

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.676-11
(09/2016)

Затухание в атмосферных газах

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 Приложении 1 к 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, 2018 г.

© ITU 2018

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.676-11

Затухание в атмосферных газах

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

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

Сфера применения

Настоящая Рекомендация обеспечивает методы, позволяющие производить оценку затухания радиоволн в атмосферных газах на наземных и наклонных трассах за счет использования:

- a) метода расчета путем суммирования индивидуальных линий поглощения для оценки затухания в атмосферных газах, который применяется для диапазона частот 1–1000 ГГц; и
- b) упрощенного метода приблизительной оценки затухания в атмосферных газах, который применяется для диапазона частот 1–350 ГГц.

Ключевые слова

Поглощение в газах, погонное затухание, затухание на наклонных трассах, общее затухание, водяной пар, кислород, сухой воздух

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что необходимо производить оценку затухания радиоволн в атмосферных газах на наземных и наклонных трассах,

рекомендует,

1 чтобы для расчета затухания в атмосферных газах на частотах до 1000 ГГц в общем случае использовалась процедура, описанная в Приложении 1;

2 чтобы для приблизительных расчетов затухания в атмосферных газах в диапазоне частот 1–350 ГГц использовалась упрощенная процедура, приведенная в Приложении 2.

Руководство к настоящей Рекомендации

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

- 1 расчет погонного затухания и затухания на трассе в газах с использованием способа суммирования спектральных линий, приведенного в Приложении 1, исходя из значений атмосферного давления, температуры и водяного пара в зависимости от высоты;
- 2 приблизительная оценка погонного затухания и затухания на трассе в 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 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.

Погонное затухание

Для прогнозирования погонного затухания может использоваться уравнение (1) в Приложении 1, применимое для частот до 1000 ГГц, или сумма результатов, полученных в уравнениях (22) и (23) в Приложении 2, применимая для частот до 350 ГГц. Для обоих методов необходимы значения 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)

Возможно использовать уравнение (20) в Приложении 1 или уравнения (28) и (29) в Приложении 2.

- Для применения уравнения (20) в Приложении 1 требуются данные профилей температуры, давления и плотности водяного пара вдоль трассы. В отсутствие местных данных профилей возможно использовать стандартные атмосферные профили, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.835. Вместо стандартного значения плотности водяного пара на уровне земли, равного $7,5 \text{ г/м}^3$, возможно использовать значения карты вероятности превышения плотности водяного пара у поверхности земли, представленной в Рекомендации МСЭ-R P.836.
- Для применения уравнения (28) в Приложении 2 требуются значения приземного давления, приземной температуры и плотности водяного пара у поверхности земли. Уравнение (28) в Приложении 2 представляет собой аппроксимацию к уравнению (20) 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 (28) в Приложении 2 возможно использовать, с тем чтобы прогнозировать: а) мгновенное затухание в газах для конкретного значения приземного давления, приземной температуры и плотности водяного пара у поверхности земли; или б) затухание в газах, соответствующее значениям плотности водяного пара у поверхности земли при заданной вероятности превышения. В отсутствие местных данных о плотности водяного пара у поверхности земли возможно использовать данные карт плотности водяного пара у поверхности земли, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.836.
- Для применения уравнения (29) в Приложении 2 требуются значения приземной температуры, приземного давления и суммарного содержания водяного пара вдоль трассы. Аналогично уравнению (28) в Приложении 2, уравнение (29) в Приложении 2 возможно использовать, с тем чтобы прогнозировать: а) мгновенное затухание в газах для конкретного значения приземного давления, приземной температуры и суммарного содержания водяного пара; или б) затухание в газах, соответствующее суммарному содержанию водяного пара при заданной вероятности превышения. В отсутствие местных данных о суммарном содержании водяного пара у поверхности земли возможно 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 (29) в Приложении 2 с использованием местных данных суммарного содержания водяного пара считается более точным, чем уравнение (28) в Приложении 2 с использованием местных данных о плотности водяного пара у поверхности земли. Аналогично, в отсутствие местных данных уравнение (29) в Приложении 2 с использованием данных карт суммарного содержания водяного пара, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836, считается более точным, чем уравнение (28) в Приложении 2 с использованием данных карт плотности водяного пара у поверхности земли, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.836.

	Приложение 1 Уравнение (20)	Приложение 2 Уравнение (28)	Приложение 2 Уравнение (29)
Диапазон частот	$\leq 1\ 000$ 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 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 наиболее точно рассчитывается методом суммирования резонансных линий кислорода и водяного пара, в который введены дополнительные небольшие по величине коэффициенты, учитывающие 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.

Для быстрых приблизительных расчетов погонного затухания на частотах до 350 ГГц, если не требуется высокая точность, используются упрощенные алгоритмы, приведенные в Приложении 2, которые пригодны для ограниченного диапазона метеорологических условий.

Погонное затухание в газах определяется следующим образом:

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

здесь 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 (в гПа);

