

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.676-9
(02/2012)

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 1 МСЭ-R. 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	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2012 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.676-9

Затухание в атмосферных газах

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

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

Сфера применения

Рекомендация МСЭ-R P.676 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.

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 использовались процедуры, описанные в Приложении 1;
- 2 чтобы для приблизительных расчетов затухания в атмосферных газах в диапазоне частот 1–350 ГГц использовалась упрощенная процедура, представленная в Приложении 2.

Приложение 1**Расчет затухания в газах способом суммирования спектральных линий****1 Погонное затухание**

Погонное затухание в сухом воздухе и за счет паров воды для любых значений давления, температуры и влажности на частотах до 1000 ГГц наиболее точно рассчитывается методом суммирования резонансных линий кислорода и паров воды, 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 парами воды, найденное экспериментальным путем. На рисунке 1 показано погонное затухание, рассчитанное с помощью этой модели для частот от 0 до 1000 ГГц с шагом 1 ГГц, при давлении 1013 гПа, температуре 15° С, концентрации паров воды 7,5 г/м³ (кривая А) и для сухой атмосферы (кривая В).

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 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 как:

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

где γ_o и γ_w – погонные затухания (дБ/км), обусловленные сухим воздухом (кислородом, азотом при определенном давлении и нерезонансным дебаевским затуханием) и парами воды соответственно, f – частота (ГГц), а $N''(f)$ – мнимая часть частотно-зависимой комплексной рефракции:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f). \quad (2)$$

S_i – интенсивность i -й спектральной линии, F_i – коэффициент формы линии, а знак суммы распространяется на все спектральные линии (для частот f выше линии кислорода на 118,750343 ГГц, при суммировании должны учитываться только спектральные линии кислорода на частотах выше комплекса 60 ГГц); суммирование следует начинать с $i = 38$, а не с $i = 1$; $N''_D(f)$ – непрерывный спектр для сухого воздуха, обусловленный азотом при определенном давлении и дебаевским спектром.

Интенсивность линии определяется как:

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

где:

p : давление сухого воздуха (в гПа);

e : парциальное давление водяного пара в гПа (полное барометрическое давление $P = p + e$);

$\theta = 300/T$;

T : температура (К).

