отрицательное значение, а φ_e – видимый угол места, наблюдаемый с земной станции, эти углы связаны между собой соотношениями:

$$\varphi_s = -\cos^{-1}\left(\frac{r_e n_e}{r_s n_s} \cos \varphi_e\right) \quad (21a)$$

и

$$\varphi_e = \cos^{-1}\left(\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s\right), \quad (21b)$$

где n_e – индекс рефракции на высоте земной станции, r_e – длина радиус-вектора от центра Земли к месту нахождения земной станции ($r_e \geq R_E$), n_s – индекс рефракции на высоте космической станции, а r_s – длина радиус-вектора от центра Земли к месту нахождения космической станции ($r_s > r_e$). Если высота космической станции превышает 100 км от поверхности Земли, то $n_s = 1$.

Распространение в атмосфере имеет взаимный характер, поэтому затухание в атмосферных газах на трассе космос-Земля при видимом угле места φ_s , наблюдаемом с космической станции, идентично затуханию в атмосферных газах на обратной трассе Земля-космос при видимом угле места φ_e ,

наблюдаемом с земной станции. В результате затухание в атмосферных газах на нисходящей трассе космос-Земля можно рассчитать как затухание в атмосферных газах на соответствующей восходящей трассе Земля-космос. Если $\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s > 1$, то трасса космос-Земля не касается Земли.

2.2.4 Искривление в атмосфере

Полное искривление в атмосфере *Bending* вдоль трассы Земля-космос равняется:

$$Bending = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} (\beta_{i+1} - \alpha_i) \quad (22a)$$

$$= \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_1 r_1}{n_{i+1} r_{i+1}} \sin \beta_1 \right) - \sin^{-1} \left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_i} \sin \beta_1 \right) \right], \quad (22b)$$

где положительное значение указывает на искривление луча в направлении Земли. Уравнение (9) в Рекомендации МСЭ-R P.834 является аппроксимацией уравнений (22a) и (22b) для среднегодовой глобальной стандартной эталонной атмосферы.

2.2.5 Увеличение длины трассы в атмосфере

Индекс рефракции в тропосфере больше 1, поэтому эффективная длина трассы в атмосфере превышает геометрическую, и в этом случае увеличение длины трассы в атмосфере ΔL составляет:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i (n_i - 1) \quad (\text{км}). \quad (23)$$

Термин "увеличение длины трассы в атмосфере" синонимичен термину "увеличение длины радиотрассы" из Рекомендации МСЭ-R P.834, в пункте 6 которой приведен метод прогнозирования увеличения длины трассы в атмосфере как функции места, дня в году и видимого угла места.

РИСУНОК 4

Зенитное затухание в атмосферных газах, включая центры линий поглощения, рассчитанное с интервалом 1 ГГц

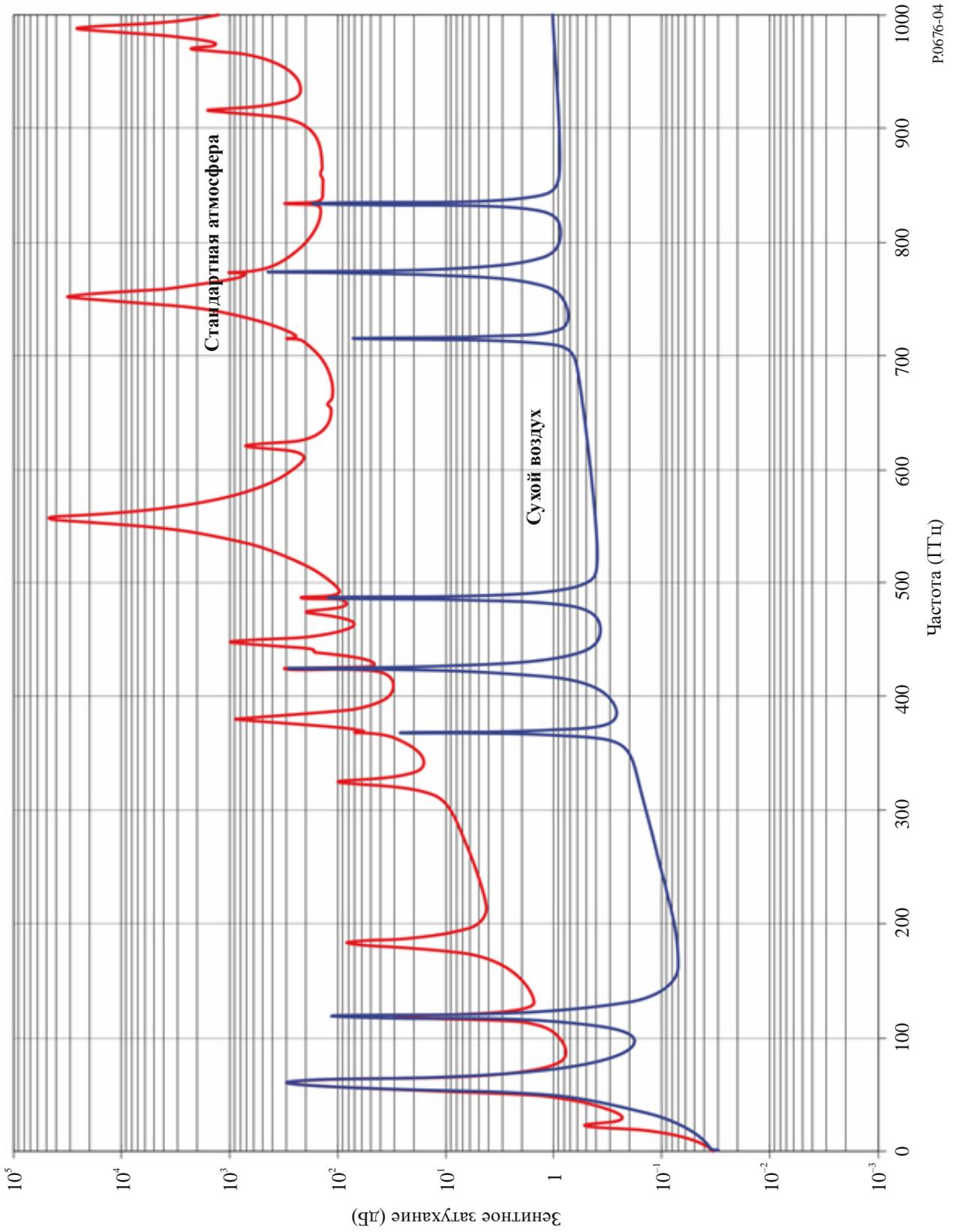
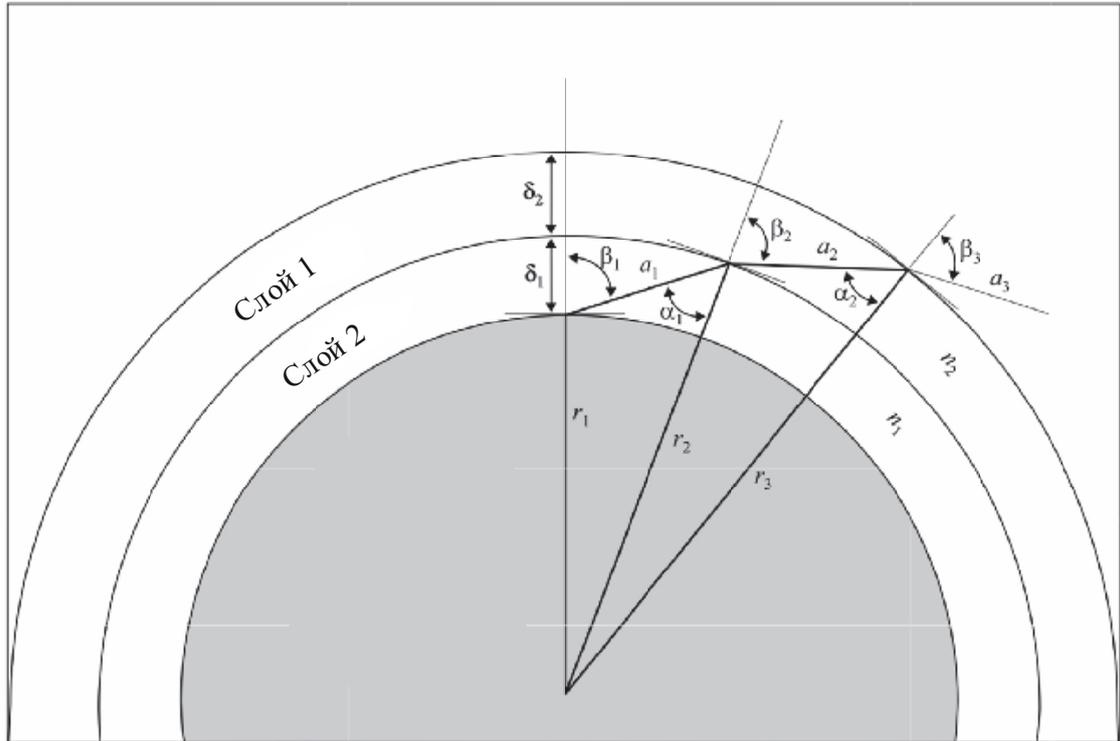


