

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ТРОПОСФЕРЫ

Тема 3

Строение и основные параметры тропосферы

Тропосферой называют нижнюю часть атмосферы, расположенную непосредственно над поверхностью Земли и простирающуюся

- * до высоты 8—10 км — в полярных широтах,
- * до 10—12 км — в умеренных широтах,
- * до 16—18 км — в тропиках.

Строение и основные параметры тропосферы

- * По всей своей высоте тропосфера имеет постоянный относительный состав входящих в нее газов, такой же, как у поверхности Земли.
- * Исключение составляет содержание водяных паров, которое сильно зависит от метеорологических условий и резко уменьшается с высотой.

Строение и основные параметры тропосферы

- * Важнейшим свойством тропосферы является *убывание температуры с высотой*.
- * Средний вертикальный градиент температуры тропосферы составляет *-6 град/км*
(в нижней половине тропосферы около *-5 град/км*, в верхней *-7 град /км*).

Строение и основные параметры тропосферы

- * Среднегодовая температура воздуха на верхней границе тропосферы в полярных областях составляет -55° и в районе тропиков -80° .
- * Верхняя граница тропосферы определяется по прекращению падения температуры с высотой.

Строение и основные параметры тропосферы

- * Несмотря на малую высоту тропосферы, в ней сосредоточено более $4/5$ всей массы воздуха.
- * Среднее давление атмосферы у поверхности Земли достигает 1014 мбар,
- * на высоте 5 км составляет 538 мбар,
- * на высоте 11 км падает до 225 мбар,
- * на высоте 17 км (верхняя граница тропосферы в тропиках) давление атмосферы составляет 90 мбар.

Строение и основные параметры тропосферы

- * Содержащиеся в тропосфере водяные пары создаются благодаря испарению влаги с поверхности океанов, морей и водоемов.
- * Содержание водяного пара быстро уменьшается с высотой.

На высоте 1,5 км количество водяного пара в воздухе почти вдвое, а у верхней границы тропосферы — в сотни раз меньше, чем у поверхности Земли.

Строение и основные параметры тропосферы

Основными параметрами, характеризующими свойства тропосферы, являются:

- * давление p (мбар),
- * абсолютная температура T (К)
- * абсолютная влажность ϕ (мбар)

Строение и основные параметры тропосферы

Иногда влажность воздуха характеризуют так называемой удельной влажностью ϕ (выражаемой в граммах воды на килограмм воздуха) или относительной влажностью S , выраженной в процентах.

Строение и основные параметры тропосферы

Абсолютная влажность e связана с величинами φ и S соотношениями

$$e = \frac{\varphi_{[\text{г/кг}]} p_{[\text{мбар}]}}{623 - 0,377 \varphi_{[\text{г/кг}]}} , \text{ мбар};$$
$$e = \frac{E_S_{[\text{мбар}]} S}{100} , \text{ мбар}$$

E_S — определяемое по таблицам давление водяных паров, насыщающих пространство при заданной температуре.

Нормальная тропосфера

Это гипотетическая тропосфера, свойства которой отображают среднее состояние окружающей земной шар реальной тропосферы.

Нормальной тропосфере приписываются следующие свойства:

- * у поверхности Земли давление $p = 1013$ мбар,
- * температура $t = 15^\circ\text{C}$,
- * относительная влажность $S = 60\%$.

Нормальная тропосфера

- * С увеличением высоты на каждые 100 м давление уменьшается на 12 мбар, а температура — на $0,55^{\circ}$.
- * Относительная влажность сохраняет свое значение на всех высотах. Высота нормальной тропосферы простирается до 11 км.

Коэффициент преломления тропосферы

- * Тропосферу, с точки зрения ее коэффициента преломления, можно рассматривать как смесь двух газов — сухого воздуха и водяных паров.
- * Значения коэффициента преломления определяют по парциальным давлениям сухого воздуха p_c и водяных паров e .

Коэффициент преломления тропосферы

* Считается более удобным вместо коэффициента преломления n пользоваться так называемым индексом преломления N , связанным с n соотношением

$$* N = (n - 1) \cdot 10^6.$$

его численные значения называют N -единицами.

* У поверхности Земли $N_0 = (240 - 460)$ N -единиц.

Коэффициент преломления тропосферы

- * В диапазоне КВЧ сказываются потери (например, в парах воды), диэлектрическая проницаемость становится комплексной, а n зависит от частоты.

Коэффициент преломления тропосферы

- * В условиях нормальной тропосферы индекс преломления N у поверхности Земли равен 325. Вследствие монотонного убывания с высотой давления и влажности N стремится к нулю:

- *
$$N = 77,6 \frac{p}{T} - 12,96 \frac{e}{T} + \frac{3,72 \cdot 10^5}{T^2} e;$$

- * для волн длиннее 0,1 мм:
$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right);$$

Коэффициент преломления тропосферы

* для волн оптического диапазона:

