# 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 *р (мбар),*
* абсолютная температура Т (К)
* абсолютная влажность ф (*мбар)*

# Строение и основные параметры тропосферы

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

# Строение и основные параметры тропосферы

Абсолютная влажность е связана с величинами ф 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°C,
* относительная влажность S = 60%.

# Нормальная тропосфера

* С увеличением высоты на каждые 100 *м* давление уменьшается на 12 *мбар*, а температура — на 0,55°.
* 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
* $N = (n - 1)\ 10^6$.

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

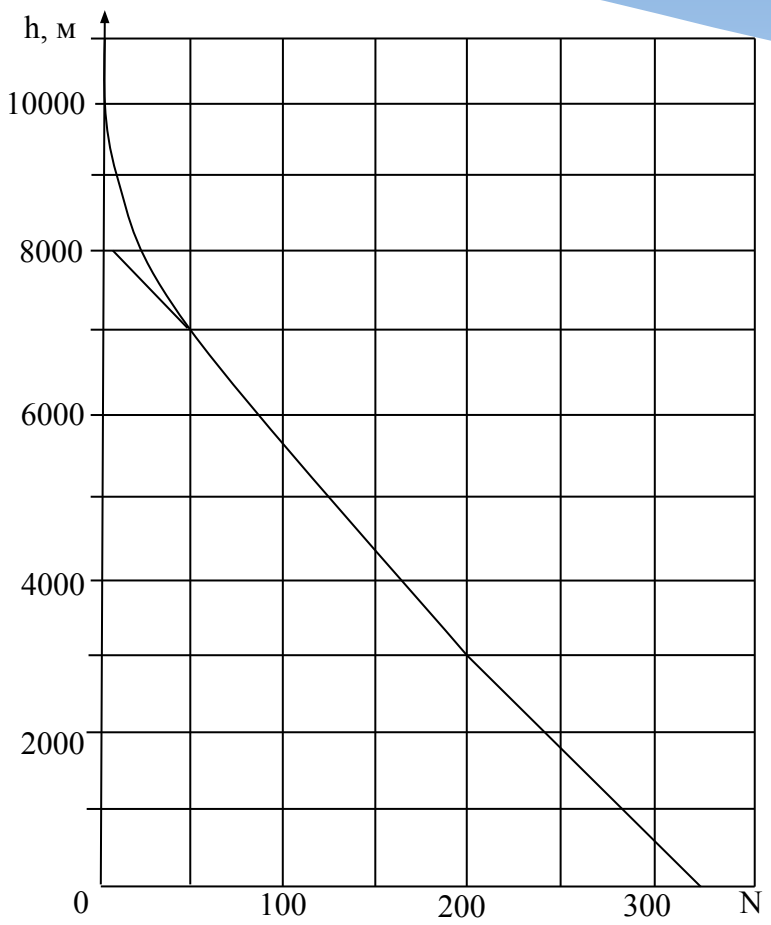
* для волн оптического диапазона:
  $N \approx \frac{77,6}{T}(p - 0,167e)$,

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/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.