РИСУНОК 1

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

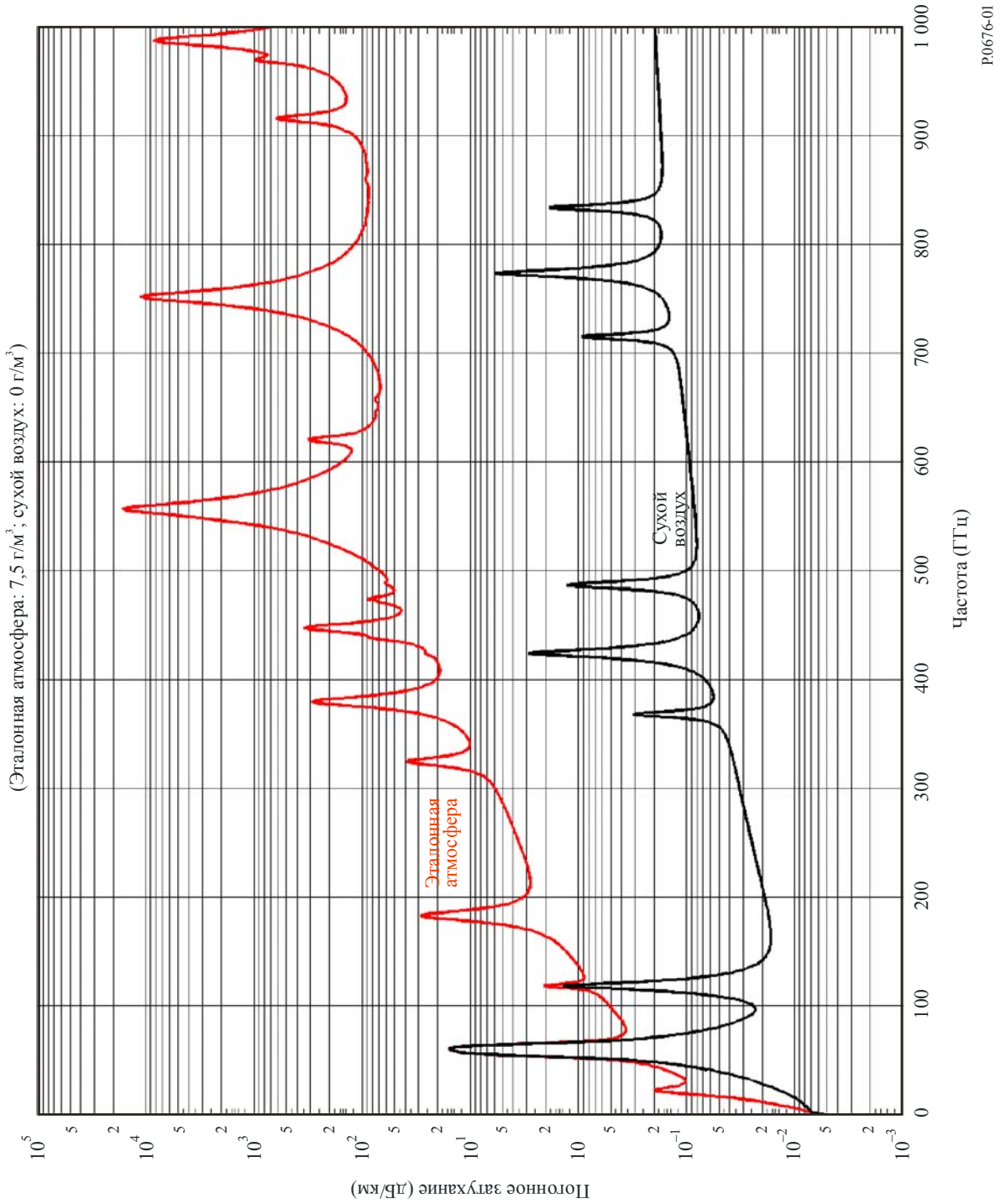
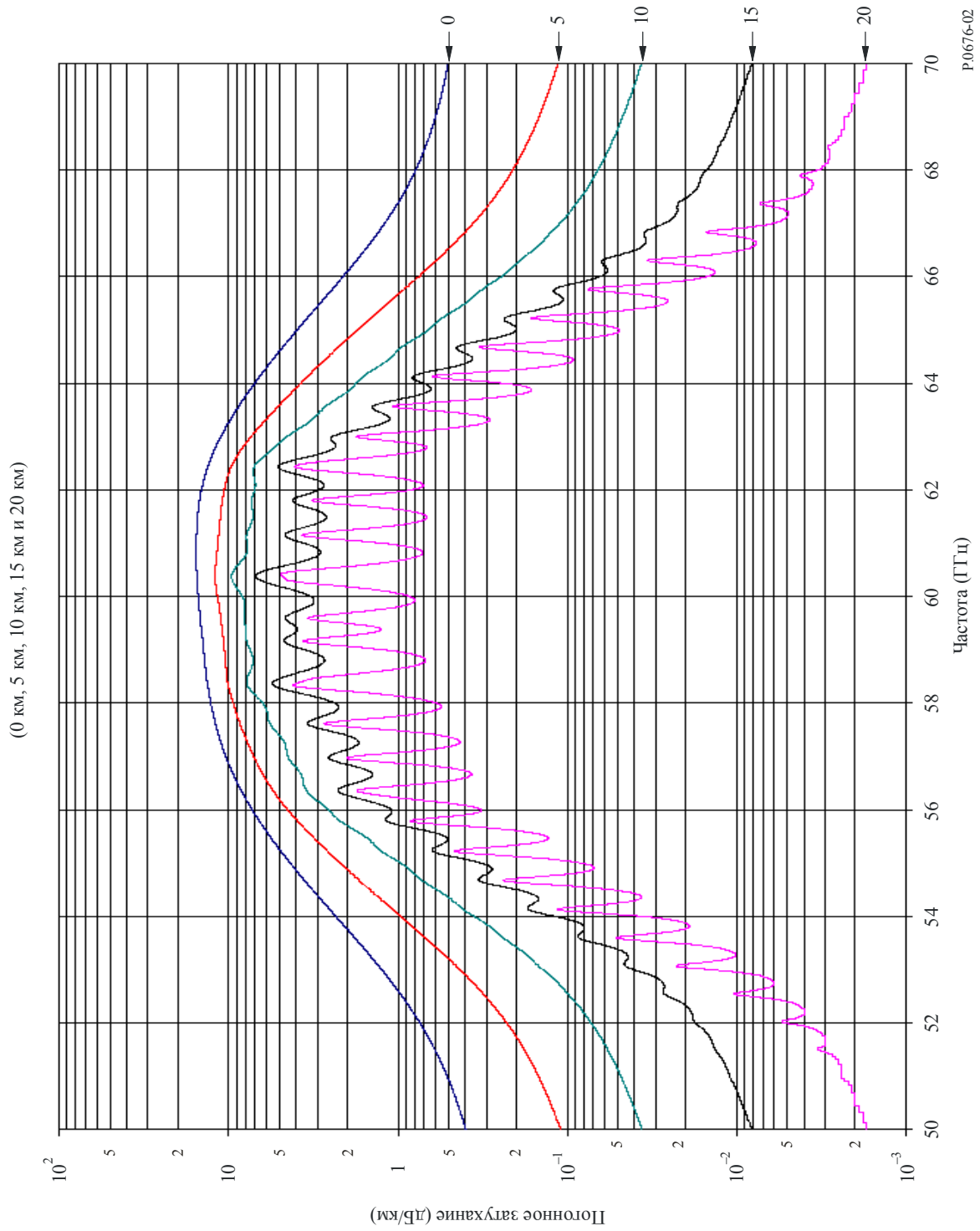


РИСУНОК 2

Погонное затухание в диапазоне 50–70 ГГц на указанных высотах



Следует использовать профили p , e и T , измеренные на месте (например, с помощью радиозондирования); однако в отсутствие таких данных можно использовать эталонную стандартную атмосферу, описанную в Рекомендации МСЭ-R P.835. (Следует отметить, что, когда вычисляется общее затухание в атмосфере, для затухания и в сухом воздухе, и в парах воды используется одно и то же парциальное давление паров воды.)

Парциальное давление паров воды, e , можно рассчитать через плотность паров воды, ρ , используя следующую формулу:

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

Коэффициенты a_1 , a_2 для кислорода приведены в таблице 1, а коэффициента b_1 и b_2 для паров воды – в таблице 2.