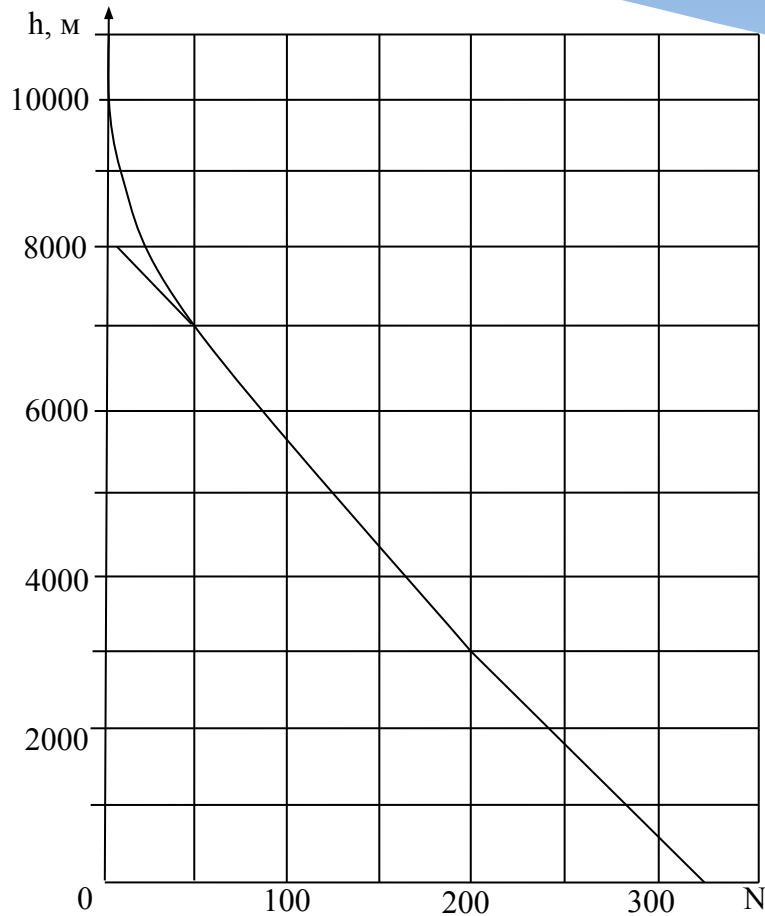
$$N \approx \frac{77,6}{T} (p - 0,167e),$$

т. к. проявляются инерционные свойства молекул воды, которые на столь высоких частотах не успевают менять ориентировку и поэтому перестают вносить вклад в значение индекса преломления.

Коэффициент преломления тропосферы

- * Термодинамическое рассмотрение процессов, происходящих в тропосфере, показывает, что в хорошо перемешанном воздухе при адиабатическом изменении температуры с высотой (т.е. по такому закону уменьшается температура восходящего потока воздуха при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Температура падает вследствие перехода воздушных масс в область пониженного давления и уменьшения внутренней энергии) градиент индекса преломления имеет в пределах тропосферы постоянное значение $dN/dh = - 4,45 \cdot 10^{-2}, 1/\text{м}$

Идеализированная зависимость индекса преломления от высоты



Из рассмотрения профиля следует, что если бы градиент N сохранял постоянное значение по всей толще атмосферы, то на высоте 8 км индекс преломления обратился бы в ноль.

Коэффициент преломления тропосферы

В реальных условиях могут наблюдаться значительные отклонения от идеализированной формы профиля, т.к. тропосфера испытывает существенное влияние погодных условий. На медленные изменения профиля (перемена погоды) накладываются более быстрые изменения (т.н. пульсации), связанные с локальными изменениями индекса преломления в тропосфере (в итоге профиль как бы изрезан зубчиками, наложенными на основную линейную зависимость).

Вывод: тропосферу можно рассматривать как среду, параметры которой непрерывно изменяются и подвержены флуктуациям.

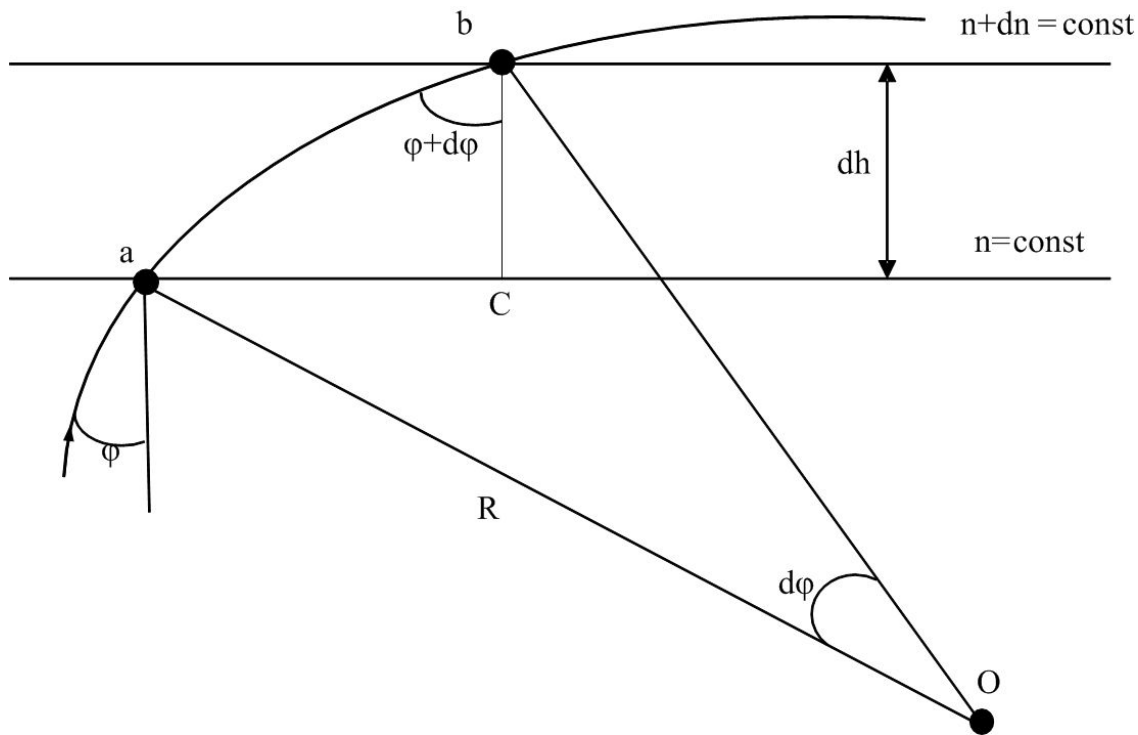
Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн

*** ЯВЛЕНИЕ ТРОПОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ**

Явление тропосферной рефракции

- * Тропосферная рефракция – это явление, обусловленное тем, что вследствие неоднородности тропосферы радиоволны распространяются в тропосфере не по прямолинейным траекториям (как в однородной среде), а по несколько искривлённым.