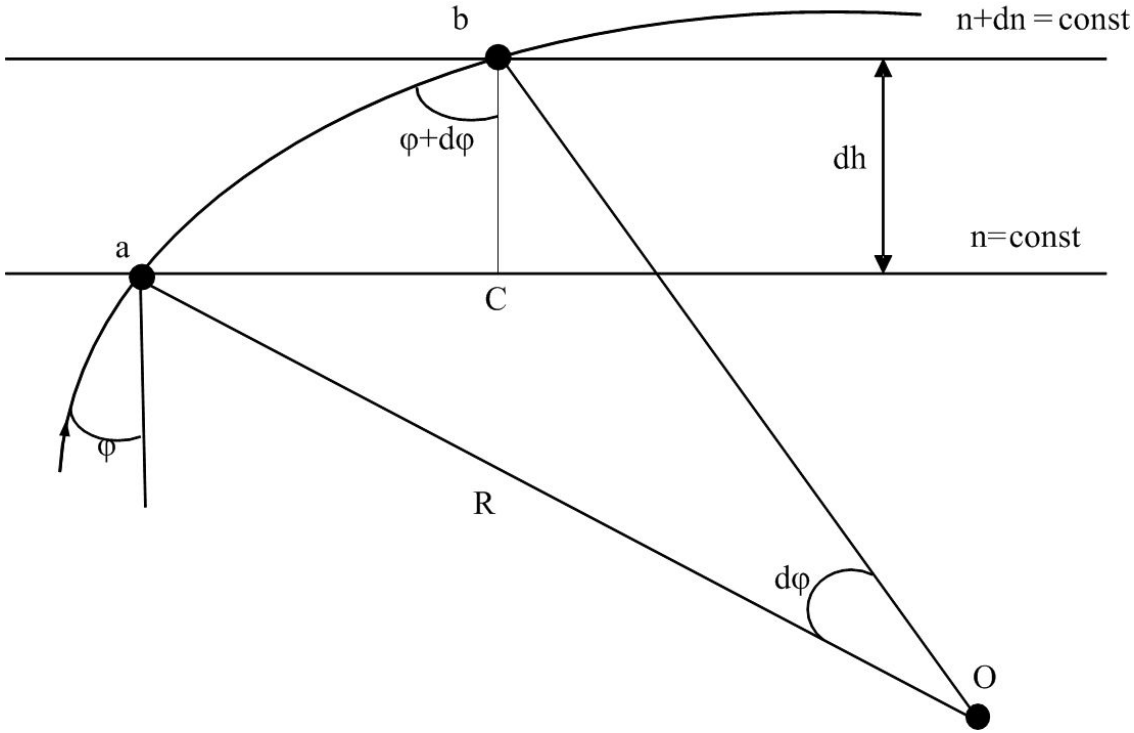
# Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн

* **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/dϕ
* Из треугольника abc находим:

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

$$R = \frac{dh}{\cos\varphi \ d\varphi}, \text{м.}$$

# Явление тропосферной рефракции

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

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

* 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)

  $R=10^6/4\cdot10^{-2}=25000$ км
* УКВ радиоволны ($<3\cdot10^{11}$ Гц) испытывают в атмосфере несколько большее преломление, чем радиоволны оптического диапазона ($4\cdot10^{14}$-$7{,}5\cdot10^{14}$ Гц), в силу инерционных свойств молекул воды, которые своими перемещениями вносят вклад в значение коэффициента преломления;
* для радиоволн оптического диапазона и световых волн $R\approx50000$ км.

# Нормальная рефракция

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

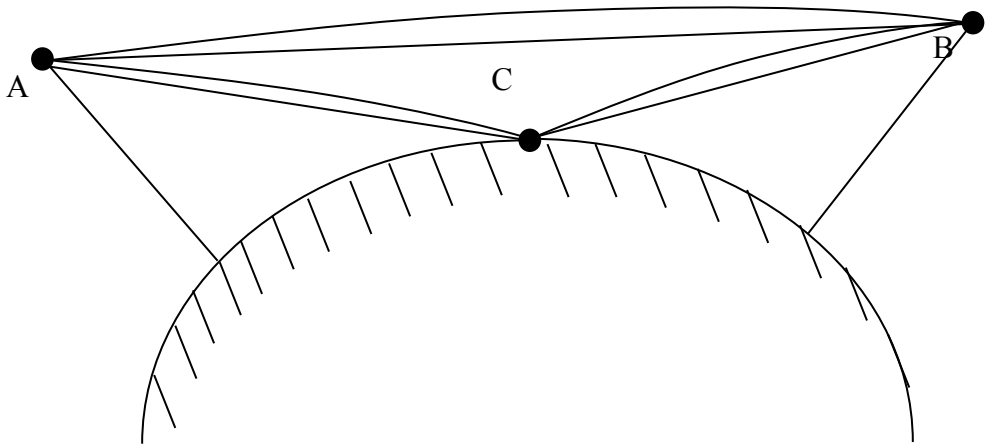
# Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