РИСУНОК 5

Трасса, проходящая через атмосферу



P.0676-05

3 Дисперсионные эффекты

Помимо затухания, описанного в предыдущем пункте, которое выводится на основе мнимой части частотно-зависимой комплексной рефракции, кислород и водяной пар также приводят к дисперсии, которая определяется на основе вещественной части частотно-зависимой комплексной рефракции. Данный эффект определяется как зависимость дисперсии фазы от частоты (градусы/км) или зависимость групповой задержки от частоты (пс/км), и, аналогично затуханию, возможно рассчитать дисперсию для наклонных трасс.

Аналогично уравнению (1), погонная фазовая дисперсия в атмосферных газах φ определяется формулой:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_w = -1,2008f(N'_{\text{кислород}}(f) + N'_{\text{водяной пар}}(f)) \quad (\text{градусы/км}), \quad (24)$$

где φ_0 – погонная фазовая дисперсия (градусы/км) в сухом воздухе, φ_w – погонная фазовая дисперсия в водяном паре, f – частота (ГГц), а $N'_{\text{кислород}}(f)$ и $N'_{\text{водяной пар}}(f)$ – вещественные части частотно-зависимых комплексных индексов преломления:

$$N'_{\text{кислород}}(f) = \sum_i (\text{кислород}) S_i F'_i + N'_D(f), \quad (25a)$$

$$N'_{\text{водяной пар}}(f) = \sum_i (\text{водяной пар}) S_i F'_i, \quad (25b)$$

где:

S_i – интенсивность i -й спектральной линии кислорода или водяного пара из уравнения (3), F'_i – вещественная часть коэффициента формы спектральной линии кислорода или водяного пара, которая определяется формулой:

$$F'_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{(f_i - f) + \delta \Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} - \frac{(f_i + f) + \delta \Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right], \quad (25c)$$

а суммирование проводится по всем спектральным линиям в таблицах 1 и 2.

$N_D'(f)$ – вещественная часть непрерывного спектра для сухого воздуха, обусловленного поглощением азота при определенном давлении:

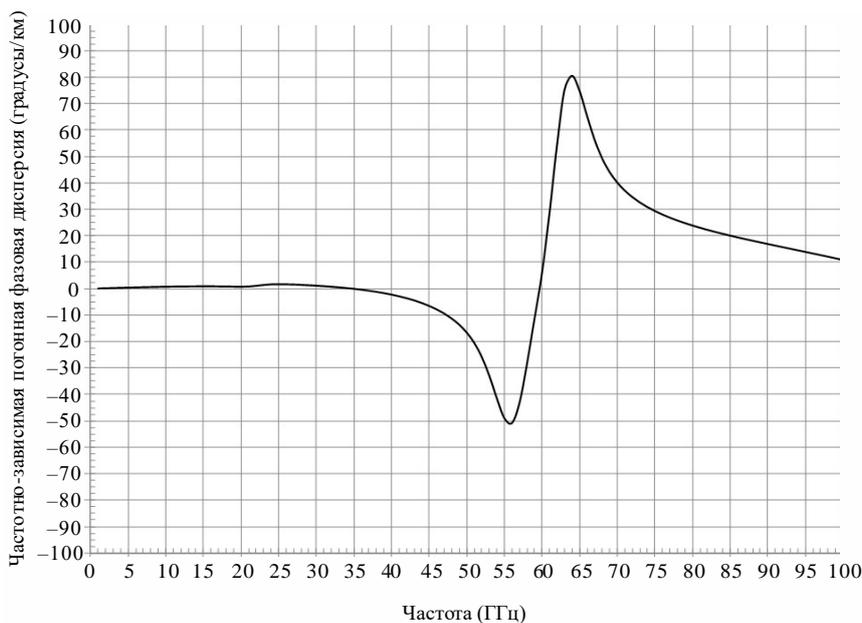
$$N_D'(f) = \frac{-6,14 \times 10^{-5} p \theta^2 f^2}{f^2 + d^2}. \quad (25d)$$

Δf определено в уравнении (6b), $\Delta f \delta$ – в уравнении (7), а d – в уравнении (9).