Явление тропосферной рефракции



Для простоты пренебрежем влиянием кривизны Земли и будем считать, что поверхности одинаковых значений коэффициента преломления — плоскости, параллельные плоской поверхности Земли

Явление тропосферной рефракции

- * Искомый радиус кривизны определяется соотношением: $R = ab/d\varphi$
- * Из треугольника abc находим:

$$ab = \frac{dh}{\cos(\varphi + d\varphi)} = \frac{dh}{\cos \varphi}, \text{ м} \Rightarrow$$
$$R = \frac{dh}{\cos \varphi d\varphi}, \text{ м.}$$

Явление тропосферной рефракции

* с учётом закона преломления
($n \sin \varphi = (n + dn) \sin(\varphi + d\varphi) \Rightarrow$
 $\cos \varphi d\varphi = -\sin \varphi dn/n$) имеем:

$$R = \frac{n}{\sin \varphi \left(-\frac{dn}{dh}\right)}, \text{ м} \Rightarrow R = \frac{1}{\left(-\frac{dn}{dh}\right)} = \frac{10^6}{\left(-\frac{dN}{dh}\right)}, \text{ м}$$

* Упрощение сделано исходя из условий, что $n \approx 1$ и что при распространении основной интерес представляют пологие лучи ($\sin \varphi \approx 1$).

Явление тропосферной рефракции

$$R = \frac{1}{\left(-\frac{dn}{dh}\right)} = \frac{10^6}{\left(-\frac{dN}{dh}\right)}, \text{ м}$$

- * Это выражение показывает, что радиус кривизны луча определяется не абсолютным значением коэффициента преломления, а скоростью его изменения с высотой;
- * траектория будет выпуклой вверх только в случае, если n уменьшается с высотой.

Явление тропосферной рефракции

- * При распространении в нормальной тропосфере ($dN/dh=const$ во всей толще тропосферы)

$$R=10^6/4\cdot 10^{-2}=25000 \text{ км}$$

- * УКВ радиоволны ($<3\cdot 10^{11}$ Гц) испытывают в атмосфере несколько большее преломление, чем радиоволны оптического диапазона ($4\cdot 10^{14}$ - $7,5\cdot 10^{14}$ Гц), в силу инерционных свойств молекул воды, которые своими перемещениями вносят вклад в значение коэффициента преломления;
- * для радиоволн оптического диапазона и световых волн $R\approx 50000$ км.

Нормальная рефракция

- * Тропосферная рефракция, имеющая место в нормальной тропосфере, получила название нормальной рефракции.

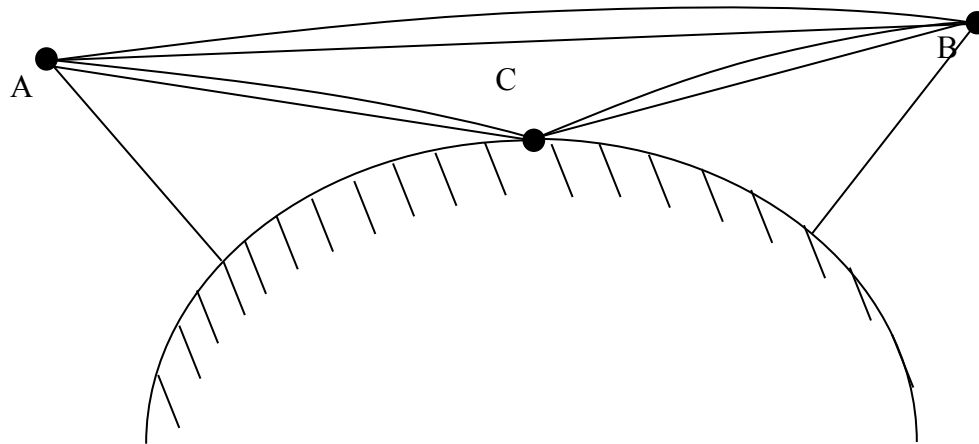
Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * **Понятие об эквивалентном радиусе земного шара**

Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * При поднятых приёмной и передающей антеннах интерференционные формулы применимы только в диапазоне УКВ; вывод этих формул основывался на предположении, что прямой и отражённый от поверхности Земли лучи распространяются по прямолинейным траекториям с постоянной скоростью.
- * В реальных условиях ни одно из этих предположений не действует