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, а Δf – ширина линии:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1 e \theta) && \text{для кислорода} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{для паров воды,} \end{aligned} \quad (6a)$$

Ширина спектральной линии, Δf , изменяется для учета доплеровского расширения:

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

δ – поправочный коэффициент, обусловленный интерференцией спектральных линий кислорода:

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

Спектроскопические коэффициенты приведены в таблицах 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1

Спектроскопические данные для затухания за счет кислорода

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50,474238	,94	9,694	8,90	,0	2,400	7,900
50,987749	2,46	8,694	9,10	,0	2,200	7,800
51,503350	6,08	7,744	9,40	,0	1,970	7,740
52,021410	14,14	6,844	9,70	,0	1,660	7,640
52,542394	31,02	6,004	9,90	,0	1,360	7,510
53,066907	64,10	5,224	10,20	,0	1,310	7,140
53,595749	124,70	4,484	10,50	,0	2,300	5,840
54,130000	228,00	3,814	10,70	,0	3,350	4,310
54,671159	391,80	3,194	11,00	,0	3,740	3,050
55,221367	631,60	2,624	11,30	,0	2,580	3,390
55,783802	953,50	2,119	11,70	,0	-1,660	7,050
56,264775	548,90	,015	17,30	,0	3,900	-1,130
56,363389	1344,00	1,660	12,00	,0	-2,970	7,530
56,968206	1763,00	1,260	12,40	,0	-4,160	7,420
57,612484	2141,00	,915	12,80	,0	-6,130	6,970
58,323877	2386,00	,626	13,30	,0	-2,050	,510
58,446590	1457,00	,084	15,20	,0	7,480	-1,460
59,164207	2404,00	,391	13,90	,0	-7,220	2,660
59,590983	2112,00	,212	14,30	,0	7,650	-900
60,306061	2124,00	,212	14,50	,0	-7,050	,810
60,434776	2461,00	,391	13,60	,0	6,970	-3,240
61,150560	2504,00	,626	13,10	,0	1,040	-670
61,800154	2298,00	,915	12,70	,0	5,700	-7,610
62,411215	1933,00	1,260	12,30	,0	3,600	-7,770
62,486260	1517,00	,083	15,40	,0	-4,980	,970
62,997977	1503,00	1,665	12,00	,0	2,390	-7,680
63,568518	1087,00	2,115	11,70	,0	1,080	-7,060
64,127767	733,50	2,620	11,30	,0	-3,110	-3,320
64,678903	463,50	3,195	11,00	,0	-4,210	-2,980
65,224071	274,80	3,815	10,70	,0	-3,750	-4,230
65,764772	153,00	4,485	10,50	,0	-2,670	-5,750
66,302091	80,09	5,225	10,20	,0	-1,680	-7,000
66,836830	39,46	6,005	9,90	,0	-1,690	-7,350
67,369598	18,32	6,845	9,70	,0	-2,000	-7,440
67,900867	8,01	7,745	9,40	,0	-2,280	-7,530
68,431005	3,30	8,695	9,20	,0	-2,400	-7,600
68,960311	1,28	9,695	9,00	,0	-2,500	-7,650
118,750343	945,00	,009	16,30	,0	-,360	,090
368,498350	67,90	,049	19,20	,6	,000	,000
424,763124	638,00	,044	19,30	,6	,000	,000
487,249370	235,00	,049	19,20	,6	,000	,000
715,393150	99,60	,145	18,10	,6	,000	,000
773,839675	671,00	,130	18,20	,6	,000	,000
834,145330	180,00	,147	18,10	,6	,000	,000

ТАБЛИЦА 2

Спектроскопические данные для затухания за счет водяных паров

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22,235080	0,1130	2,143	28,11	,69	4,800	1,00
67,803960	0,0012	8,735	28,58	,69	4,930	,82
119,995940	0,0008	8,356	29,48	,70	4,780	,79
183,310091	2,4200	,668	30,50	,64	5,300	,85
321,225644	0,0483	6,181	23,03	,67	4,690	,54
325,152919	1,4990	1,540	27,83	,68	4,850	,74
336,222601	0,0011	9,829	26,93	,69	4,740	,61
380,197372	11,5200	1,048	28,73	,54	5,380	,89
390,134508	0,0046	7,350	21,52	,63	4,810	,55
437,346667	0,0650	5,050	18,45	,60	4,230	,48
439,150812	0,9218	3,596	21,00	,63	4,290	,52
443,018295	0,1976	5,050	18,60	,60	4,230	,50
448,001075	10,3200	1,405	26,32	,66	4,840	,67
470,888947	0,3297	3,599	21,52	,66	4,570	,65
474,689127	1,2620	2,381	23,55	,65	4,650	,64
488,491133	0,2520	2,853	26,02	,69	5,040	,72
503,568532	0,0390	6,733	16,12	,61	3,980	,43
504,482692	0,0130	6,733	16,12	,61	4,010	,45
547,676440	9,7010	,114	26,00	,70	4,500	1,00
552,020960	14,7700	,114	26,00	,70	4,500	1,00
556,936002	487,4000	,159	32,10	,69	4,110	1,00
620,700807	5,0120	2,200	24,38	,71	4,680	,68
645,866155	0,0713	8,580	18,00	,60	4,000	,50
658,005280	0,3022	7,820	32,10	,69	4,140	1,00
752,033227	239,6000	,396	30,60	,68	4,090	,84
841,053973	0,0140	8,180	15,90	,33	5,760	,45
859,962313	0,1472	7,989	30,60	,68	4,090	,84
899,306675	0,0605	7,917	29,85	,68	4,530	,90
902,616173	0,0426	8,432	28,65	,70	5,100	,95
906,207325	0,1876	5,111	24,08	,70	4,700	,53
916,171582	8,3400	1,442	26,70	,70	4,780	,78
923,118427	0,0869	10,220	29,00	,70	5,000	,80
970,315022	8,9720	1,920	25,50	,64	4,940	,67
987,926764	132,1000	,258	29,85	,68	4,550	,90
1 780,000000	22 300,0000	,952	176,20	,50	30,500	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 , можно записать 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 приводится 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 эталонную стандартную атмосферу, описанную 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, описанной в Рекомендации МСЭ-R P.835, при толщине горизонтальных слоев 1 км и суммирования затуханий для каждого слоя в случае влажной атмосферы (кривая А) и сухого воздуха (кривая В).