График частотно-зависимой погонной фазовой дисперсии показан на рисунке 6 для стандартной атмосферы ($p = 1013,25$ гПа, $\rho = 7,5$ г/м³, $T = 15^\circ\text{C}$).

РИСУНОК 6

График частотно-зависимой погонной фазовой дисперсии для стандартной атмосферы
($p = 1013,25$ гПа, $\rho = 7,5$ г/м³, $T = 15^\circ\text{C}$)



P.0676-06

4 Яркостная температура нисходящего и восходящего микроволнового излучения

Яркостная температура микроволнового излучения определяется как шумовая температура на выходе антенны без потерь вследствие падающей атмосферной яркости. Спектральная плотность мощности шума $S(f)$ и шумовая температура $T(f)$ связаны соотношением $S(f) = k T(f)$, где k – постоянная Больцмана. Яркостную температуру нисходящего микроволнового излучения на трассе космос-Земля при наблюдении сверху вниз и яркостную температуру восходящего микроволнового излучения на трассе Земля-космос при наблюдении снизу вверх можно рассчитать по принципу, аналогичному тому, который используется в уравнении (13). Слой 1 обычно находится на поверхности Земли, а слой k является верхним слоем атмосферы (обычно его высота принимается равной 100 км). Суммарная яркостная температура микроволнового излучения есть сумма значений яркостной температуры микроволнового излучения каждого слоя атмосферы, умноженных на потери в промежутке между соответствующим слоем и точкой наблюдения. Предполагается, что атмосфера находится в состоянии локального термодинамического равновесия, а рассеянием можно пренебречь.

В следующих пунктах $T_B(f_{GHz}, T_j)$ – яркостная температура микроволнового излучения j -го слоя, задаваемая формулой:

$$T_B(f_{GHz}, T_j) = 0,048 f_{GHz} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad (\text{К}), \quad (26)$$

где T_j – физическая температура j -го слоя. $T_B(f_{GHz}, T_j)$ хорошо аппроксимируется значением T_j при $f_{GHz} < 0,42 T_j$; γ_j – погонное затухание (дБ/км) j -го уровня, определенное в уравнении (1), a_j – длина трассы (км) через j -ый слой, определенная в уравнении (17).

График разности физической температуры T и яркостной температуры микроволнового излучения абсолютно черного тела T_B показан на рисунке 7. Если задаться конкретным значением частоты f_{GHz} , $T - T_B \rightarrow 0,024 f_{GHz}$ с ростом физической температуры T .

4.1 Яркостная температура нисходящего микроволнового излучения

Если профили физической температуры, давления и парциального давления водяного пара вдоль трассы известны, то яркостную температуру нисходящего микроволнового излучения, которая складывается из а) яркостной температуры космического микроволнового излучения, ослабленного в атмосферных газах, и б) яркостной температуры нисходящего атмосферного излучения, можно вычислить по следующей формуле:

$$T_{downwelling} = T_B(f_{GHz}, 2,73) 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)}, \\ + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^j a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{К}). \quad (27)$$

Однако чистую яркостную температуру микроволнового излучения удобнее может быть реализовать как рекурсию, используя следующий рекурсивный метод:

$$\text{шаг 1: установить } T_{B,Downwelling} = 0,048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{2,73}\right) - 1} \right]. \quad (27a)$$

Повторить шаги 2–5 для значений от $j = k$ до $j = 1$, уменьшая j на 1 при каждой итерации:

$$\text{шаг 2: установить } T_{B,Downwelling,last} = T_{B,Downwelling}, \quad (27b)$$

$$\text{шаг 3: установить } T_B = 0,048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right], \quad (27c)$$

$$\text{шаг 4: установить } L_j = 10^{\frac{-a_j \gamma_j}{10}}, \quad (27d)$$

$$\text{шаг 5: установить } T_{B,Downwelling} = [T_{B,Downwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B], \quad (27e)$$

где 2,73 К – это температура абсолютно черного тела, спектру которого соответствует спектр космического микроволнового фонового излучения.

График яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения для зенитной трассы и стандартной атмосферы приведен на рисунке 8.

Если профили неизвестны, для оценки яркостной температуры нисходящего микроволнового излучения с учетом прочих видов воздействия полного затухания в атмосферных газах можно применять метод, изложенный в пункте 3 Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R P.618.

Для определения системной шумовой температуры земной станции по значениям яркостной температуры можно использовать Рекомендацию МСЭ-R P.372.

4.2 Яркость температура восходящего микроволнового излучения

Суммарная яркостная температура восходящего микроволнового излучения, которая складывается из а) яркостной температуры восходящего микроволнового излучения, б) яркостной температуры нисходящего атмосферного микроволнового излучения, отраженного от поверхности Земли, с учетом суммарного затухания в атмосферных газах и с) яркостной температуры восходящего микроволнового излучения поверхности Земли с учетом затухания в атмосферных газах, может быть найдена по следующей формуле:

$$T_{B,upwelling} = (\epsilon T_B(f_{GHz}, T_{Earth}) + \rho T_{downwelling}) \times 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)},$$

$$+ \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=j}^k a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (\text{К}). \quad (28)$$

Однако чистую яркостную температуру микроволнового излучения удобнее может быть реализовать как рекурсию, используя следующий рекурсивный метод:

$$\text{шаг 1: установить } T_{B,Upwelling} = \epsilon 0,048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_{Earth}}\right)} - 1 \right] + \rho T_{B,downwelling}. \quad (28a)$$