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара



Траектории прямой и отраженной от Земли радиоволн в реальной атмосфере

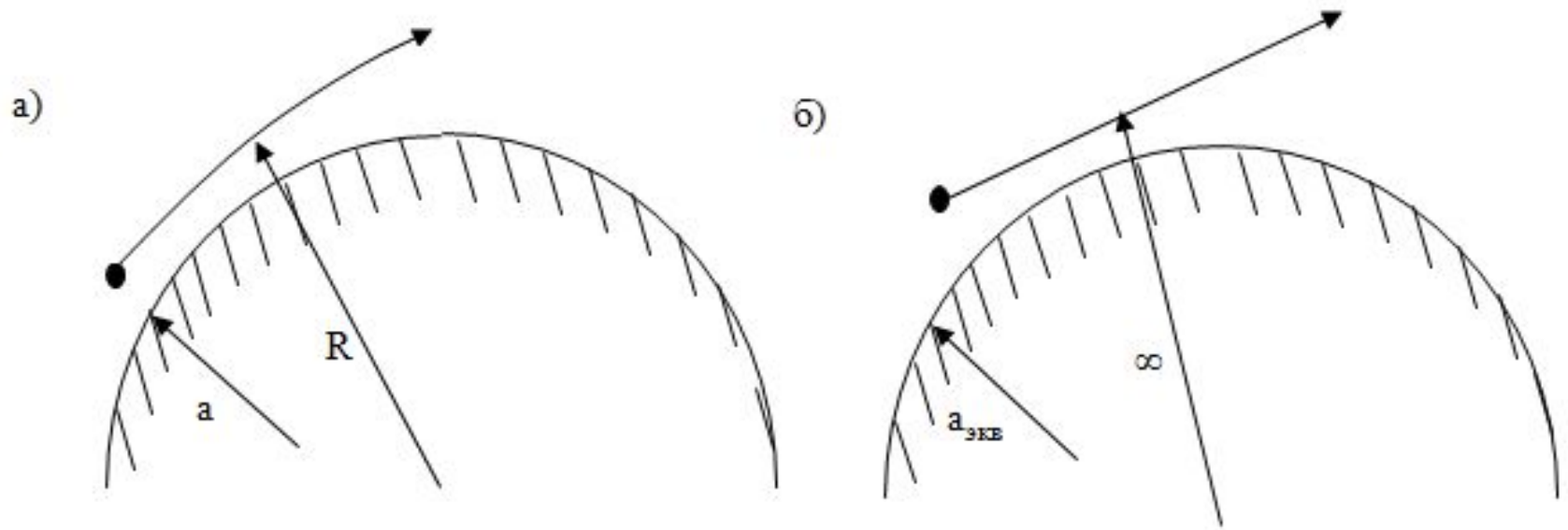
Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

Факт непрямолинейности траектории влечёт за собой изменение множителя ослабления, а более низкая скорость распространения волн в нижних слоях атмосферы (n выше) по сравнению с верхними слоями означает, что на множитель ослабления влияет уже «оптическая разность хода лучей», которая, помимо геометрической разности хода, учитывает различие в скоростях распространения.

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

Известен упрощённый способ учёта влияния атмосферной рефракции, основанный на предположении о том, что радиоволны по-прежнему распространяются по прямолинейным траекториям с постоянной скоростью, но уже не над реальной поверхностью Земли радиуса a , а над воображаемой поверхностью с эквивалентным радиусом $a_{\text{э}}$. Эквивалентный радиус определяется из условия сохранения относительной кривизны между лучом и поверхностью Земли в реальных условиях и эквивалентной схеме

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара



Траектории радиоволны:

а) реальная,

б) прямолинейная при распространении волны над Землёй с эквивалентным радиусом.

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{R} = \frac{1}{a_3} - \frac{1}{\infty} \Rightarrow a_3 = \frac{a}{1 - a/R} = \frac{a}{1 + a \frac{dN}{dh} 10^{-6}}, \text{ м}$$

Обозначим через k отношение эквивалентного радиуса Земли к действительному:

$$k = \frac{a_3}{a} = \frac{1}{1 + a \frac{dN}{dh} 10^{-6}}$$

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

Зная значение $\frac{dN}{dh} = -4 \cdot 10^{-2} \text{ 1/м}$ для нормальной тропосферной рефракции и действительный радиус Земли $a = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$, находим:

$$a_э \approx 8500 \text{ км}; k = 4/3.$$

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

Представление об эквивалентном радиусе позволяет распространить полученные ранее интерференционные формулы на неоднородную атмосферу путём замены a на a_z , причём это возможно для всех видов рефракции.

Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

- * Формула для дальности прямой видимости (по отношению к исходной формуле изменяется коэффициент):
- * $r_0 = \sqrt{2ak}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})[\text{М}] = 4,12(\sqrt{h_{1[\text{М}]}} + \sqrt{h_{2[\text{М}]}})[\text{КМ}]$
- * для оптического диапазона:
 $r_0 = 3,83(\sqrt{h_{1[\text{М}]}} + \sqrt{h_{2[\text{М}]}})[\text{КМ}]$

Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * При использовании интерференционными формулами, в которые радиус Земли явно не входит, влияние рефракции учитывается одновременно с учётом сферичности Земли. Приведённые высоты определяются по формулам:

$$* \begin{cases} h'_1 = h_{1[M]} - \frac{r_{1[км]}^2}{k \cdot 12,8}, \text{ М} \\ h'_2 = h_{2[M]} - \frac{r_{2[км]}^2}{k \cdot 12,8}, \text{ М} \end{cases} \quad (4)$$

Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * Формулы для расчета значений n_1 и n_2 представлены в учебнике Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Издание 4-е Издательство "Связь", Москва, 1972

Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * При дифракционном распространении радиоволн влияние тропосферной рефракции можно учесть так же, заменив действительный радиус Земли его эквивалентным значением.
- * Этот приём справедлив для земных волн всех диапазонов.

Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

- * Ранее речь шла о некоем усреднённом состоянии тропосферы — нормальной тропосфере. Под влиянием определённых погодных условий может возникнуть распределение индекса преломления по высоте, существенно отличающееся от «нормального».
- * Виды тропосферной рефракции можно разбить на три группы: отрицательную, нулевую (отсутствие рефракции) и положительную рефракцию.

Отрицательная тропосферная рефракция

- * При отрицательной рефракции индекс N не уменьшается с высотой, как обычно, а возрастает ($\frac{dN}{dh} > 0$).
- * В этих условиях траектория обращена выпуклостью вниз ($R < 0$), поэтому радиоволна удаляется от поверхности Земли, а дальность видимости и дальность распространения уменьшаются.