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 по данным о давлении, температуре и давлении водяных паров вдоль трассы (см. Рекомендацию МСЭ-R P.835) с помощью метода, описанного в Рекомендации МСЭ-R P.453.

С другой стороны, 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 значение $h_{min} = h$:

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

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 иметь в виду, 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 над сферической Землей.

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 вхождения и выхода луча соответственно. r_n – радиусы 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 θ). β_{n+1} можно рассчитать по значениям угла α_n , используя закон Снеллиуса, который в этом случае приобретает вид:

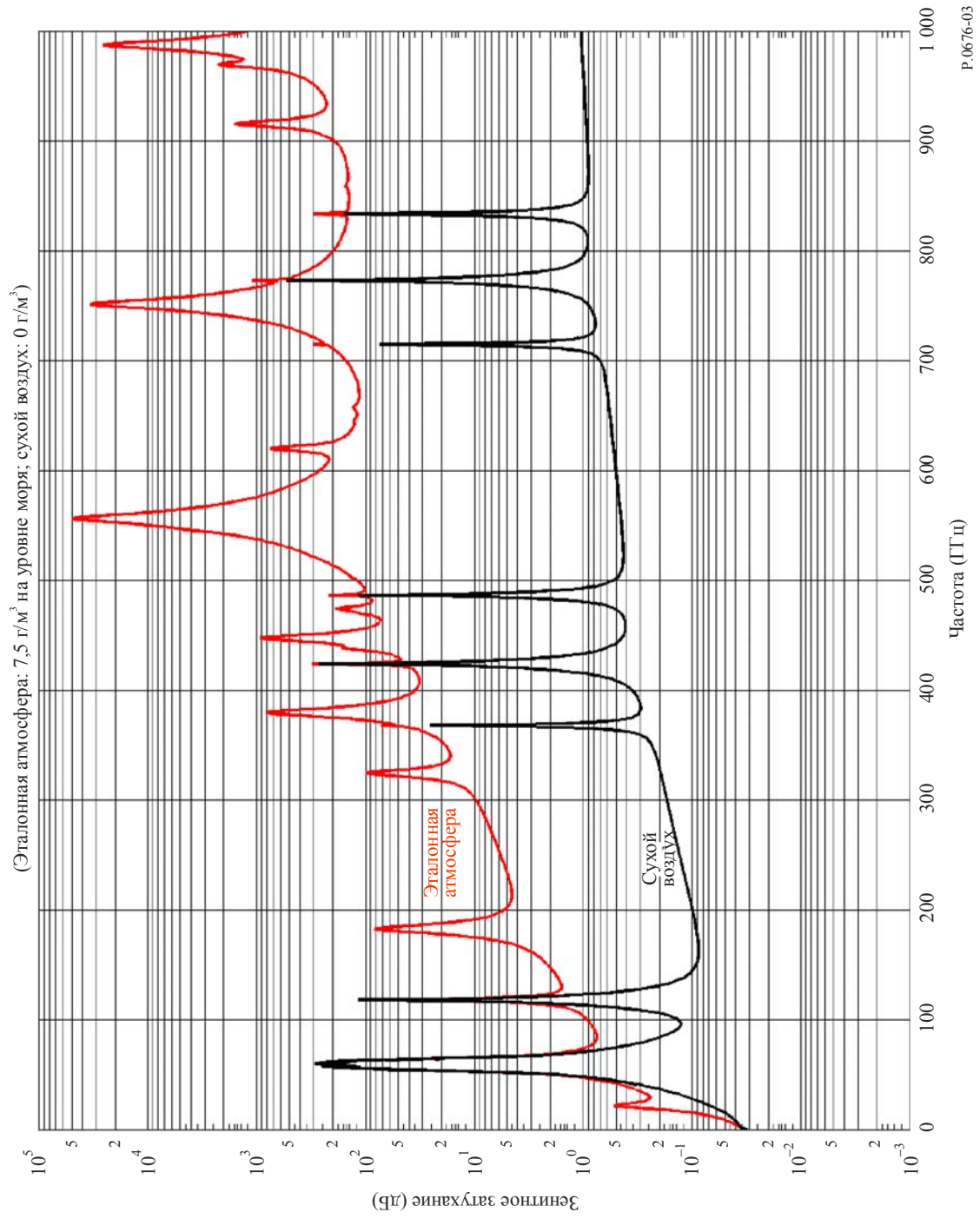
$$\beta_{n+1} = \arcsin\left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n\right), \quad (19)$$

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)), основанный 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, описанные 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



Оставшийся, зависящий от частоты член (описывающий процесс рассеяния), оказывает на результат маргинальное влияние (около 1%), но его можно рассчитать с помощью метода, описанного в Справочнике МСЭ-R по радиометеорологии.

Общее затухание 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, полученное из уравнения (1).