Повторить шаги 2–5 для значений от $j = 1$ до $j = k$, увеличивая j на 1 при каждой итерации:

$$\text{шаг 2: установить } T_{B,Upwelling,last} = T_{B,Upwelling}, \quad (28b)$$

$$\text{шаг 3: установить } T_B = 0,048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0,048 f_{GHz}}{T_j}\right)} - 1 \right], \quad (28c)$$

$$\text{шаг 4: установить } L_j = 10^{-\frac{a_j \gamma_j}{10}}, \quad (28d)$$

$$\text{шаг 5: установить } T_{B,Upwelling} = [T_{B,Upwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B], \quad (28e)$$

где:

ϵ : коэффициент излучения поверхности Земли;

ρ : коэффициент отражения поверхности Земли;

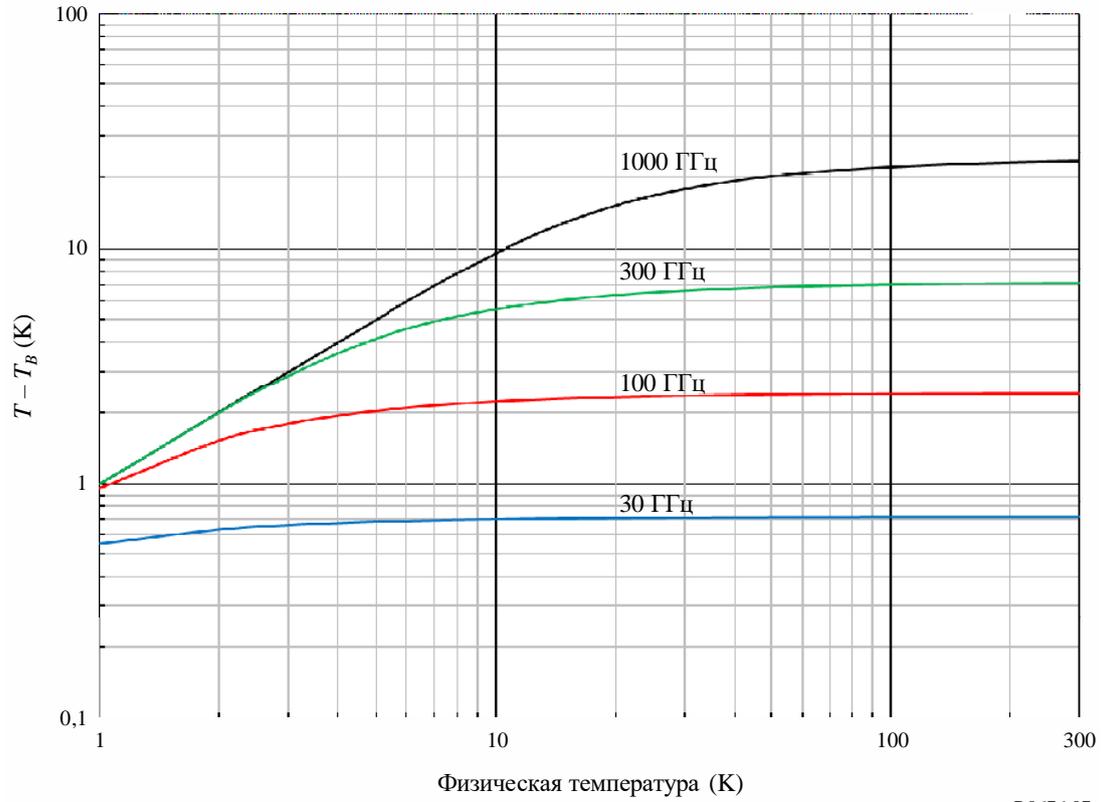
$\rho = 1 - \epsilon$.

В отсутствие местных данных или других руководящих указаний можно использовать значение $\epsilon = 0,95$.

График яркостной температуры восходящего микроволнового излучения для зенитной трассы и стандартной атмосферы (т. е. среднегодовой глобальной стандартной эталонной атмосферы) приведен на рисунке 9, где $\epsilon = 0,95$, $\rho = 0,05$, а $T_{Earth} = 290$ К.

РИСУНОК 7

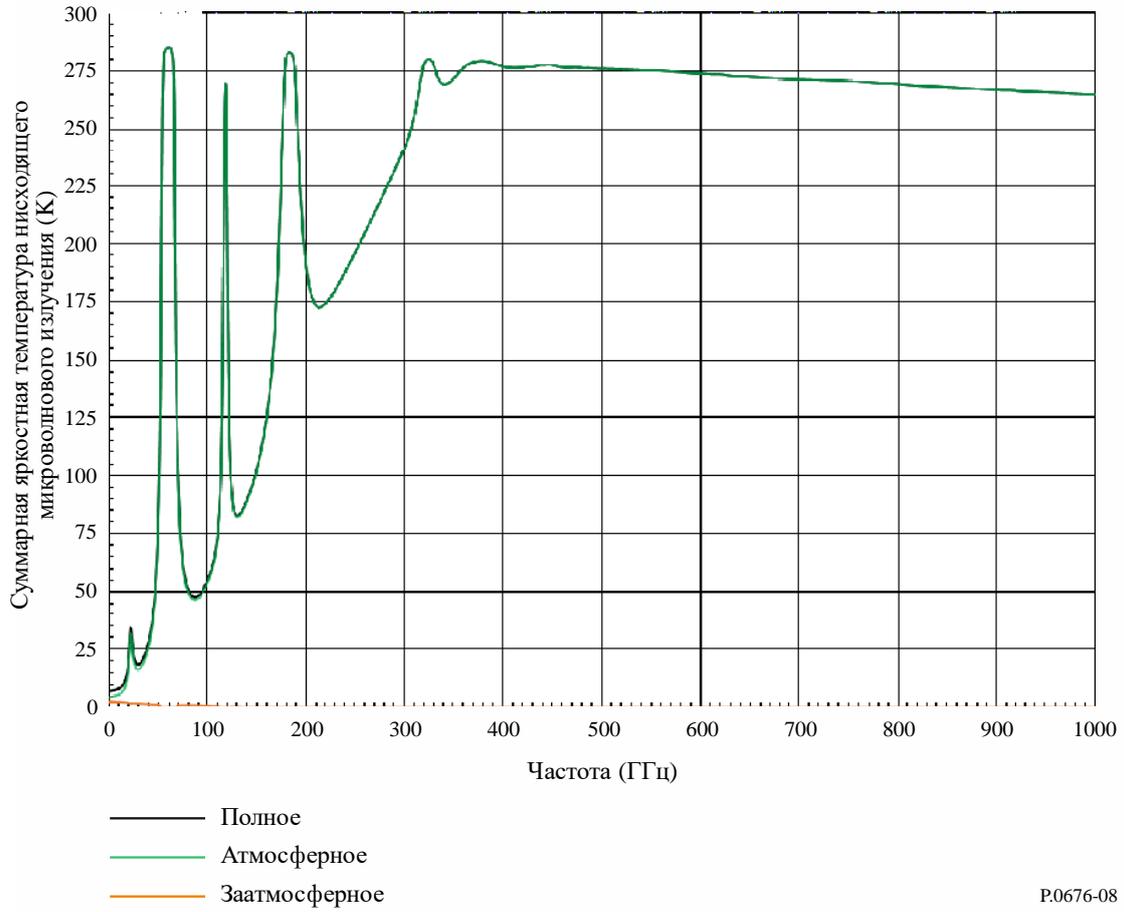
Разность физической и яркостной температур микроволнового излучения
абсолютно черного тела