Отсутствие рефракции

- * В случае, если в некотором интервале высот N имеет постоянное значение, наблюдается отсутствие рефракции.

Положительная рефракция

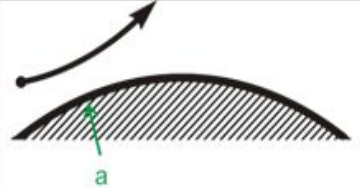
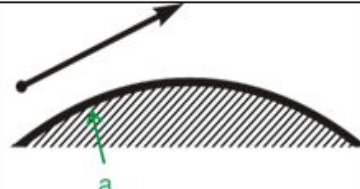
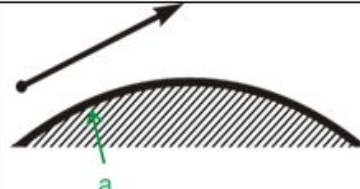
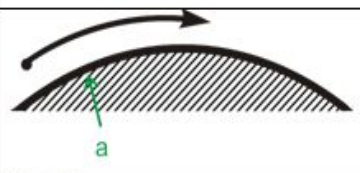
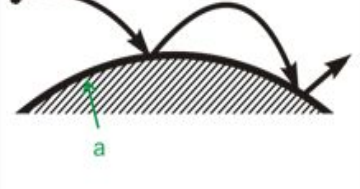
- * Положительная рефракция возникает в случаях, когда индекс N уменьшается с высотой ($\frac{dN}{dh} > 0$);
- * тогда траектории волн обращены выпуклостью вверх, и, следовательно, положительная рефракция способствует увеличению дальности распространения волн.

Положительная тропосферная рефракция

Среди положительных видов тропосферной рефракции различают:

- * пониженную (искривление лучей меньше, чем при нормальной рефракции),
- * нормальную (рассмотрена выше),
- * повышенную (искривление лучей больше, чем при нормальной, но не достигает критического значения),
- * критическую (радиус кривизны траектории равен радиусу земного шара) и
- * сверхрефракцию (лучи искривляются ещё сильнее, чем при критической рефракции).

Различные виды тропосферной рефракции

№ пп.	Название атмосферной рефракции	$\frac{dN}{dh}, 1/м$	R, м	$a_э, м$	k	Действительная траектория	Эквивалентная траектория
A	Отрицательная	>0	<0	$<6,36 \times 10^6$	<1		$a_э < a$
Б	Отсутствие рефракции	0	∞	$6,37 \times 10^6$	1		$a_э = a$
В В1 В2 В3	Положительная пониженная нормальная повышенная	$0 \div -0,04$ $-0,04$ $-0,04 \div -0,157$	$\infty \div 2,5 \times 10^7$ $2,5 \times 10^7$ $2,5 \times 10^7 \div 6,37 \times 10^6$	$6,37 \times 10^6 \div 8,5 \times 10^8$ $8,5 \times 10^6$ $8,5 \times 10^6 \div \infty$	$1 \div 4/3$ $4/3$ $4/3 \div \infty$		$a_э = \frac{4a}{3}$
В4	критическая	-0,157	$6,37 \times 10^6$	∞	∞		$a_э = \infty$
В5	сверхрефракция	$<-0,157$	$<6,37 \times 10^6$	<0	<0		$a_э < 0$

Критическая рефракция

* Согласно определению, в этом случае $R=a$.

Из формулы $R = \frac{1}{\left(-\frac{dn}{dh}\right)} = \frac{10^6}{\left(-\frac{dN}{dh}\right)}$, м находим

$$\frac{dN}{dh} = -\frac{10^6}{6,37 \cdot 10^6} = -0,157 \text{ 1/м.}$$

Критическая рефракция

- * Таким образом эквивалентный радиус принимает бесконечно большое значение, т.е. в эквивалентной схеме распространения поверхность Земли превращается в плоскость.
- * В условиях критической атмосферной рефракции пологий луч распространяется на неизменной высоте от поверхности Земли, т.е. полностью её огибает.