* **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

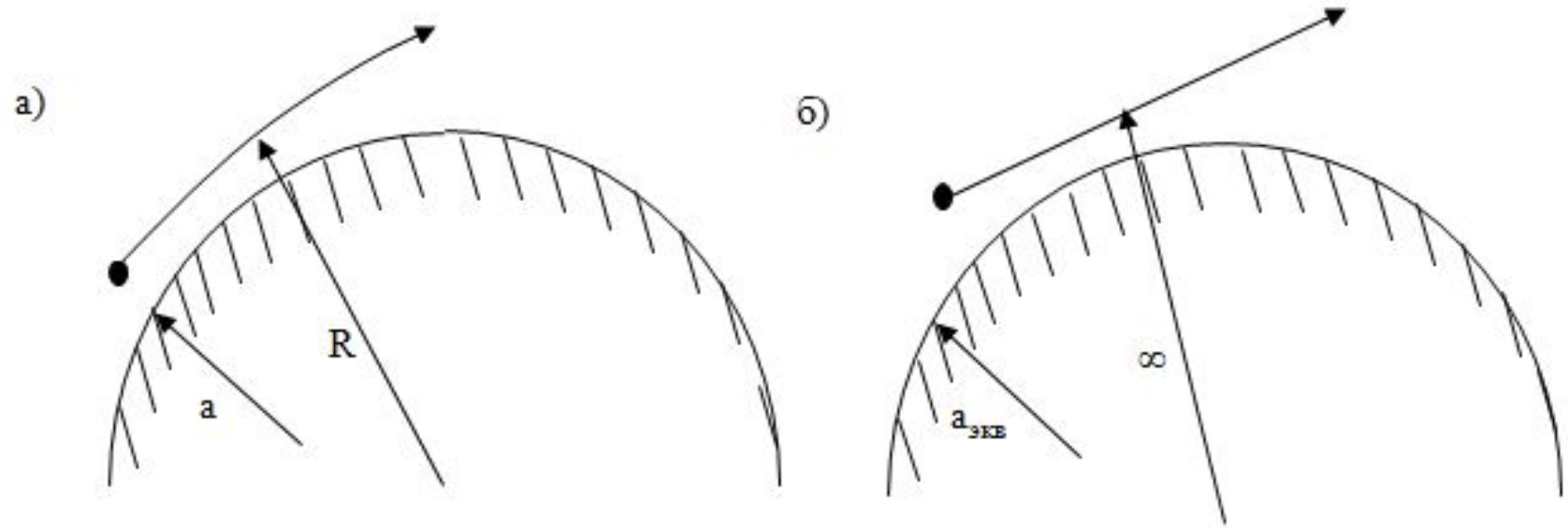
# Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

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 $a_э$. 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

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

Обозначим через $k$ отношение эквивалентного радиуса Земли к действительному:

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

# Понятие об эквивалентном радиусе земного шара

Зная значение $\frac{dN}{dh} = -4 \cdot 10^{-2} 1/\text{м}$ для нормальной тропосферной рефракции и действительный радиус Земли $a$=6,37·10$^6$ 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 $a_э$, 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):
* $r_0 = \sqrt{2ak}\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right)[\text{м}] = 4{,}12\left(\sqrt{h_{1[\text{м}]}} + \sqrt{h_{2[\text{м}]}}\right)[\text{км}]$
* для оптического диапазона:
  $r_0 = 3{,}83\left(\sqrt{h_{1[\text{м}]}} + \sqrt{h_{2[\text{м}]}}\right)[\text{км}]$

# Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

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

* $$\begin{cases} h'_1 = h_{1[\text{м}]} - \dfrac{r^2_{1[\text{км}]}}{k \cdot 12{,}8}, \text{м} \\ h'_2 = h_{2[\text{м}]} - \dfrac{r^2_{2[\text{км}]}}{k \cdot 12{,}8}, \text{м} \end{cases} \quad (4)$$

# Учет тропосферной рефракции при распространении земных радиоволн

* Формулы для расчета значений r1 и r2 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 неком 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 $\left(\frac{dN}{dh} > 0\right)$.
- 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