P.0676-07

РИСУНОК 8

Яркостная температура нисходящего микроволнового излучения для зенитной трассы и стандартной атмосферы
(центры линий 1 ГГц)



P.0676-08

При необходимости для интерполяции и экстраполяции этих профилей можно использовать уравнения (24a)–(24c) из Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R P.834 (и сопутствующие карты).

- 7 Угол места у поверхности Земли или вблизи от нее берется как видимый угол места, а не угол места при распространении в свободном пространстве. Для углов места при распространении в свободном пространстве, меньших или равных 10 градусам, видимый угол места можно вычислить, используя уравнение (13) из Рекомендации МСЭ-R P.834.
- 8 Оценить затухание в атмосферных газах на наклонной трассе для любой широты и долготы между точками сетки можно путем билинейной интерполяции соответствующих оценок затухания в атмосферных газах на наклонной трассе в окружающих точках сетки, используя метод из Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R P.1144. Затухание в атмосферных газах на наклонной трассе в каждой из окружающих точек сетки должно определяться от высоты поверхности Земли над средним уровнем моря на данной широте и долготе до максимальной высоты, заданной в каждом профиле.

Приложение 2

Приближенное определение затухания в атмосферных газах в диапазоне частот 1–350 ГГц

В настоящем Приложении приведены упрощенные алгоритмы для приблизительных расчетов затухания в атмосферных газах для ограниченного диапазона частот 1–350 ГГц, углов места трассы 5 град. и выше, ограниченного диапазона метеорологических условий и геометрических конфигураций.

1 Погонное затухание

Погонное затухание γ_o (дБ/км), обусловленное кислородом, и погонное затухание γ_w (дБ/км), обусловленное водяным паром, идентичны γ_o и γ_w в уравнении (1). Погонное затухание для влажного воздуха γ_o (дБ/км), обусловленное кислородом, и погонное затухание для влажного воздуха γ_w (дБ/км), обусловленное водяным паром, при использовании этих упрощенных методов идентичны γ_o и γ_w в уравнении (1).

Давление сухого воздуха p , температура T и плотность водяного пара ρ – это значения на поверхности Земли. В отсутствие местных данных о температуре для определения p , T и ρ можно использовать значения среднегодовой глобальной стандартной атмосферы, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.835.

На рисунке 10 показаны кривые погонного затухания в сухом воздухе (Сухой воздух), в водяном паре только при плотности $7,5 \text{ г/м}^3$ (Водяной пар) и полного погонного затухания (Полное) на частотах от 1 до 350 ГГц на уровне моря для среднегодовой глобальной стандартной атмосферы, приведенной в Рекомендации МСЭ-R P.835. Значения ρ у поверхности Земли можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.836.

2 Затухание на трассе

2.1 Наземные трассы

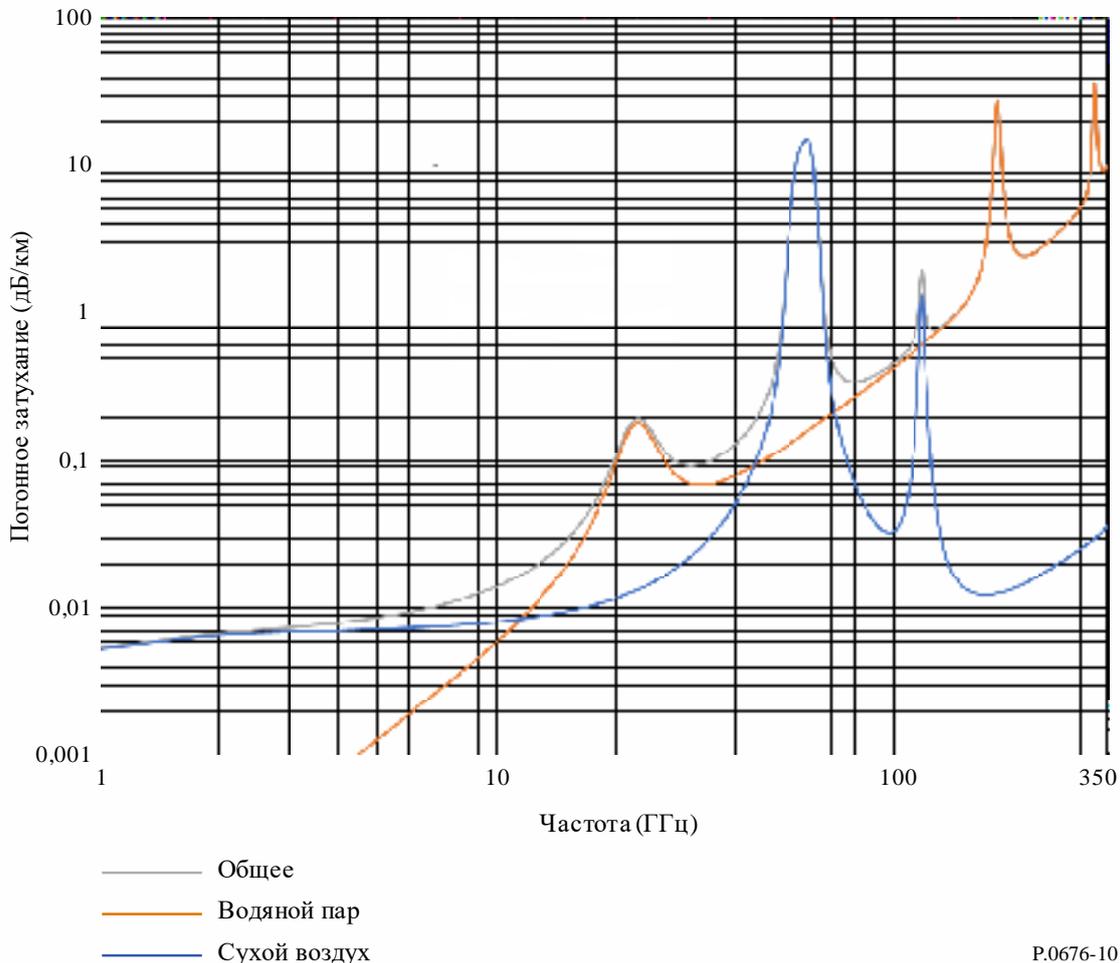
Для горизонтальной трассы или для слегка наклонных трасс, проходящих вблизи Земли, затухание на трассе A можно рассчитать следующим образом:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{дБ}, \quad (29)$$