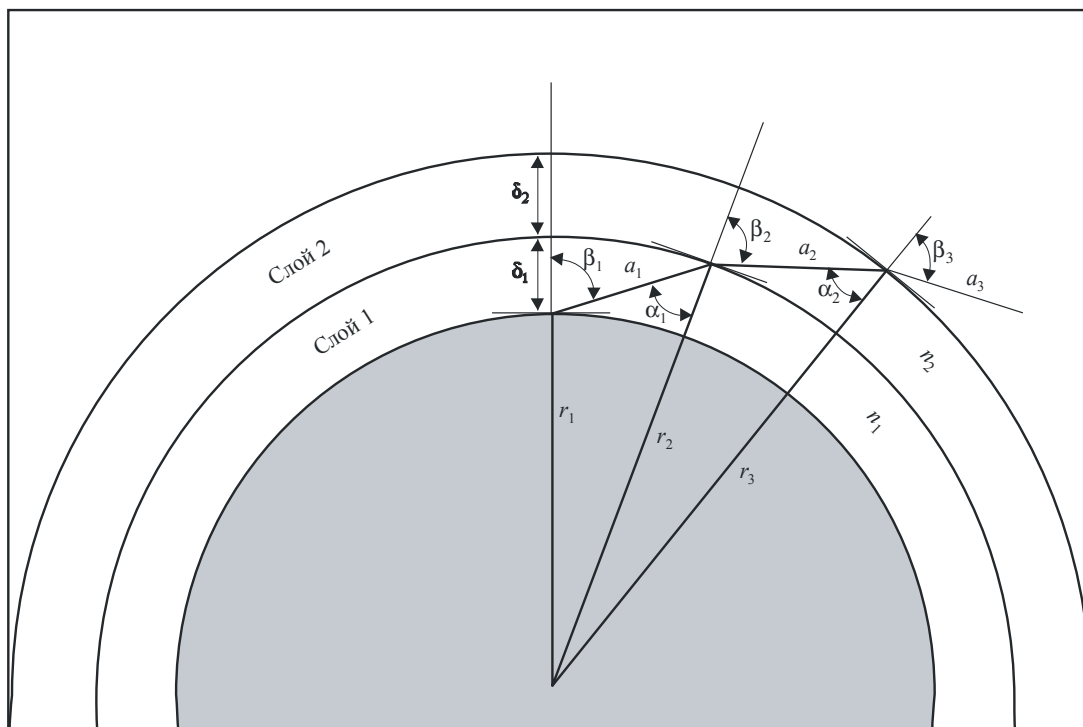
Для того чтобы обеспечить необходимую точность расчета затухания, толщина слоев должна экспоненциально возрастать с высотой, начиная от 10 см для нижнего слоя (уровень земли) и заканчивая 1 км на высоте 100 км в соответствии со следующим уравнением:

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

где i изменяется от 1 до 922 и $\delta_{922} \cong 1,0$ 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



3 Дисперсионные эффекты

Дисперсионные эффекты описаны в Справочнике МСЭ-R по радиометеорологии, где приводится модель расчета дисперсии, основанная на суммировании 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 окажутся смещенными в область 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 быстрого приблизительного расчета затухания в атмосферных газах для ограниченного диапазона метеорологических условий и геометрических конфигураций.

1 Погонное затухание

Погонное затухание за счет сухого воздуха и паров воды от уровня моря до высоты 10 км можно определить, используя следующие упрощенные алгоритмы, которые основаны на подборе эмпирического уравнения, описывающего модель расчета методом суммирования спектральных линий, и согласования с более точными результатами в пределах средней погрешности $\pm 10\%$ на частотах, удаленных от центров основных линий поглощения. Абсолютное значение разности между результатами расчетов, полученными с помощью этих алгоритмов и методом суммирования спектральных линий, как правило, оказывается меньше 0,1 дБ/км и достигает своего максимального значения порядка 0,7 дБ/км на частоте около 60 ГГц. Выше 10 км и в тех случаях, когда требуется высокая точность, следует использовать метод расчета, основанный на суммировании спектральных линий.

Затухание γ_o (дБ/км) в сухом воздухе определяется как:

для $f \leq 54$ ГГц:

$$\gamma_o = \left[\frac{7,2 r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62 \xi_3}{(54 - f)^{1,16 \xi_1} + 0,83 \xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22a)$$

для $54 \text{ ГГц} < f \leq 60 \text{ ГГц}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f - 58)(f - 60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f - 54)(f - 60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f - 54)(f - 58) \right] \quad (22b)$$

для $60 \text{ ГГц} < f \leq 62 \text{ ГГц}$:

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f - 60}{2} \quad (22c)$$

для $62 \text{ ГГц} < f \leq 66 \text{ ГГц}$:

$$\gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f - 64)(f - 66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f - 62)(f - 66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f - 62)(f - 64) \right] \quad (22d)$$

для $66 \text{ ГГц} < f \leq 120 \text{ ГГц}$:

$$\gamma_o = \left\{ 3,02 \times 10^{-4} r_t^{3,5} + \frac{0,283 r_t^{3,8}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,502 \xi_6 [1 - 0,0163 \xi_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1,4346 \xi_4} + 1,15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (22e)$$

для $120 \text{ ГГц} < f \leq 350 \text{ ГГц}$:

$$\gamma_o = \left[\frac{3,02 \times 10^{-4}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} + \frac{0,283 r_t^{0,3}}{(f - 118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3,5} \times 10^{-3} + \delta \quad (22f)$$

при:

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t; 0,0717; -1,8132; 0,0156; -1,6515) \quad (22g)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t; 0,5146; -4,6368; -0,1921; -5,7416) \quad (22h)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t; 0,3414; -6,5851; 0,2130; -8,5854) \quad (22i)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p, r_t; -0,0112; 0,0092; -0,1033; -0,0009) \quad (22j)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p, r_t; 0,2705; -2,7192; -0,3016; -4,1033) \quad (22k)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p, r_t; 0,2445; -5,9191; 0,0422; -8,0719) \quad (22l)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p, r_t; -0,1833; 6,5589; -0,2402; 6,131) \quad (22m)$$

$$\gamma_{54} = 2,192 \varphi(r_p, r_t; 1,8286; -1,9487; 0,4051; -2,8509) \quad (22n)$$

$$\gamma_{58} = 12,59 \varphi(r_p, r_t; 1,0045; 3,5610; 0,1588; 1,2834) \quad (22o)$$

$$\gamma_{60} = 15,0 \varphi(r_p, r_t; 0,9003; 4,1335; 0,0427; 1,6088) \quad (22p)$$

$$\gamma_{62} = 14,28 \varphi(r_p, r_t; 0,9886; 3,4176; 0,1827; 1,3429) \quad (22q)$$

$$\gamma_{64} = 6,819 \varphi(r_p, r_t; 1,4320; 0,6258; 0,3177; -0,5914) \quad (22r)$$

$$\gamma_{66} = 1,908 \varphi(r_p, r_t; 2,0717; -4,1404; 0,4910; -4,8718) \quad (22s)$$

$$\delta = -0,00306 \varphi(r_p, r_t; 3,211; -14,94; 1,583; -16,37) \quad (22t)$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)], \quad (22u)$$

где:

- f : частота (ГГц);
 $r_p = p / 1013$, где p_{tot} представляет общее давление воздуха;
 $r = 288 / (273 + t)$;
 p : давление (гПа);
 t : температура (°C), причем если необходимые данные о температуре недоступны, то средние значения температуры можно взять из карт, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.1510.

Для паров воды погонное затухание γ_w (дБ/км) определяется как:

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11,96\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,14\eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0,081\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} \\ & + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4\eta_1 \exp[1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & \left. + \frac{8,3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2,5} \rho \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (23a)$$

при:

$$\eta_1 = 0,955 r_p r_t^{0,68} + 0,006 \rho \quad (23b)$$

$$\eta_2 = 0,735 r_p r_t^{0,5} + 0,0353 r_t^4 \rho \quad (23c)$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2, \quad (23d)$$

где ρ – плотность паров воды (г/м³).

На рисунке 5 приведены кривые погонного затухания в сухом воздухе и в парах воды на частотах от 1 до 350 ГГц на уровне моря при плотности паров воды 7,5 г/м³.

2 Затухание на трассе

2.1 Наземные трассы

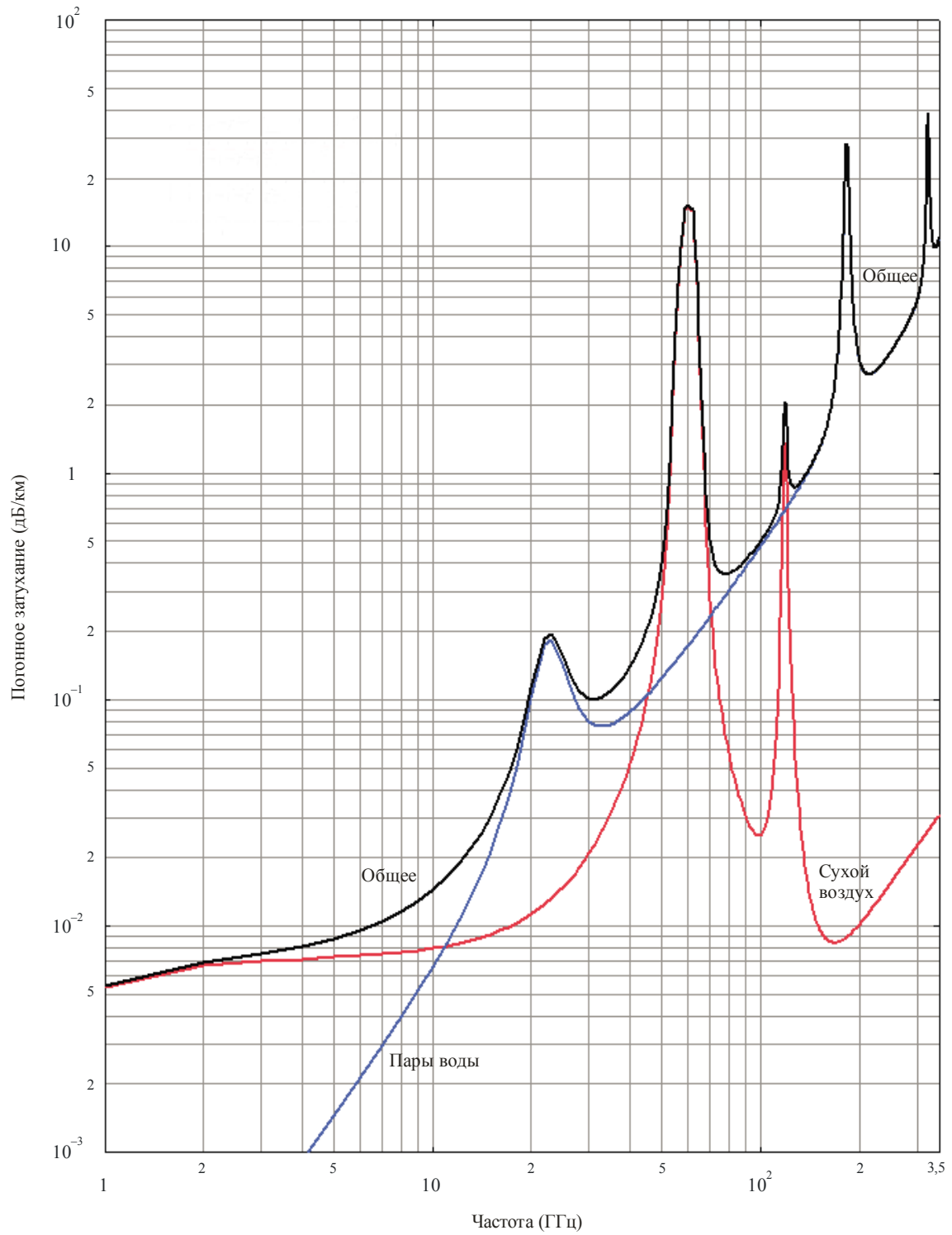
Для горизонтальной трассы или для слегка наклонных трасс, проходящих вблизи Земли, затухание на трассе, A , можно записать как:

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

где r_0 – длина трассы (км).