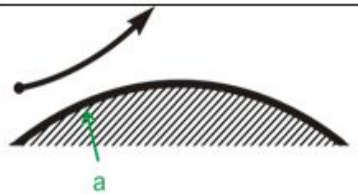
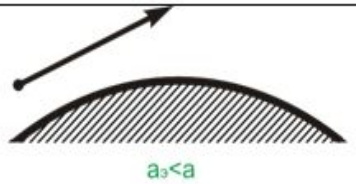
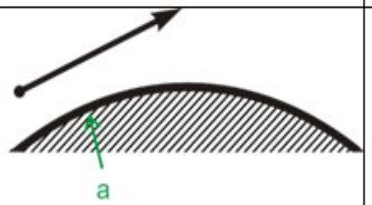
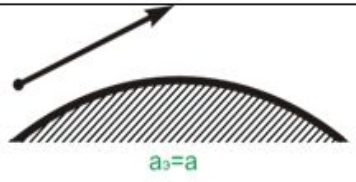
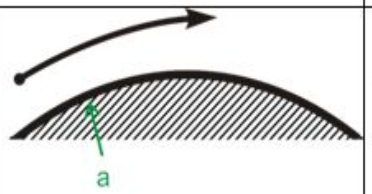
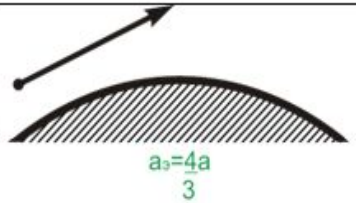
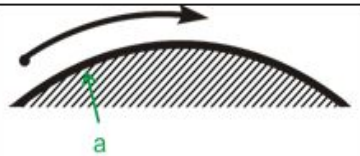
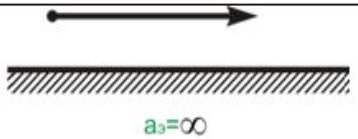
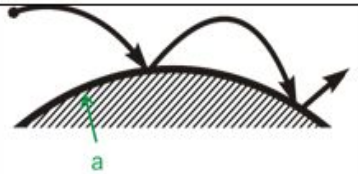
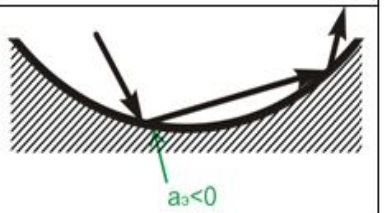
* Положительная рефракция возникает в случаях, когда индекс *N* уменьшается с высотой $\left(\frac{dN}{dh} > 0\right)$;
* тогда траектории волн обращены выпуклостью вверх, и, следовательно, положительная рефракция способствует увеличению дальности распространения волн.

# 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| А | Отрицательная | >0 | <0 | $<6{,}36 \times 10^6$ | <1 |   |   |
| Б | Отсутствие рефракции | 0 | ∞ | $6{,}37 \times 10^6$ | 1 |   |   |
| В<br>В1<br>В2<br>В3 | Положительная<br>пониженная<br>нормальная<br>повышенная | <br>0÷-0,04<br>-0,04<br>-0,04÷-0,157 | <br>∞÷$2{,}5 \times 10^7$<br>$2{,}5 \times 10^7$<br>$2{,}5 \times 10^7 \div 6{,}37 \times 10^6$ | <br>$6{,}37 \times 10^6 \div 8{,}5 \times 10^8$<br>$8{,}5 \times 10^6$<br>$8{,}5 \times 10^6 \div \infty$ | <br>1÷4/3<br>4/3<br>4/3÷∞ |   |   |
| В4 | критическая | -0,157 | $6{,}37 \times 10^6$ | ∞ | ∞ |   |   |
| В5 | сверхрефракция | <-0,157 | $<6{,}37 \times 10^6$ | <0 | <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