где r_0 – длина трассы (км).

РИСУНОК 10

Погонное затухание за счет атмосферных газов
(давление = 1013,25 гПа; температура = 15 °С; плотность водяного пара = 7,5 г/м³)



P.0676-10

2.2 Наклонные трассы

В этом пункте приведены алгоритмы расчета полного затухания в атмосферных газах на проходящих через атмосферу Земли наклонных трассах, основанные на определении значений эквивалентной высоты для кислорода и водяного пара, на которые следует умножить величину погонного затухания в кислороде и водяном паре, для того чтобы получить соответствующее зенитное затухание в кислороде и водяном паре. Погонное затухание в кислороде и водяном паре рассчитывается с использованием значений давления, температуры и плотности водяного пара, соответствующих высоте земной станции, по методу, который описан в разделе 1 Приложения 1; а значения эквивалентной высоты для кислорода и водяного пара рассчитываются с использованием значений давления, температуры и плотности водяного пара на поверхности Земли. Концепция эквивалентной высоты предполагает экспоненциальное уменьшение погонного затухания в атмосфере в зависимости от высоты. Эти алгоритмы возможно использоваться для оценки полного затухания в атмосферных газах на наклонной трассе для частот за пределами 0,5 ГГц от центров спектральных линий при высоте земной станции до 10 км над поверхностью Земли. Для частот в пределах 0,5 ГГц от центров спектральных линий на любой высоте земной станции следует использоваться метод суммирования спектральных линий, который описан в Приложении 1. Приведенные ниже выражения получены из стандартных атмосферных профилей, которые приведены в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.835 и имеют погрешность не более 10% для этих конкретных атмосферных профилей. Точность этих алгоритмов в конкретном местоположении и в конкретное время можно оценить путем сравнения затухания, определенного с использованием этих алгоритмов, и

затухания, рассчитанного с использованием метода, приведенного в Приложении 1, для репрезентативных атмосферных профилей, приведенных в Приложении 2 и Приложении 3 к Рекомендации МСЭ-R P.835, или данных радиозондирования.

Эквивалентная высота, относимая к кислородной составляющей затухания в атмосферных газах, определяется следующим образом:

$$h_o = \frac{6,1A}{1 + 0,17r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3), \quad (30)$$

где:

$$t_1 = \frac{5,1040}{(1 + 0,066r_p^{-2,3})} \exp\left(-\left(\frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \times \exp(-7,9r_p)}\right)^2\right), \quad (31)$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^7 \frac{c_i \exp(2,12r_p)}{(f - f_i)^2 + 0,025 \exp(2,2r_p)}, \quad (32)$$

$$t_3 = \frac{0,0114 f}{1 + 0,14r_p^{-2,6}} \frac{15,02 f^2 - 1353 f + 5,333 \times 10^4}{f^3 - 151,3 f^2 + 9629 f - 6803} \quad (33)$$

$$A = 0,7832 + 0,00709(T - 273,15), \quad (34)$$

где f_i и зависимость c_i от i даны в таблице 3:

ТАБЛИЦА 3
Параметры f_i и c_i

i	c_i	f_i (ГГц)
1	0,1597	118,750334
2	0,1066	368,498246
3	0,1325	424,763020
4	0,1242	487,249273
5	0,0938	715,392902
6	0,1448	773,839490
7	0,1374	834,145546

с тем ограничением, что:

$$h_o \leq 10,7r_p^{0,3} \text{ при } f < 70 \text{ ГГц.} \quad (35a)$$

T – температура у земной поверхности (К), ρ – плотность водяного пара у земной поверхности (г/м^3), $e = \frac{\rho T}{216,7}$ hPa, и $r_p = (p + e)/1013,25$.

Эквивалентная высота, относимая к составляющей затухания в водяном паре, равняется:

$$h_w = A + B \times \sum_{i=1}^{14} \frac{a_i \sigma_w}{(f - f_i)^2 + b_i \sigma_w}, \quad (35b)$$

где a_i , b_i и зависимость f_i от i даны в таблице 4, а кроме того:

$$A = 1,9298 - 0,04166(T - 273,15) + 0,517\rho, \quad (36)$$

$$B = 1,1674 - 0,00622(T - 273,15) + 0,0063\rho, \quad (37)$$

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6(r_p - 0,57)]}. \quad (38)$$

ТАБЛИЦА 4
 Параметры f_i , a_i и b_i

i	f_i (ГГц)	a_i	b_i
1	22,235080	1,52	2,56
2	183,310087	7,62	10,2
3	325,152888	1,56	2,70
4	380,197353	4,15	5,70
5	439,150807	0,20	0,91
6	448,001085	1,63	2,46
7	474,689092	0,76	2,22
8	488,490108	0,26	2,49
9	556,935985	7,81	10,0
10	620,70087	1,25	2,35
11	752,033113	16,2	20,0
12	916,171582	1,47	2,58
13	970,315022	1,36	2,44
14	987,926764	1,60	1,86

T – температура у земной поверхности (К), ρ – плотность водяного пара у земной поверхности (г/м^3), $e = \frac{\rho T}{216,7}$ (гПа), а $r_p = (p + e)/1013,25$.