Сверхрефракция

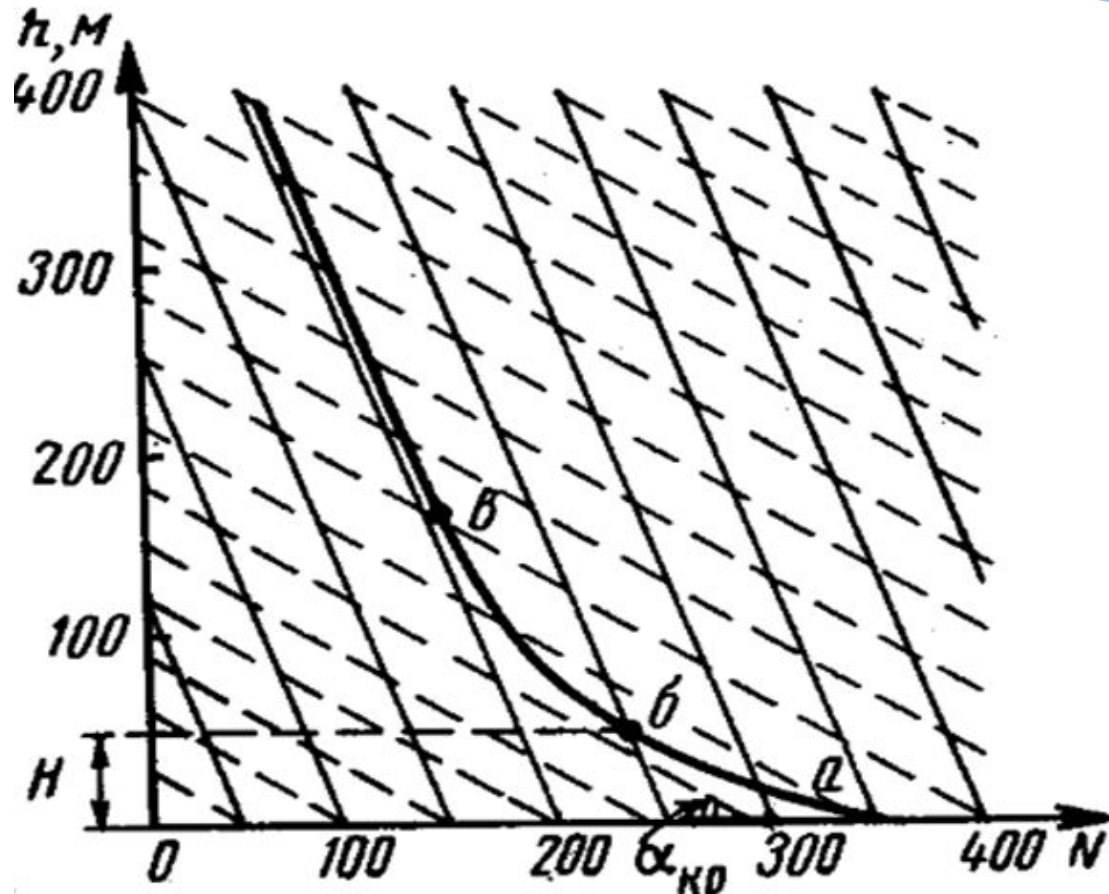
При сверхрефракции радиус кривизны луча меньше радиуса земного шара, поэтому лучи, покидающие передающую антенну под небольшим углом возвышения, испытывают в тропосфере полное внутреннее отражение и на некотором удалении возвращаются на поверхность Земли.

Отразившись от неё, волны за счёт многократных отражений способны распространяться на большие расстояния.

Различные виды тропосферной рефракции

- * Для распознавания характера атмосферной рефракции по снятому профилю $N=f(h)$, удобно пользоваться специальными графиками, на которых нанесено два семейства параллельных прямых, одно из которых имеет наклон, соответствующий нормальной атмосферной рефракции $\left(\frac{dN}{dh} = -0,04 \text{ 1/м}\right)$, а другое — критической $\left(\frac{dN}{dh} = -0,157 \text{ 1/м}\right)$. Нанеся на такой график экспериментально снятую зависимость $N=f(h)$ и сравнивая её наклон на том или ином участке с наклонами этих линий, легко выделить интервалы высот, соответствующих тому или иному режиму атмосферной рефракции.

Различные виды тропосферной рефракции



Сплошные линии соответствуют нормальной рефракции, штриховые - критической

Распространение тропосферных волн

- Определение: радиоволны, распространяющиеся на значительные (до 1 000 км) расстояния за счет рассеяния в тропосфере и направляющего (волноводного) действия тропосферы, получили название тропосферных волн.
- Важное замечание: как тропосферные могут распространяться только волны, короче 10 м.

Поглощение радиоволн в тропосфере

- * Поглощение в гидрометеорах
- * Молекулярное поглощение

Поглощение радиоволн в тропосфере

Поглощение радиоволн в тропосфере может быть вызвано четырьмя факторами:

- * поглощением в капельных образованиях (гидрометеорах): дождь, туман, град, снег;
- * молекулярным поглощением;
- * рассеянием на молекулах и агрегатах молекул (в условиях дымки);
- * поглощение твёрдыми частицами (пыль, дым и т. д.), т.е. в условиях мглы

Поглощение в гидрометеорах

- * На практике выявлено что волны длиннее 10 см не испытывают ощутимого поглощения в условиях сильного ливня, тумана, снега, града, облаков и других метеорологических явлений в нижних слоях тропосферы.
- * Волны короче 10 см, напротив, испытывают заметное поглощение, порой вплоть до нарушения радиосвязи.

Поглощение в гидрометеорах

Есть две физических причины поглощения радиоволн в капельках воды:

- * Каждую капельку можно рассматривать как полупроводник, в котором распространяющаяся волна наводит токи смещения. Плотность этих токов пропорциональна частоте, но она может достигать значительных величин только на самых высоких частотах диапазона см и мм волн. Это приводит к энергетическим потерям.
- * Наводимые в капельках дождя или тумана токи являются источником рассеянного или излучения.

Поглощение в гидрометеорах

- * В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн поглощение обусловлено действием обоих механизмов.
- * Дополнительные потери возникают в результате частичного отражения радиоволны от встретившегося на пути резко очерченного облака или дождевой полосы.