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

# 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.

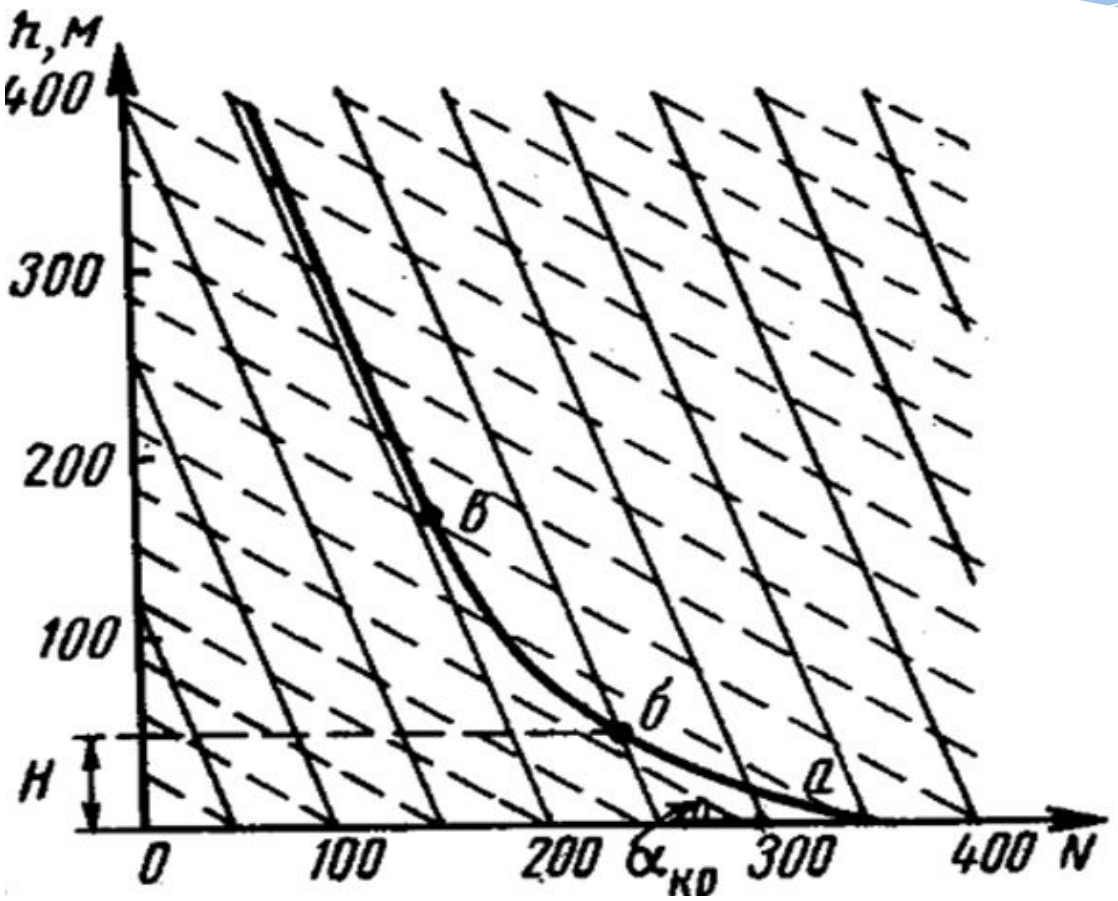
# Сверхрефракция

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 $\left(\frac{dN}{dh} = -0{,}04\ 1/\text{м}\right)$, а другое — критической $\left(\frac{dN}{dh} = -0{,}157\ 1/\text{м}\right)$. 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.