Зенитное затухание на частотах от 50 до 70 ГГц является сложной функцией от частоты, как показано на рисунке 12, и приведенные выражения для эквивалентной высоты могут дать лишь приближенные результаты, которые, как правило, сводятся к получению уровней затухания, характерных для этого диапазона частот. Для более точных расчетов следует обратиться к процедуре, описанной в Приложении 1.

Таким образом, полное зенитное затухание равно:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad (\text{дБ}) \quad (39)$$

На рисунке 11 показано полное зенитное затухание на уровне моря (Полное), а также затухание в сухом воздухе (Сухой воздух) и водяном паре (Водяной пар), полученные для среднегодовой глобальной стандартной атмосферы, описанной в Рекомендации МСЭ-R P.835.

2.2.1 Углы места между 5 и 90 градусами

2.2.1.1 Трассы Земля-космос

Для угла места φ между 5° и 90° затухание на трассе получается при использовании закона косеканса следующим образом:

Для затухания на трассе, основанном на метеорологических данных у поверхности:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{дБ}, \quad (40)$$

где $A_o = h_o \gamma_o$ и $A_w = h_w \gamma_w$

и для затухания на трассе, основанном на суммарном содержании водяного пара:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{дБ}, \quad (41)$$

где $A_o = h_o \gamma_o$ и A_w задается в пункте 2.3.

2.2.1.2 Наклонные трассы

Для определения затухания на наклонных трассах между станцией, расположенной на высоте h_1 , и другой станцией, находящейся на большей высоте h_2 , где оба значения высоты меньше 10 км над средним уровнем моря, значения h_o и h_w в уравнении (39) должны быть заменены следующими значениями h'_o и h'_w :

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{км}, \quad (42)$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{км}, \quad (43)$$

при этом предполагается, что значение ρ плотности водяного пара, используемое в уравнении (1), – это гипотетическая величина, рассчитанная на уровне моря по следующей формуле:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2), \quad (44)$$

где ρ_1 – значение, соответствующее высоте h_1 рассматриваемой станции, а эквивалентная высота для плотности водяного пара полагается равной 2 км (см. Рекомендацию МСЭ-R P.835).

В уравнениях (42) и (43) используются разные методы нормализации эквивалентных высот для сухого воздуха и водяного пара. Если среднее давление воздуха на уровне моря можно считать постоянным во всех точках земного шара (и равным 1013,25 гПа), то плотность водяного пара не только сильно зависит от климатических условий, но и измеряется у поверхности (то есть на высоте земной станции). Значения плотности водяного пара у поверхности Земли приведены в Рекомендации МСЭ-R P.836.

2.2.2 Углы места от 0 до 5 градусов

2.2.2.1 Трассы Земля-космос

В этом случае должны использоваться данные в Приложении 1 к настоящей Рекомендации. Приложение 1 следует также применять для углов места менее нуля.

2.2.2.2 Наклонные трассы

Затухание на наклонной трассе между станцией, расположенной на высоте h_1 и на большей высоте h_2 (где значения обеих высот меньше 10 км относительно среднего уровня моря), можно определить из следующих выражений:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{дБ}, \quad (45)$$

где:

R_e : эквивалентный радиус Земли с учетом рефракции, приведенной в Рекомендации МСЭ-R P.834, и выраженный в км (при непосредственной близости к поверхности Земли обычно принимается значение, равное 8500 км);

φ_1 : угол места на высоте h_1 ;

F : функция, определяемая как:

$$F(x) = \frac{1}{0,661 x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}}, \quad (46)$$

$$\varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right), \quad (47a)$$

$$x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{для } i = 1, 2, \quad (47b)$$

$$x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{для } i = 1, 2, \quad (47c)$$

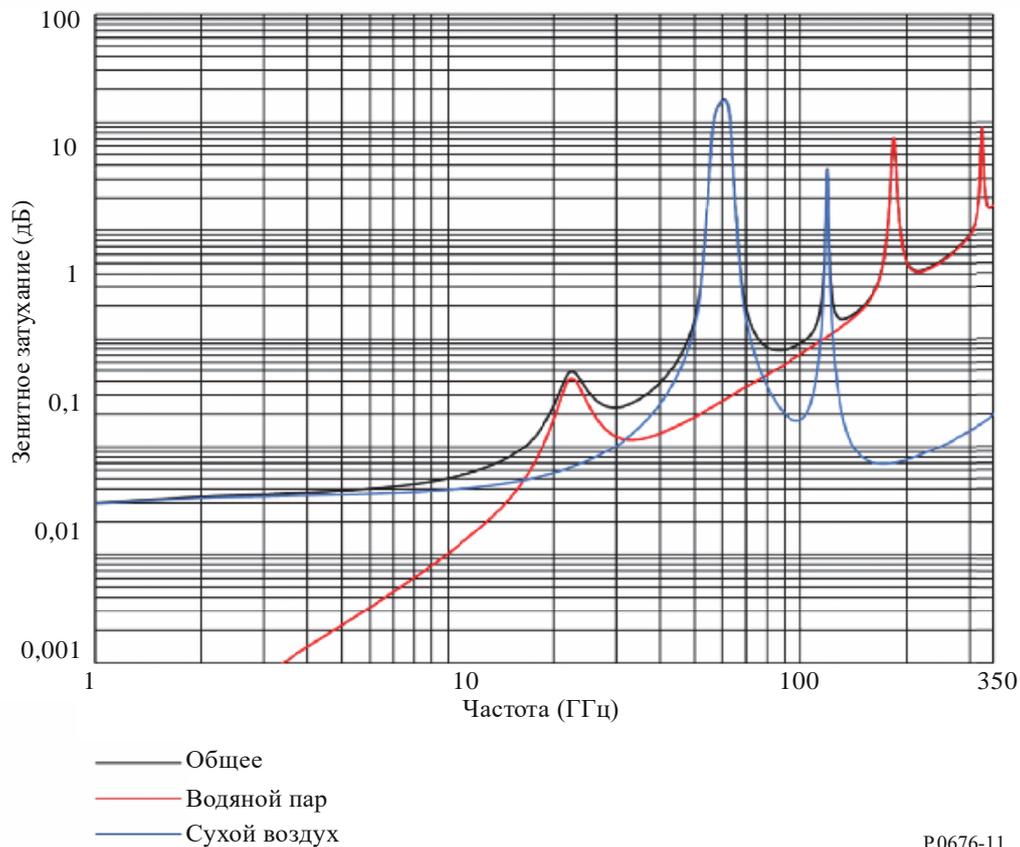
при этом предполагается, что значение ρ плотности водяного пара, используемое в уравнении (1), – это гипотетическая величина, рассчитываемая на уровне моря по следующей формуле:

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2), \quad (48)$$

где ρ_1 – значение, соответствующее высоте h_1 рассматриваемой станции, а эквивалентная высота для плотности водяного пара полагается равной 2 км (см. Рекомендацию МСЭ-R P.835).