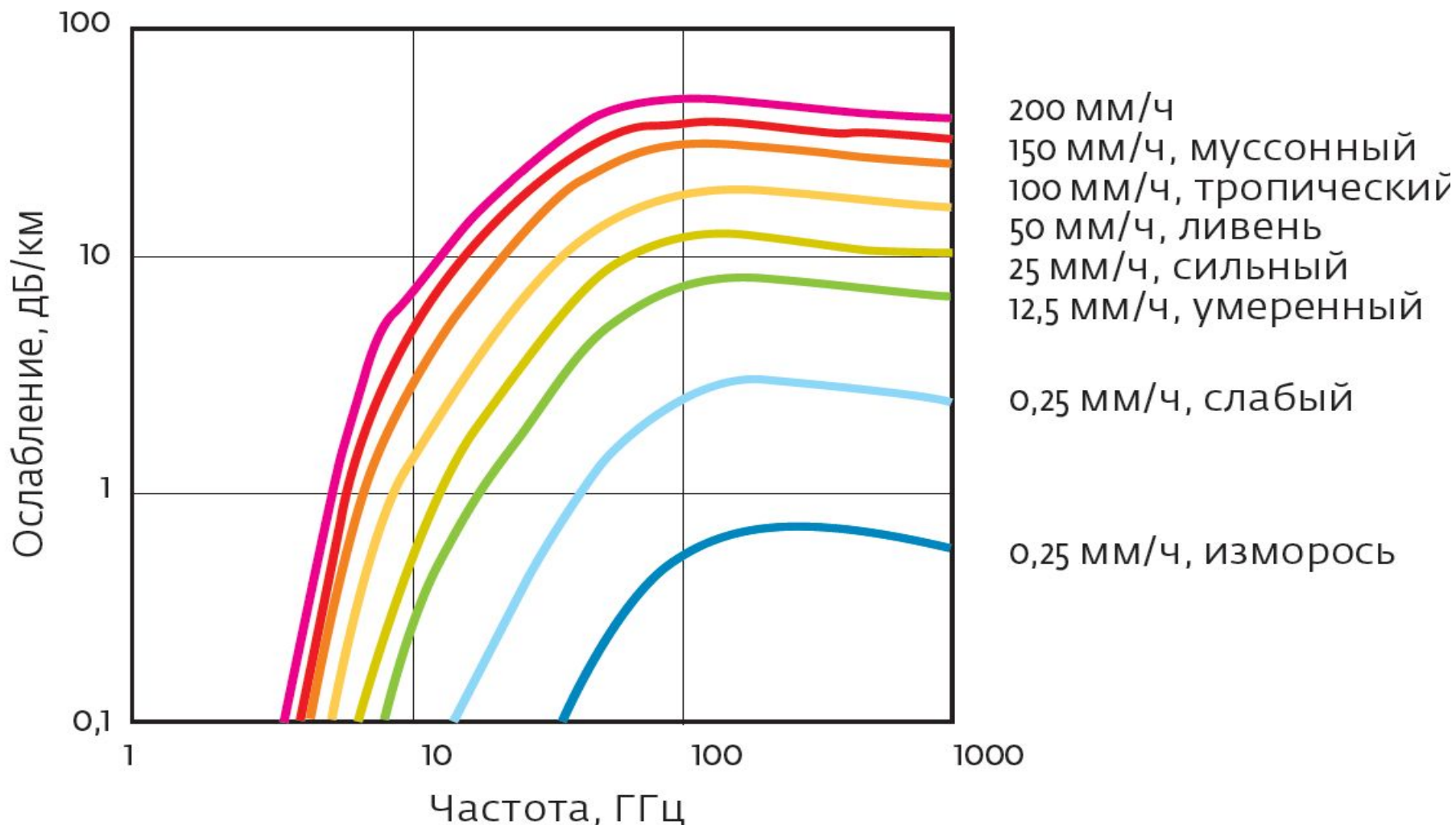
Поглощение в гидрометеорах

- * Если волна проходит в тропосфере путь r и из этого пути на зону дождя приходится отрезок l , то напряжённость поля можно рассчитать по формуле

- *
$$E_D = \frac{173 \sqrt{P_{1[\text{кВт}}]} D_1}{r_{[\text{км}}]} e^{-\delta l_{[\text{км}]}} , \text{ мВ/м}$$

- * δ — коэффициент поглощения на 1 км пути.

Зависимости коэффициента поглощения от интенсивности осадков определяются по графикам