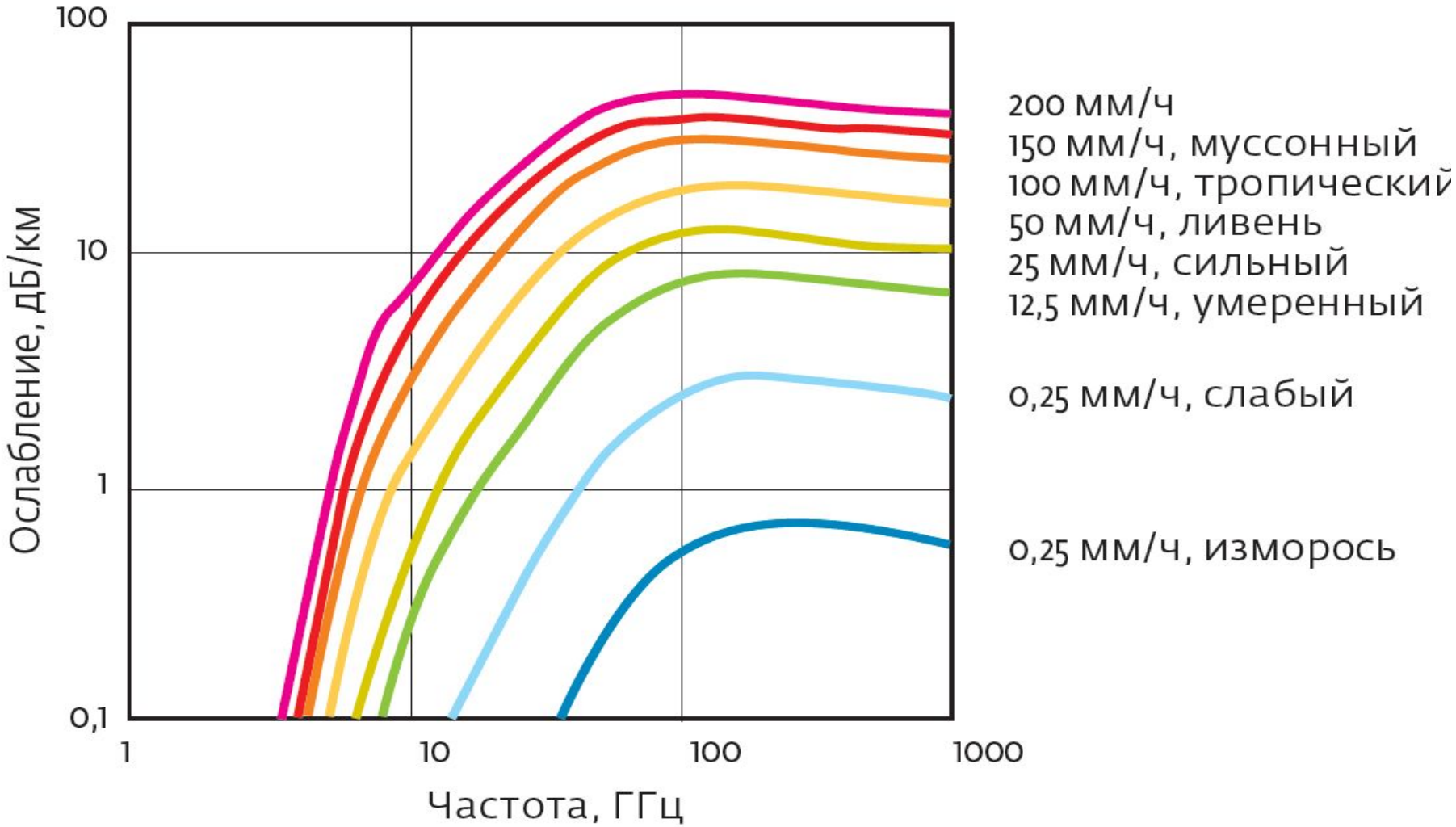
# Поглощение в гидрометеорах

* 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
* $E_{Д} = \frac{173\sqrt{P_{1[квт]}D_1}}{r_{[км]}} e^{-\delta l_{[км]}}, мв/м$
* δ — коэффициент поглощения на 1 км пути.