РИСУНОК 11

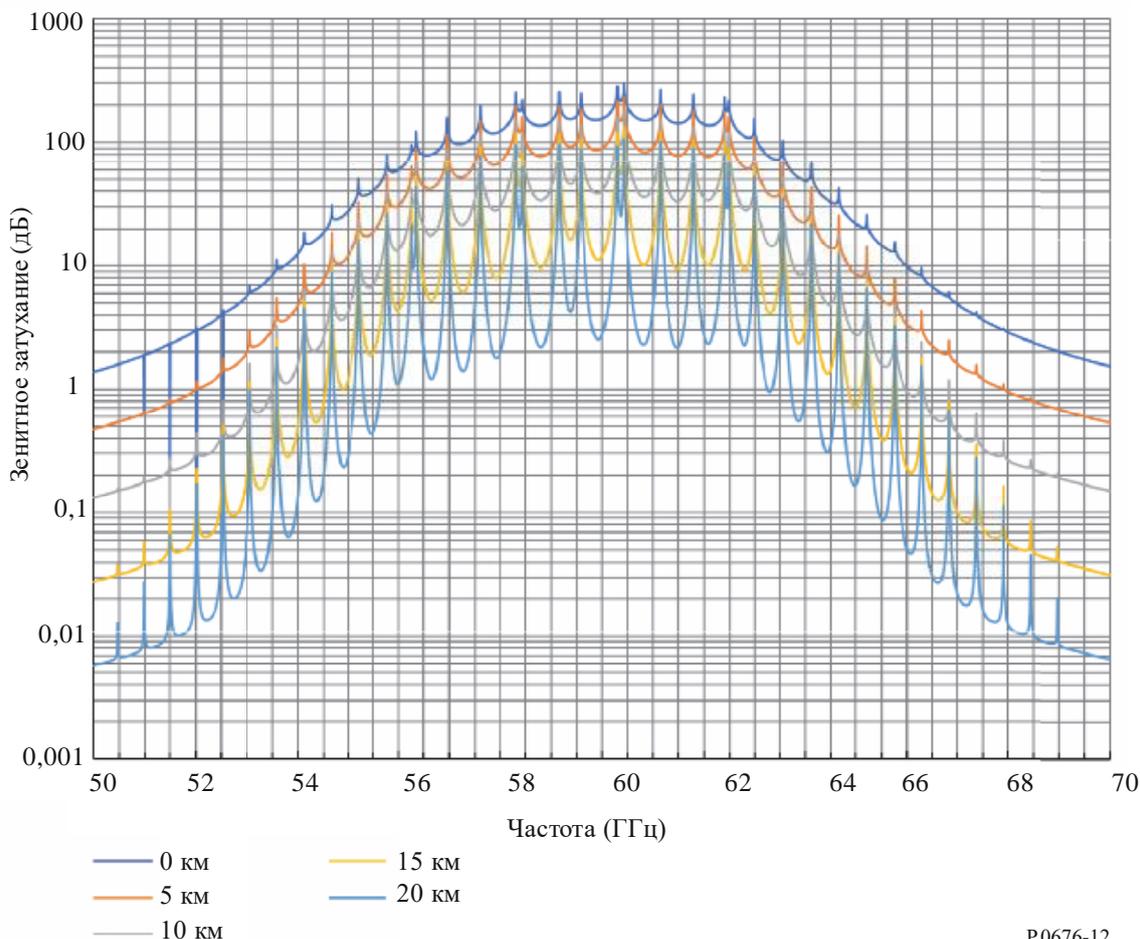
Полное зенитное затухание, затухание в сухом воздухе и водяном паре на уровне моря
(давление = 1013,25 гПа; температура = 15 °С; плотность водяного пара = 7,5 г/м³)



P.0676-11

РИСУНОК 12

Зенитное затухание в кислороде для указанных высот, рассчитанное с шагом 10 МГц, включая центры линий поглощений (0 км, 5 км, 10 км, 15 км и 20 км)



Значения ρ_1 у поверхности Земли приведены в Рекомендации МСЭ-R P.836.

Использование различных формул для затухания в сухом воздухе и в водяном паре поясняется в пункте 2.2.2.2.

2.3 Зенитное затухание в водяном паре

Описанный выше метод расчета затухания на наклонных трассах предполагает знание значений плотности водяного пара у поверхности Земли. Если суммарное содержание водяного пара V_t известно, то полное затухание в водяном паре можно рассчитать следующим образом:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ ГГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц} \\ \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ ГГц} < f \leq 350 \text{ ГГц} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (49)$$

где:

$$a = 0,2048 \exp \left[- \left(\frac{f - 22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[- \left(\frac{f - 183,5}{4,096} \right)^2 \right] + 0,2073 \exp \left[- \left(\frac{f - 325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,1113 \quad (50)$$

$$b = 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723 \quad (51)$$

$$h = \begin{cases} 0 & h_s < 0 \text{ км} \\ h_s & 0 \text{ км} \leq h_s \leq 4 \text{ км} \\ 4 & h_s > 4 \text{ км} \end{cases} \quad (\text{км}) \quad (52)$$

$$\rho_{v,ref} = \frac{V_t}{2,38} \text{ (г/м}^3\text{)} \quad (53)$$

$$t_{ref} = 14 \ln \left(0,22 \frac{V_t}{2,38} \right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (54)$$

и

f : частота (ГГц);

f_{ref} : 20,6 (ГГц);

$p_{ref} = 845$ (гПа);

V_t : значение общего содержания водяного пара: а) полученное на основе местных данных измерений при помощи радиозондов или из радиометрических, или б) для требуемого процента времени (кг/м² или мм) на основе цифровых карт, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836 (кг/м² или мм);

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$: погонное затухание как функция частоты, давления, плотности водяного пара и температуры, рассчитываемая по относящейся к водяному пару составляющей уравнения (1) (дБ/км);

h_s : высота земной станции над средним уровнем моря (amsl) (км).