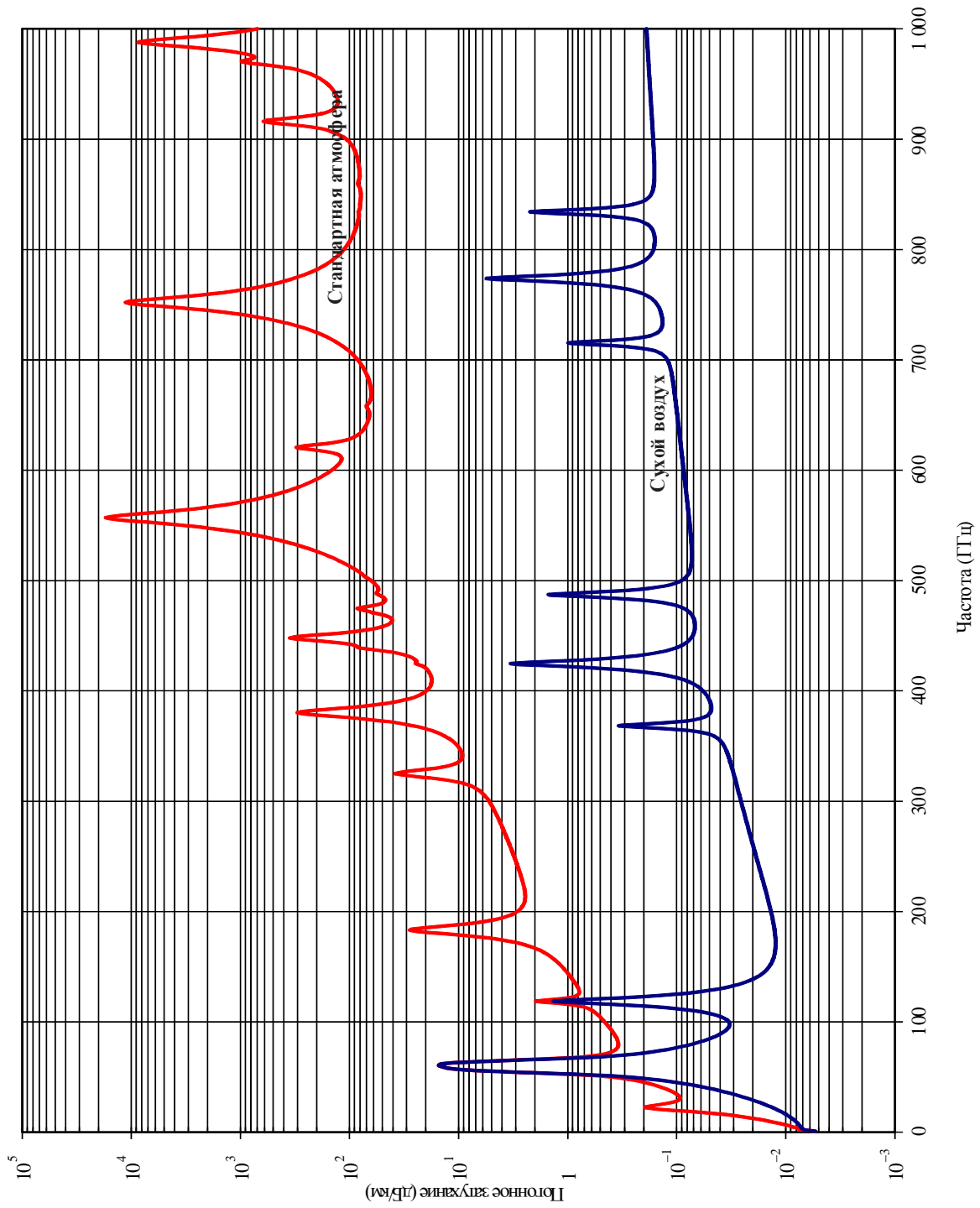
e : парциальное давление водяного пара (гПа) (полное барометрическое давление, $p_{\text{tot}} = p + e$);

$\theta = 300/T$;

T : температура (К).

РИСУНОК 1

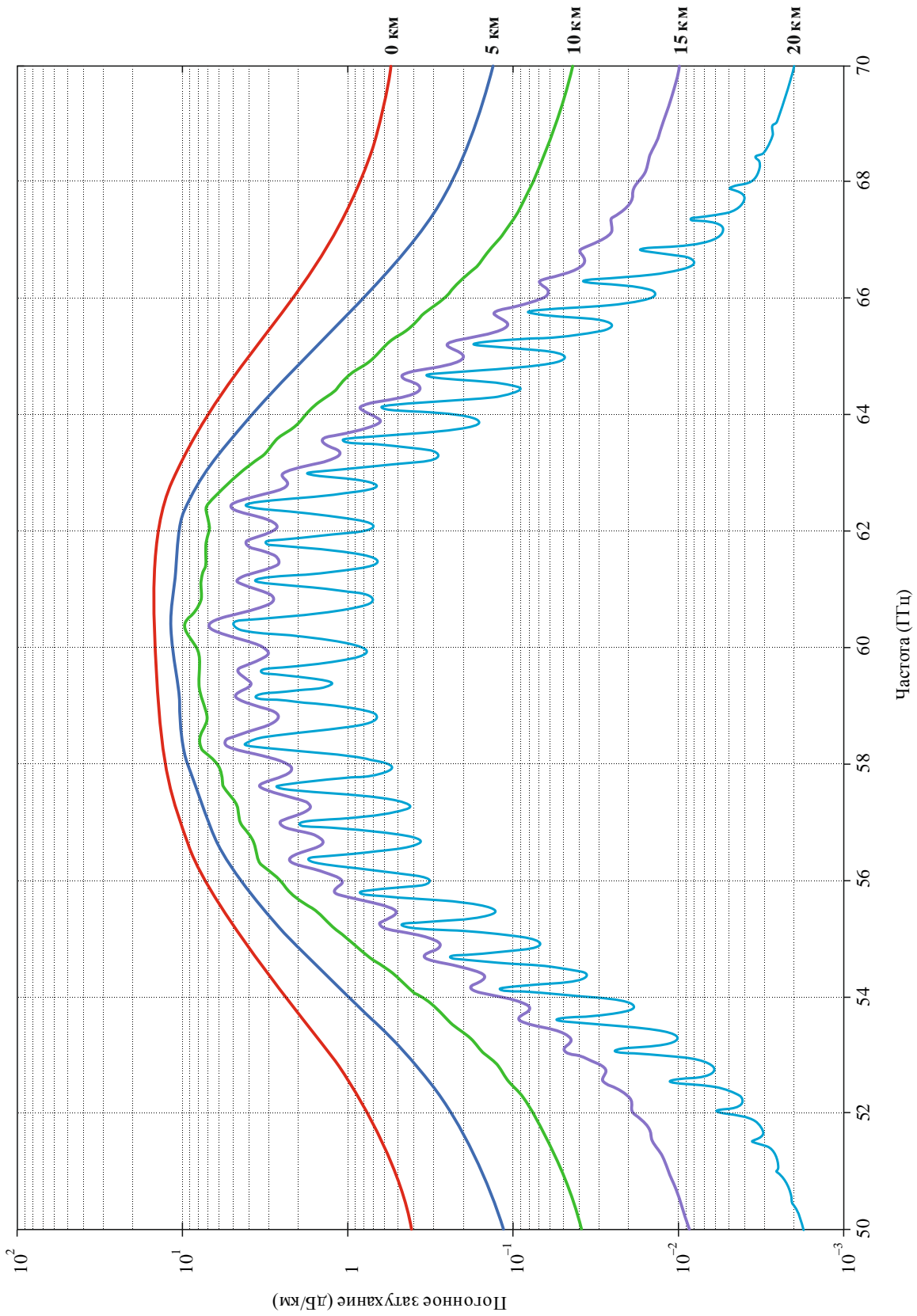
Погонное затухание в атмосферных газах, рассчитанное с шагом 1 ГГц, включая центры линий поглощения