# Зависимости коэффициента поглощения от интенсивности осадков определяются по графикам

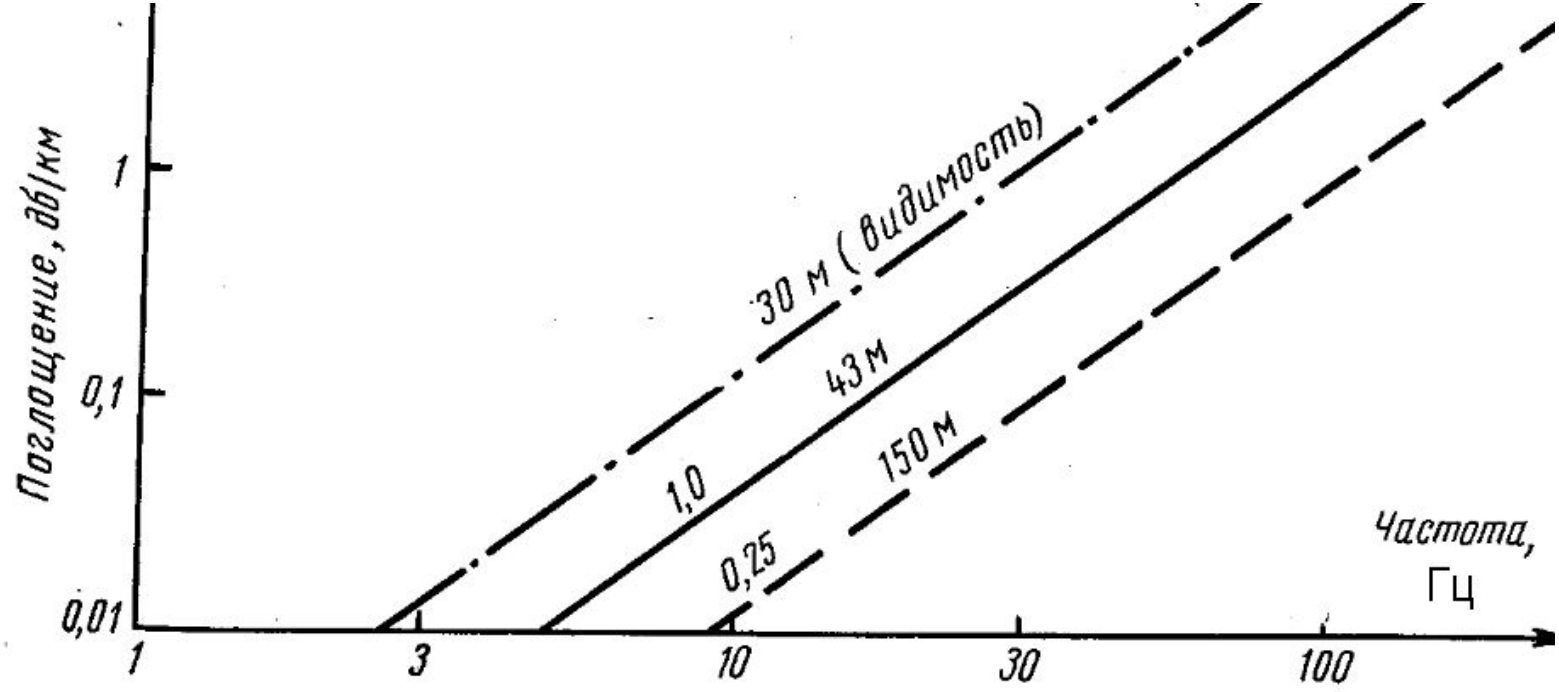


# Поглощение в тумане

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУМАНОВ

| Вид тумана | Средний размер капелек, *мк* | Число капелек, в 1 *см*³ | Водность тумана *г/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.

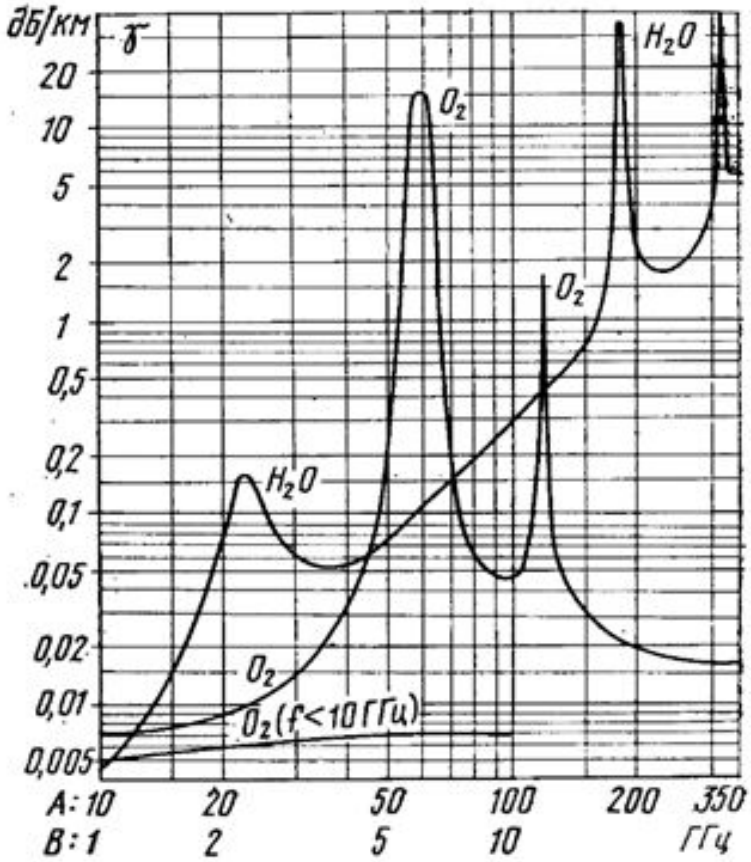
# Поглощение в кислороде и водяных парах

* 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).