РИСУНОК 5

Погонное затухание за счет атмосферных газов



Давление: 1 013 гПа
Температура: 15°C
Концентрация паров воды: 7,5 г/м³

2.2 Наклонные трассы

В этом пункте приводятся простые 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 п. 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 паров воды, если использовать значения давления, температуры и плотности паров воды, 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 в состоянии воспроизвести структуру, показанную 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; поэтому 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 как:

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

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:

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

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

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

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 паров воды могут меняться при изменении широты, времени года и/или климата, и что распределение плотности паров воды в реальной атмосфере может сильно отклоняться от такового в экспоненциальной атмосфере, 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, а также затухание в сухом воздухе и парах воды, 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:

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

где $A_w(P)$ 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 паров воды, 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 водяных паров 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 гПа), то плотность водяных паров не только

сильно зависит от климатических условий, но и измеряется у поверхности (то есть на высоте земной станции). Значения плотности водяных паров 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. Это же Приложение следует применять и 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:

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

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

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

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

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

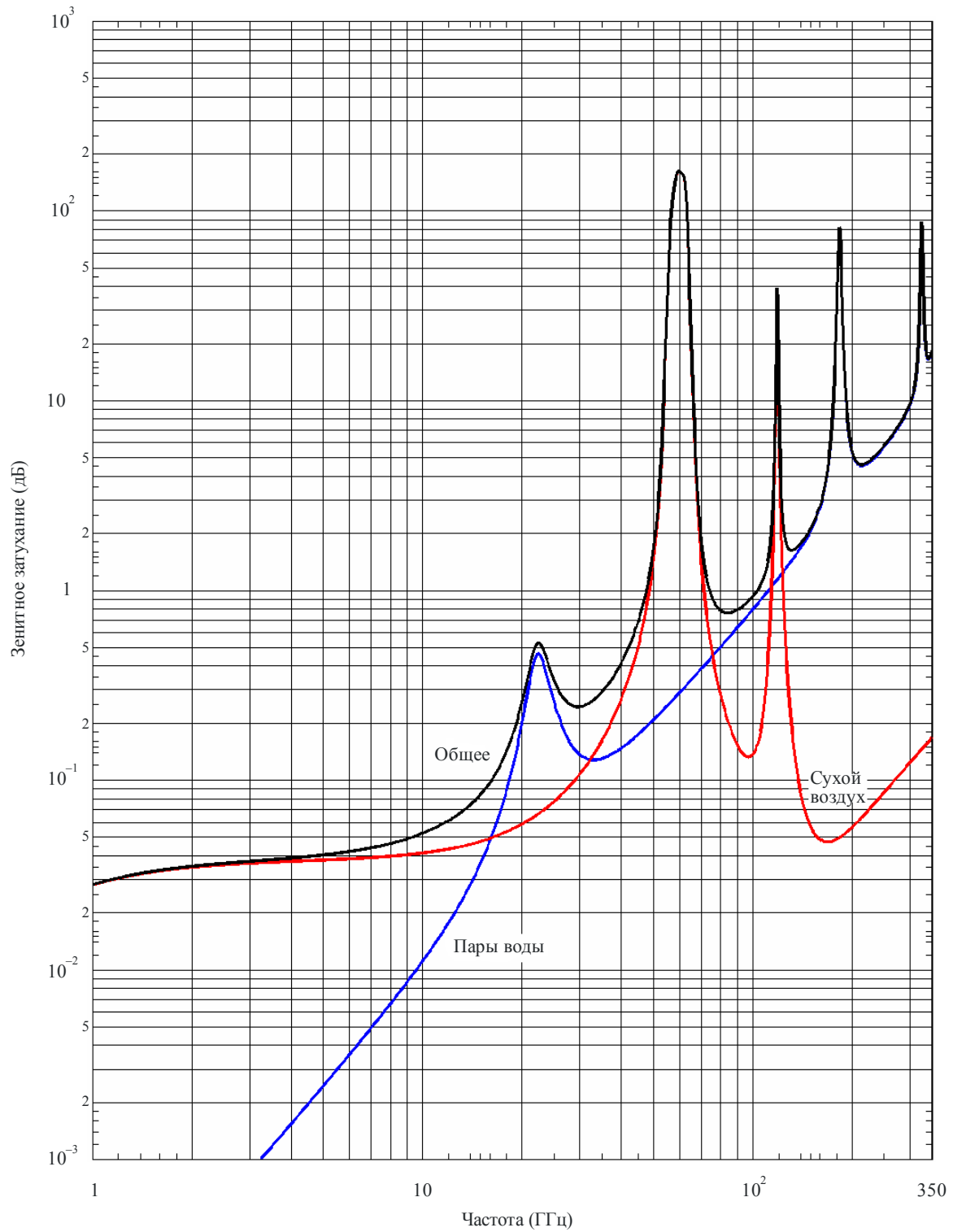
$$\rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2), \quad (36)$$

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

Значения ρ_1 у поверхности Земли можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.836. Использование различных формул для затухания в сухом воздухе и в водяных парах поясняется в конце п. 2.2.