P.0676-01

РИСУНОК 2

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



Если имеются, следует использовать местные профили высоты p , e и T (например, измеренные с помощью радиозондирования). В отсутствие местных данных возможно использовать значения эталонной стандартной атмосферы, описанной в Рекомендации МСЭ-R P.835. (Следует отметить, что, когда вычисляется общее затухание в атмосфере, для затухания и в сухом воздухе, и в водяном паре используется одно и то же парциальное давление водяного пара.)

Парциальное давление водяного пара, e , на 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 с целью 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 этом пункте представлен метод расчета погонного затухания путем суммирования спектральных линий, о котором говорилось выше, при различных значениях давления, температуры и влажности атмосферного воздуха. С помощью этого метода можно точно определить затухание на трассе для систем связи любой геометрической конфигурации, находящихся как в пределах земной атмосферы, так и за ее пределами, просто разделив атмосферу на горизонтальные слои, определяющие профиль изменения таких метеорологических параметров, как давление, температура и влажность вдоль трассы. Если такие данные, измеренные на месте с помощью, например, радиозондирования, отсутствуют, то в глобальных масштабах или на низких широтах (в течение всего года), средних широтах (летом и зимой) и высоких широтах (летом и зимой) можно использовать значения эталонных стандартных атмосфер, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.835.

На рисунке 3 показано зенитное затухание, рассчитанное с шагом 1 ГГц с помощью названного метода для глобальной эталонной стандартной атмосферы, указанной в Рекомендации МСЭ-R P.835, при толщине горизонтальных слоев 1 км и суммирования затуханий для каждого слоя в случае влажной атмосферы (стандартная) и сухого воздуха (сухой воздух).

Общее затухание на наклонной трассе, $A(h, \varphi)$, берущей начало от станции, расположенной на высоте h и имеющей угол места φ , можно рассчитать для $\varphi \geq 0$ по формуле:

$$A(h, \varphi) = \int_h^\infty \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH, \quad (11)$$

где Φ определяется в полярных координатах с помощью закона Снеллиуса:

$$\Phi = \arccos \left(\frac{c}{(r + H) \times n(H)} \right), \quad (12)$$

где:

$$c = (r + h) \times n(h) \times \cos \varphi, \quad (13)$$

где $n(h)$ – индекс атмосферной рефракции радиоволн, рассчитанный на основании значений давления, температуры и давления водяного пара вдоль трассы (см. Рекомендацию МСЭ-R P.835) с помощью уравнений (1) и (2), описанных в Рекомендации МСЭ-R P.453.

Если $\varphi < 0$, то существует минимальная высота h_{min} , на которой радиолуч становится параллельным поверхности Земли. Значение h_{min} можно определить, решив следующее трансцендентное уравнение:

$$(r + h_{min}) \times n(h_{min}) = c. \quad (14)$$

Это уравнение легко решается путем многократных расчетов по приводимой ниже формуле, используя в качестве начального значения $h_{min} = h$:

$$h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r. \quad (15)$$

Тогда $A(h, \varphi)$ можно рассчитать следующим образом:

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH. \quad (16)$$

Интегрируя уравнения (11) и (16), следует учитывать, что при $\Phi = 0$ подынтегральное выражение стремится к бесконечности. Однако эту особую точку можно устранить, применив соответствующее преобразование переменной, например, используя подстановку $u^4 = H - h$ в уравнении (11) и $u^4 = H - h_{min}$ в уравнении (16).

Численное значение затухания за счет атмосферных газов можно получить с помощью следующего алгоритма.

Для расчета общего затухания на спутниковой линии необходимо знать не только погонное затухание в каждой точке линии, но и длину трассы, на которой возникает погонное затухание такой величины. Чтобы определить эту длину, необходимо учесть искривление луча, распространяющегося в условиях сферической Земли.

Рисунок 4 можно использовать в качестве эталона, где a_n – длина участка трассы в слое n , имеющем толщину δ_n и индекс рефракции n_n . α_n и β_n – углы падения и выхода луча соответственно. r_n – радиус от центра Земли до начала слоя n . Тогда a_n можно представить следующим образом:

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2}. \quad (17)$$

Угол α_n рассчитывается по формуле:

$$\alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right). \quad (18)$$

β_1 – угол падения на земную станцию (дополнение угла места φ). β_{n+1} можно рассчитать по значениям угла α_n , используя закон Снеллиуса, следующим образом:

$$\beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right), \quad (19)$$

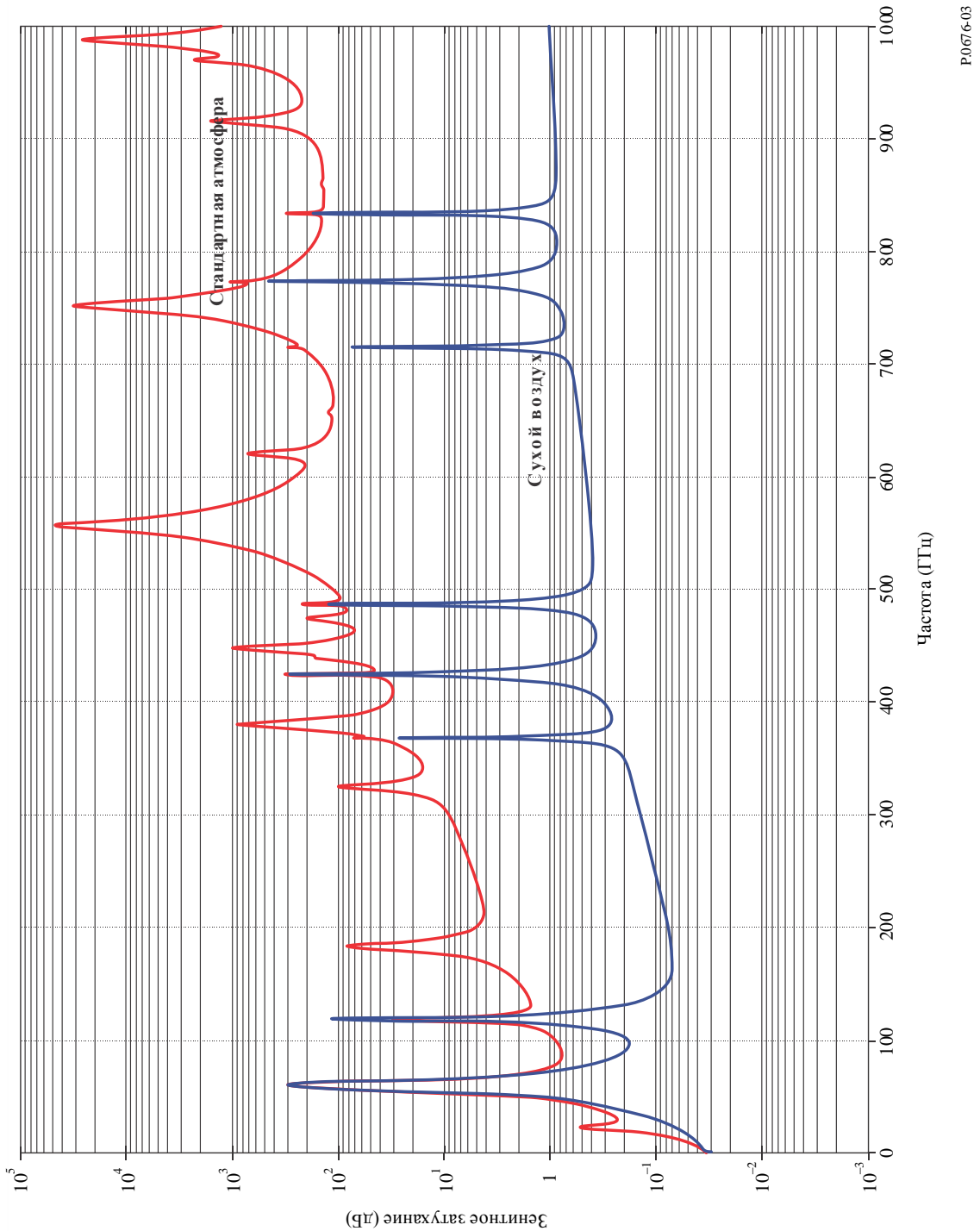
где n_n и n_{n+1} – индексы рефракции для слоев n и $n + 1$.

Уравнение (19) может оказаться недействительным при очень низких углах места ($\varphi < 1^\circ$), когда в качестве входных используются данные радиозондов из определенных регионов мира, которые характеризуются условиями атмосферных волноводов. В этих случаях существуют воздушные слои, в которых вертикальные градиенты рефракции радиоволн меньше -157 N/км, и алгоритм построения лучей (уравнения (17) – (19)), который основан на геометрической оптике, становится более неприменимым. При этих аномальных условиях функция арксинуса в уравнении (19) становится комплексной, поскольку ее аргумент немного превышает 1. Следует отметить, что уравнение (19)

действительно для всех значений угла места, если в качестве входных данных используются эталонные стандартные атмосферы, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.835, поскольку эти теоретические атмосферы – очевидно без значительных отрицательных градиентов – не поддерживают такие аномальные условия распространения.

РИСУНОК 3

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



Общее затухание, A_{gas} , можно получить с помощью формулы:

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{дБ}, \quad (20)$$

где γ_n – погонное затухание n -ого слоя для уравнения (1).

Для того чтобы обеспечить необходимую точность расчета затухания, толщина слоев должна экспоненциально возрастать с высотой, начиная от 10 см для нижнего слоя (уровень земли) и заканчивая 1 км на высоте 100 км в соответствии со следующим уравнением:

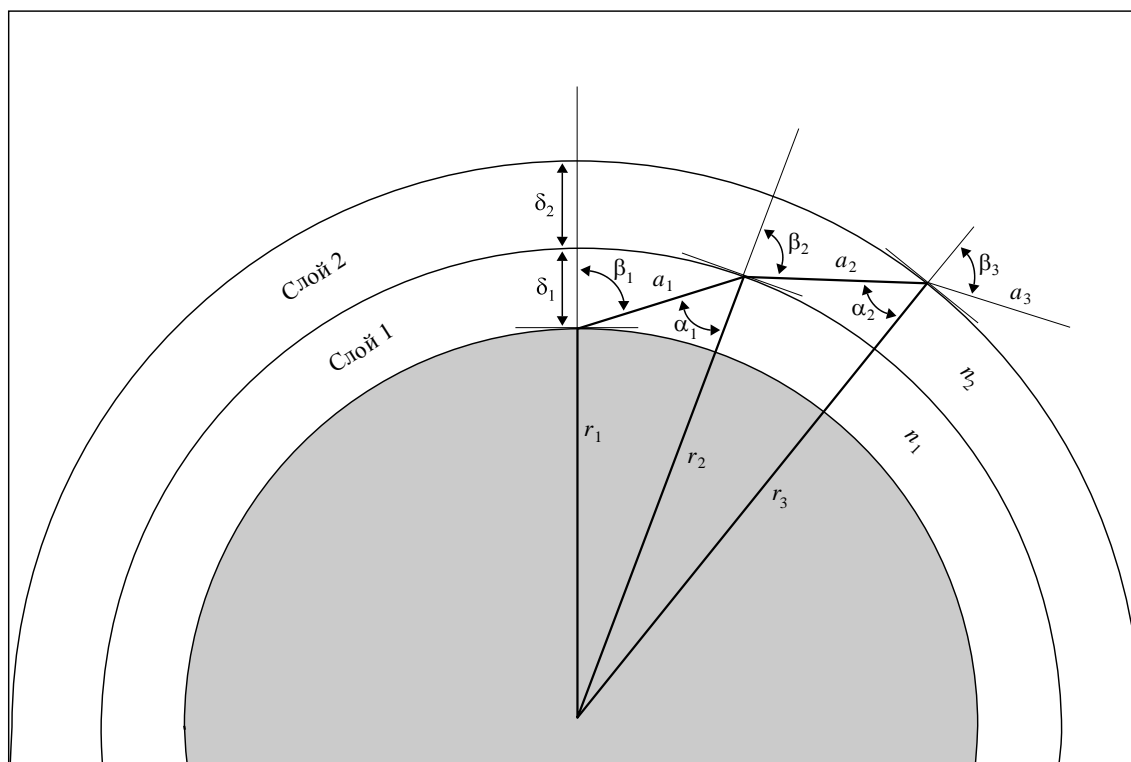
$$\delta_i = 0,0001 \exp\left\{\frac{i-1}{100}\right\} \quad \text{км}, \quad (21)$$