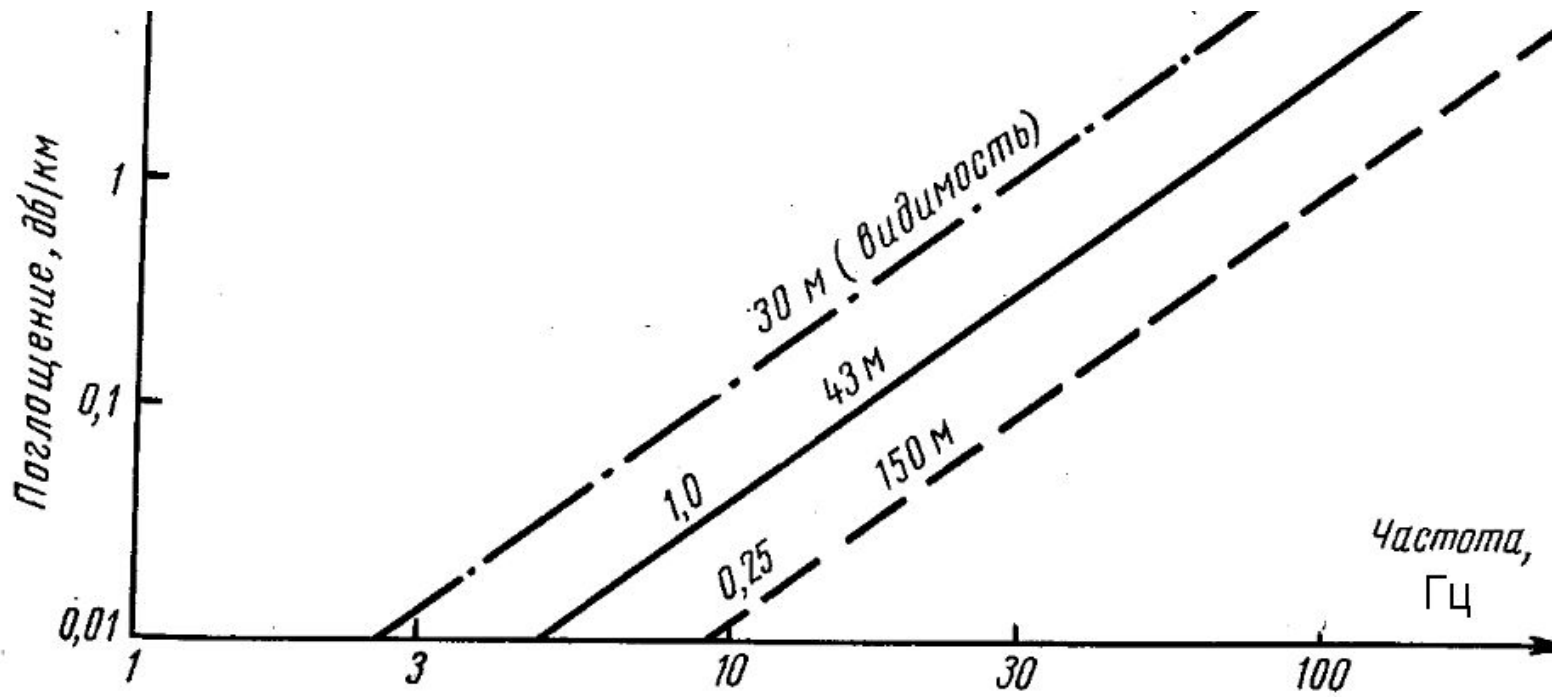


Поглощение в тумане

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУМАНОВ

Вид тумана	Средний размер капелек, $\mu\text{к}$	Число капелек, в 1 см^3	Водность тумана $\text{г}/\text{м}^3$
Слабый	5	60	0,03
Средний	5	600	0,3
Сильный	10	600	2,3

Поглощение в тумане



Молекулярное поглощение

- * Радиоволны короче 5 см могут поглощаться также вследствие непосредственного воздействия поля волны на молекулы входящих в состав тропосферы газов. Это молекулярное поглощение, которое имеет место в отсутствие дождя, тумана и других капельных образований; в этих условиях энергия расходуется на нагревание вещества, ионизацию или возбуждение атомов и молекул, фотохимические процессы и т.д.

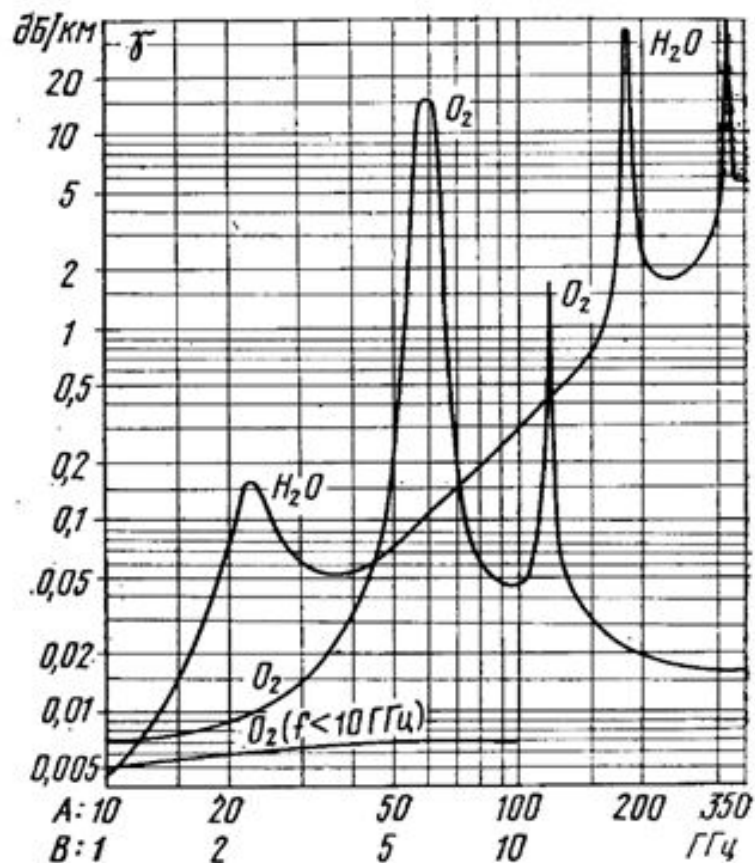
Поглощение в кислороде и водяных парах

- * Для атомов основную роль играет энергия внешних электронов, для молекул, помимо этого — энергия колебаний атомов и энергии вращения молекул. Большинство энергетических уровней имеют дискретные значения, поэтому подобные переходы обладают резонансным характером, что приводит к селективному поглощению радиоволн.

Поглощение в кислороде и водяных парах

- * Среди входящих в состав тропосферы газов оно сильнее всего проявляется
- * в кислороде ($\lambda=0.5$ см; 0.25 см) и
- * водяных парах ($\lambda=1.35$ см; 1.5 мм; 0.75 мм)

Поглощение в кислороде и водяных парах



Самостоятельно проработать разделы:

- * Флуктуационные процессы при распространении радиоволн в тропосфере
- * Дальнее распространение УКВ за счет рассеяния в тропосфере
- * Распространение за счет явления сверхрефракции (тропосферный волновод)
- * Сезонные изменения уровня сигнала при тропосферном распространении УКВ

Решить задачу:

Рассчитать напряженность поля на расстоянии 24 км от передающей антенны, подвешенной на высоте, равной 10 м и имеющей КНД, равный 3. Точка приема находится на высоте $h_2 = 8$ м от поверхности земли. Мощность излучения равна 15 Вт, а частота $f = 10$ ГГц. Распространение ЭМ поля происходит в тропосфере, коэффициент преломления которой аппроксимирован линейной функцией высоты с $dN_T/dh = -36$ (1/км).