РИСУНОК 6

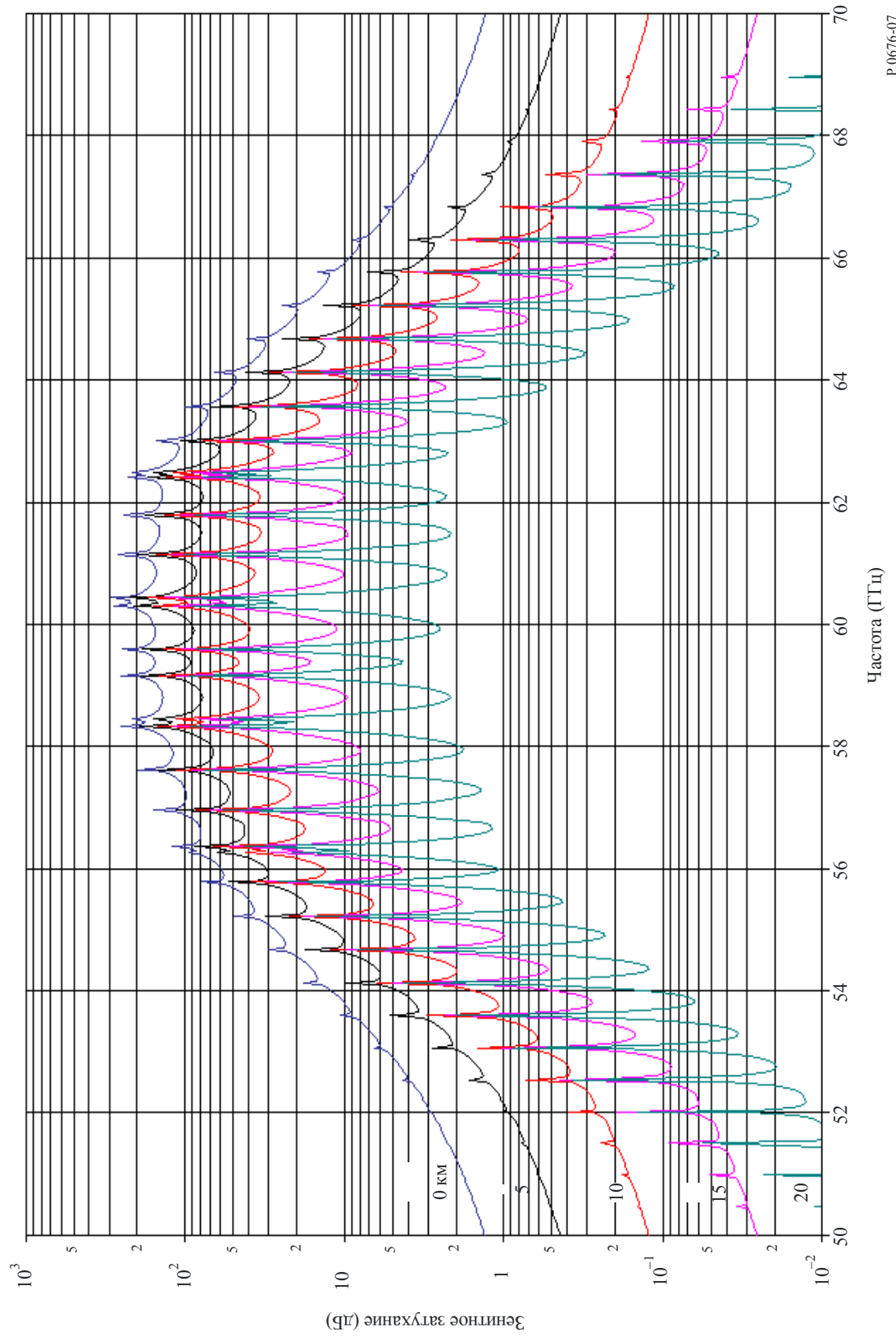
Общее зенитное затухание, затухание в сухом воздухе и парах воды на уровне моря



Давление у поверхности: 1 013 гПа
 Температура у поверхности: 15° С
 Влажность у поверхности: 7,5 г/м³

РИСУНОК 7

Зенитное затухание в кислороде для указанных высот, рассчитанное с шагом 50 МГц, включая центры линий поглощений (0 км, 5 км, 10 км, 15 км и 20 км)



2.3 Ослабление за счет паров воды на наклонных трассах

Описанный выше метод расчета затухания за счет паров воды на наклонных трассах предполагает знание профиля давления паров воды (или плотности) вдоль трассы. В тех случаях, когда известно общее объемное содержание паров воды, V_t , вдоль трассы, можно использовать другой метод. Общее зенитное затухание за счет паров воды можно выразить как:

$$A_w(P) = \frac{0,0173 V_t(P) \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \quad \text{дБ}, \quad (37)$$

где:

f : частота (ГГц);

f_{ref} : 20,6 (ГГц);

p_{ref} = 780 (гПа);

$\rho_{v,ref}$ = $\frac{V_t(P)}{4}$ (г/м³);

t_{ref} = $14 \ln \left(\frac{0,22 V_t(P)}{4} \right) + 3$ (°C);

$V_t(P)$: суммарное содержание водяных паров для требуемого процента времени (кг/м² или мм), которое можно получить либо из радиометрических измерений профилей с помощью радиозондов, либо из Рекомендации МСЭ-R P.836 (кг/м² или мм);

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$: погонное затухание в функции частоты, давления, плотности водяного пара и температуры, вычисленное исходя из уравнения (23а) (дБ/км).