при i в значении от 1 до 922 $\delta_{922} \cong 1,0$ км, а $\sum_{i=1}^{922} \delta_i \cong 100$ км.

При расчете затухания на трассах Земля-космос суммирование должно выполняться по крайней мере до высоты 30 км и вплоть до 100 км на частотах, соответствующих центру линии поглощения кислорода.

РИСУНОК 4

Трасса, проходящая через атмосферу



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 реальной части частотно-зависимой комплексной рефракции. Данный эффект описывается как зависимость фазы от частоты (градус/км) или групповой задержки от частоты (пс/км); и аналогично затуханию возможно рассчитать затухание для наклонных трасс. Эффекты дисперсии описываются в главе 6 Справочника МСЭ-R по радиометеорологии, где приводится модель расчета дисперсии, основанная на методе прогнозирования путем суммирования спектральных линий. На практике дисперсионные эффекты не оказывают серьезного влияния на наземные системы связи, работающие в миллиметровом диапазоне на частотах до нескольких сотен МГц, длина трасс которых невелика (например, менее 20 км), и особенно в области окон спектра, на частотах, находящихся на некотором расстоянии от центров основных линий поглощения. Для спутниковых систем связи длина трасс, проходящих через атмосферу, будет больше, в результате чего рабочие частоты будут ограничены областью окон спектра, где и затухание в атмосфере, и соответствующее рассеяние невелики.

Приложение 2

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

В настоящем Приложении приводятся упрощенные алгоритмы для приблизительных расчетов затухания в атмосферных газах для ограниченного диапазона метеорологических условий и геометрических конфигураций.

1 Погонное затухание

Погонное затухание за счет сухого воздуха и водяного пара от уровня моря до высоты 10 км можно определить, используя следующие упрощенные алгоритмы, которые основаны на значениях погонного затухания в кислороде и водяном паре, рассчитанного методом суммирования спектральных линий, а также на значениях эффективных высот для кислорода и водяного пара. Эти упрощенные расчеты хорошо согласуются с методом суммирования спектральных линий. Однако для высот более 10 км и в тех случаях, когда требуется высокая точность, следует использовать метод расчета, основанный на суммировании спектральных линий.

Погонное затухание в сухом воздухе, γ_o (дБ/км), и погонное затухание во влажном воздухе, γ_w (дБ/км), определяются следующими уравнениями:

$$\gamma_o = 0,1820 f \left(\sum_{i(\text{кислород})} S_i F_i + N_D''(f) \right) \quad (22)$$

$$\gamma_w = 0,1820 f \sum_{i(\text{водяной пар})} S_i F_i \quad (23)$$

где S_i , F_i и $N_D''(f)$ для кислорода определяются уравнениями (3), (5), (6а), (7), (8) и (9), а S_i и F_i для водяного пара определяются уравнениями (3), (4), (5), (6а) и (7). Уравнение (6б) не применяется, так как отсутствует необходимость учитывать зеемановское расщепление линий кислорода и доплеровское расширение линий водяного пара на высотах до 10 км. Для кислорода осуществляется суммирование всех линий кислорода в таблице 1, а для водяного пара суммирование включает подгруппу из 9 линий водяного пара в таблице 2, отмеченных знаком "звездочка" (*).

Давление сухого воздуха, p , и температура, T , – это значения давления сухого воздуха и приземной температуры. В отсутствие местных данных о температуре возможно использовать значения среднегодовой глобальной стандартной атмосферы, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.835, для высоты поверхности земли.

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

2 Затухание на трассе

2.1 Наземные трассы

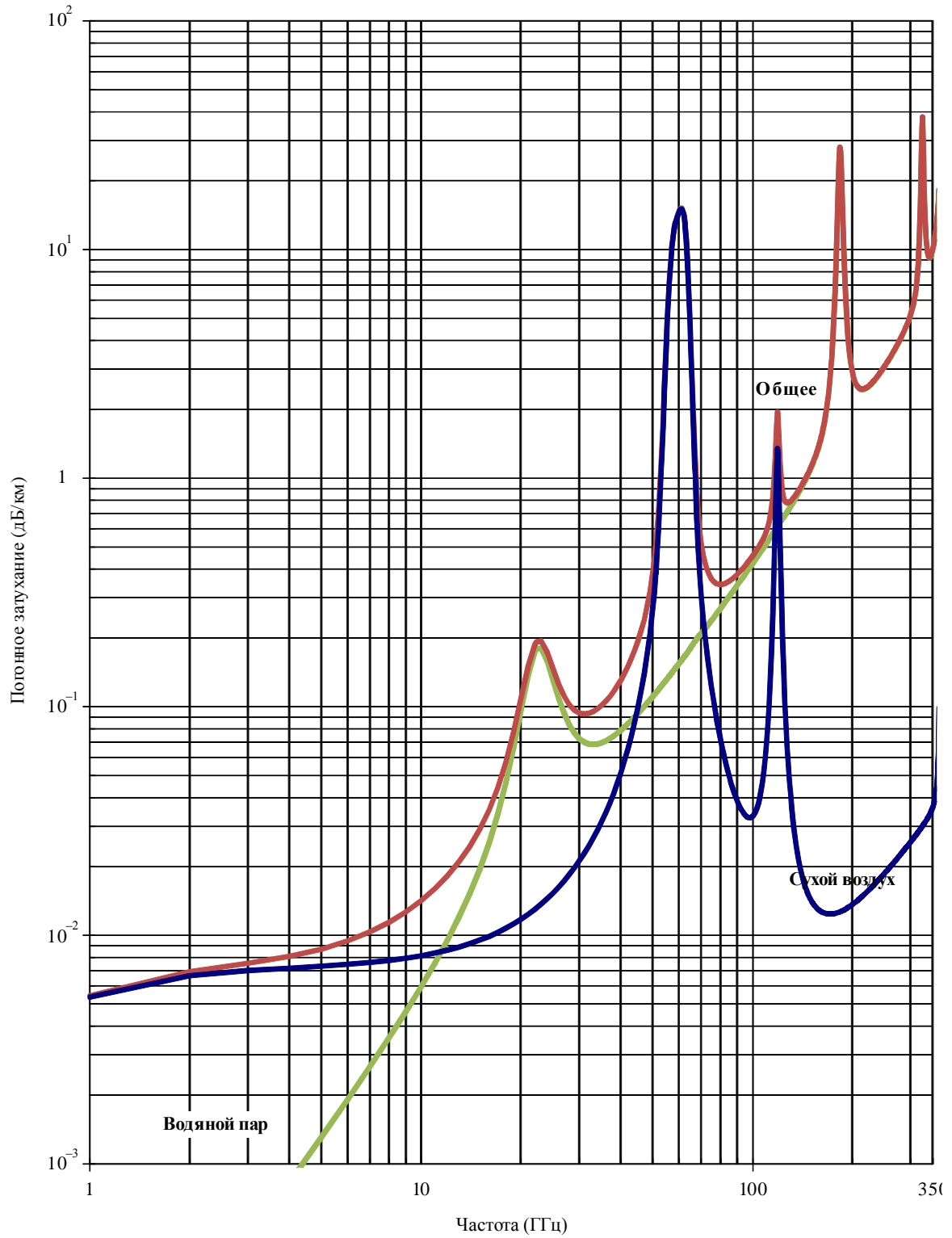
Для горизонтальной трассы или для слегка наклонных трасс, проходящих вблизи Земли, затухание на трассе, A , можно рассчитать следующим образом:

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{дБ}, \quad (24)$$

где r_0 – длина трассы (км).

РИСУНОК 5

Погонное затухание за счет атмосферных газов

(давление = 1013,25 гПа; температура = 15 °С; плотность водяного пара = 7,5 г/м³)

2.2 Наклонные трассы

В этом пункте приводятся упрощенные алгоритмы расчета затухания в атмосферных газах на наклонных трассах, проходящих через атмосферу Земли, основанные на определении значения эквивалентной высоты, на которую следует умножить величину затухания, определенного в пункте 1, для того чтобы получить зенитное затухание. Значения эквивалентной высоты зависят от давления и поэтому могут использоваться для определения затухания на зенитных трассах от уровня моря до высот примерно 10 км. Результирующие значения затухания на зенитных трассах от уровня моря до высот примерно 10 км можно определить с точностью $\pm 10\%$ для сухого воздуха и $\pm 5\%$ для водяного пара, если использовать значения давления, температуры и плотности водяного пара, соответствующие рассматриваемой высоте. На высотах более 10 км и особенно для частот в пределах 0,5 ГГц от центров резонансных линий на любой высоте должна использоваться процедура, описанная в Приложении 1. Следует отметить, что гауссова функция в уравнении (25b), описывающая эквивалентную высоту для кислорода в диапазоне 60 ГГц, может на определенных частотах приводить к погрешностям более 10%, поскольку эта процедура не предполагает точного воспроизведения структуры, показанной на рисунке 7. Приведенные ниже выражения получены из значений зенитного затухания, вычисленных по процедуре Приложения 1, численно суммируя значения затухания в полосе шириной 500 МГц; результирующие значения затухания эффективно отражают приблизительные минимальные значения в диапазоне 50–70 ГГц. Затухание на трассе с углом места, отличным от зенитного, можно определить, используя процедуры, описываемые далее в настоящем пункте.

Для сухого воздуха эквивалентная высота определяется следующим образом:

$$h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17 r_p^{-1,1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3), \quad (25a)$$

где:

$$t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 r_p^{-2,3}} \exp \left[- \left(\frac{f - 59,7}{2,87 + 12,4 \exp(-7,9 r_p)} \right)^2 \right] \quad (25b)$$

$$t_2 = \frac{0,14 \exp(2,12 r_p)}{(f - 118,75)^2 + 0,031 \exp(2,2 r_p)} \quad (25c)$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 r_p^{-2,6}} f \frac{-0,0247 + 0,0001f + 1,61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0,0169f + 4,1 \times 10^{-5} f^2 + 3,2 \times 10^{-7} f^3} \quad (25d)$$

при ограничении, заключающемся в том, что:

$$h_o \leq 10,7 r_p^{0,3} \quad \text{для } f < 70 \text{ ГГц}, \quad (25e)$$

а для водяного пара эквивалентная высота равна:

$$h_w = 1,66 \left(1 + \frac{1,39 \sigma_w}{(f - 22,235)^2 + 2,56 \sigma_w} + \frac{3,37 \sigma_w}{(f - 183,31)^2 + 4,69 \sigma_w} + \frac{1,58 \sigma_w}{(f - 325,1)^2 + 2,89 \sigma_w} \right) \quad (26a)$$

для $f \leq 350$ ГГц

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + \exp[-8,6 (r_p - 0,57)]}. \quad (26b)$$

где:

$$r_p = (p + e)/1013,25.$$

Зенитное затухание на частотах от 50 до 70 ГГц является сложной функцией от частоты, как показано на рисунке 7, и приведенный выше алгоритм расчета с помощью эквивалентной высоты может дать лишь приближенные результаты, которые, как правило, сводятся к получению минимальных уровней

затухания, характерных для этого диапазона частот. Для более точных расчетов следует обратиться к процедуре, описанной в Приложении 1.

Концепция эквивалентной высоты основана на предположении об экспоненциальной атмосфере, которая характеризуется приведенной высотой, описывающей падение плотности с высотой. Заметим, что приведенные высоты как для сухого атмосферного воздуха, так и для водяного пара могут меняться при изменении широты, времени года и/или климата, и что распределение плотности водяного пара в реальной атмосфере может сильно отклоняться от экспоненциального профиля, что тоже ведет к соответствующим изменениям приведенных высот. Указанные выше значения применимы до высоты 10 км.

Таким образом, общее зенитное затухание равно:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{дБ.} \quad (27)$$

На рисунке 6 показано общее зенитное затухание на уровне моря (Общее), а также затухание в сухом воздухе (Сухой воздух) и водяном паре (Водяной пар), полученные для среднегодовой глобальной эталонной атмосферы, описанной в Рекомендации МСЭ-R P.835. В диапазоне частот 50–70 ГГц более высокую точность можно получить с помощью кривых для нулевого километра, приведенных на рисунке 7, которые были получены методом суммирования спектральных линий, описанным в Приложении 1.

2.2.1 Углы места между 5° и 90°

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:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{дБ,} \quad (28)$$

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:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{дБ,} \quad (29)$$

где A_w задается в п. 2.3.

2.2.1.2 Наклонные трассы

Для определения затухания на наклонных трассах между станцией, расположенной на высоте h_1 , и другой, 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 (28) должны быть заменены следующими значениями h'_o и h'_w :

$$h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{км,} \quad (30)$$

$$h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{км,} \quad (31)$$

при этом предполагается, что значение ρ плотности водяного пара, используемое в уравнении (23), – это гипотетическая величина, рассчитанная на уровне моря по следующей формуле:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2), \quad (32)$$

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 (30), (31) и (32) 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 приводятся в Рекомендации МСЭ-R P.836.

2.2.2 Углы места между 0° и 5°

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:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{дБ}, \quad (33)$$

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:

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}}, \quad (34)$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1\right), \quad (35a)$$

$$x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{для } i = 1, 2, \quad (35b)$$

$$x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{для } i = 1, 2, \quad (35c)$$

при этом предполагается, что значение ρ плотности водяного пара, используемое в уравнении (23), – это гипотетическая величина, рассчитываемая на уровне моря по следующей формуле:

$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2), \quad (36)$$

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 6

Общее 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)

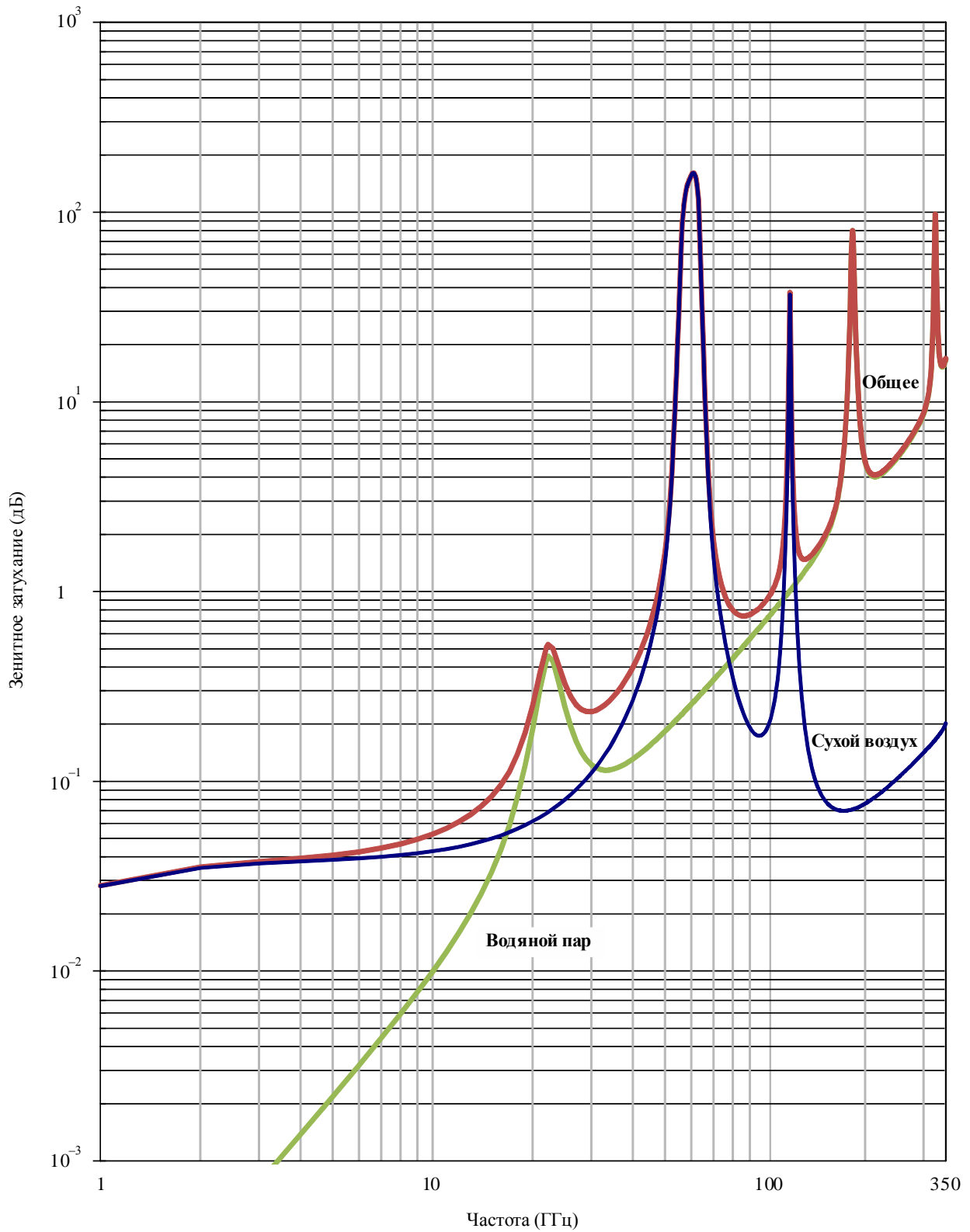
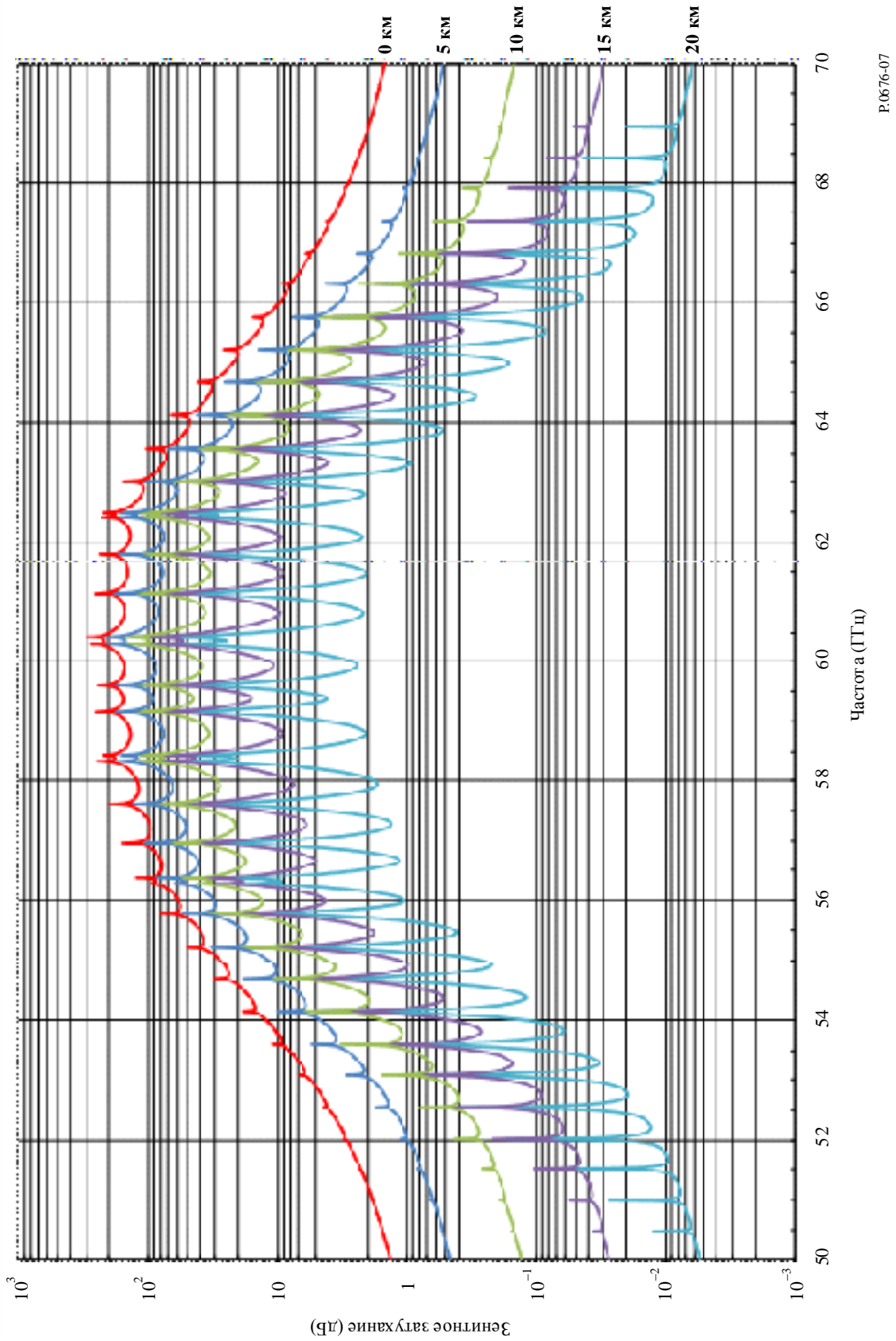


РИСУНОК 7

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 п. 2.2.2.2.

2.3 Затухание в водяном паре на наклонных трассах

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 общее зенитное затухание в водяном паре можно рассчитать следующим образом:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ ГГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц} \\ \frac{0,0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ ГГц} < f \leq 350 \text{ ГГц} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (37)$$

где:

$$\begin{aligned} a &= 0,2048 \exp \left[- \left(\frac{f - 22,43}{3,097} \right)^2 \right] + 0,2326 \exp \left[- \left(\frac{f - 183,5}{4,096} \right)^2 \right] \\ &+ 0,2073 \exp \left[- \left(\frac{f - 325}{3,651} \right)^2 \right] - 0,113 \\ b &= 8,741 \times 10^4 \exp(-0,587f) + 312,2f^{-2,38} + 0,723 \\ h &= \begin{cases} h_s & h_s \leq 4 \text{ км} \\ 4 & h_s > 4 \text{ км} \end{cases} \end{aligned}$$

и

f : частота (ГГц)

f_{ref} : 20,6 (ГГц)

p_{ref} = 815 (гПа)

$\rho_{v,ref} = \frac{V_t}{3,67}$ (г/м³)

$t_{ref} = 14 \ln \left(\frac{0,22 V_t}{3,67} \right) + 3$ (°C)

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 при помощи уравнения (23) (дБ/км);

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