

# Методы зондирования окружающей среды



# Радиорефракция

Профессор Кузнецов Анатолий Дмитриевич

Российский государственный  
гидрометеорологический университет

**Радиорефракцией** называется *искривление* траектории распространения электромагнитных волн в атмосфере.

Явление радиорефракции связано с изменением показателя преломления электромагнитной волны ***n*** в атмосфере.

Из-за неоднородности атмосферы как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, соответственно указанные искривления траектории могут наблюдаться так же как в горизонтальной и в вертикальной плоскостях.

В земной атмосфере масштабы неоднородностей в горизонтальной и в вертикальной плоскостях значительно отличаются.

Поэтому при рассмотрении радиорефракции обычно учитывается **только искривление** траектории распространения электромагнитных волн **в вертикальной плоскости.**

**Распространение  
радиоволн**

**В**

**тропосфере**

**Тропосфера** – приземной слой атмосферы от ее поверхности до тропопаузы (в полярных широтах до 8-10 км в умеренных - до 10-12 км, в тропических - до 16-18 км). В тропосфере сосредоточены более 4/5 всей массы воздуха, почти весь **водяной пар**, гидрометеоры (жидкие и твердые), в ней возникают самые разнообразные формы облаков и виды осадков.

Газовый состав тропосферы постоянен и идентичен составу у поверхности: 78% азота, 21% кислорода, 0,33% аргона, 0,03% CO<sub>2</sub> и т. д. Содержание водяного пара – от 0 до 4% по объёму.

Основные зависящие от высоты  $h$  параметры тропосферы:  $p$  – общее давление,  $p_c$  – давление сухого воздуха,  $T$  – абсолютная температура,  $e$  – парциальное давление водяного пара.

Температура в тропосфере с высотой  $h$  в среднем падает. Верхней границей тропосферы считается высота, на которой падение температуры прекращается (причина роста температуры с уменьшением высоты здесь – нагрев поверхности Земли).

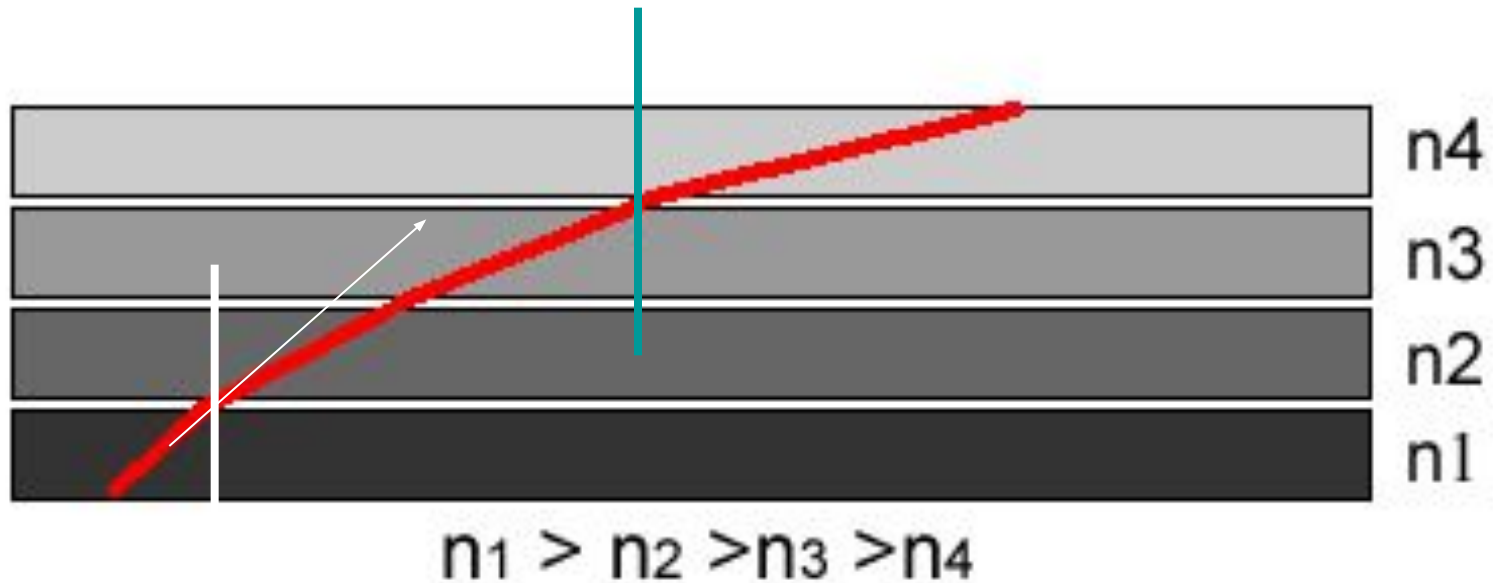
# **Особенности распространения электромагнитного излучения в неоднородной среде**

Если электромагнитный луч попадает на границу раздела **плоскопараллельных сред** с разными значениями коэффициента  **$n$** , то искривление траектории луча будет происходить по закону

$$n_1 \sin\phi_1 = n_2 \sin\phi_2 = \dots = n_i \sin\phi_i = \text{const.}$$



Если луч переходит из среды с большим значением  $n$  в среду с меньшим значением  $n$ , то угол  $\phi_2$  должен быть больше угла  $\phi_1$ , т.е. траектория луча будет обращена вогнутостью в сторону границы раздела.



$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 = \dots = n_i \sin \phi_i = \text{const.}$$

Плотность реальной атмосферы ее плотность убывает с высотой.

Поэтому, **если бы** коэффициент преломления в земной атмосфере зависел бы только от плотности, то тогда луч, направленный с земной поверхности вверх, будет переходить из области с большим значением плотности в области с меньшими значениями плотности и, следовательно, **всегда отклонялся бы в сторону земной поверхности.**



Распространение радиоволн при **нормальной тропосферной рефракцией**

**Коэффициент преломления  $n$**  в тропосфере обычно определяется с помощью полуэмпирической формулы

$$n = 1 + \left[ \frac{77,6}{T} \left( p_c + e + \frac{4810e}{T} \right) \right] 10^{-6} = 1 + N10^{-6}$$

Величину  $N = (n - 1) \cdot 10^6$  называют **индексом коэффициента преломления**.

Локальные изменения давления, а также температурные инверсии приводят к колебаниям коэффициента преломления вблизи земной поверхности  $n = 1,00026 \div 1,00046$ .

Выше 10 км полагают  $n = const = 1,00011$ .

Для характеристики вертикальной изменчивости коэффициента преломления атмосферы используют величину его вертикального градиента.

Вертикальный градиент коэффициента преломления атмосферы может быть определен с помощью соотношений вида

$$\frac{dn}{dh} \approx \frac{\Delta n}{\Delta h} = \frac{n_2 - n_1}{h_2 - h_1}$$

или

$$\frac{dN}{dh} \approx \frac{\Delta N}{\Delta h} = \frac{N_2 - N_1}{h_2 - h_1}$$

где  $n_1$  ( $N_1$ ) и  $n_2$  ( $N_2$ ) – соответствующие значения коэффициента преломления на высотах нижней и верхней границ рассматриваемого слоя ( $h_1$  и  $h_2$ ).

## Стандартная радиоатмосфера.

При радиометеорологическом зондировании атмосферы, а также при решении целого ряда других прикладных задач, обычно используются параметры **стандартной радиоатмосферной**, максимально приближенные к стандартной атмосфере.

В тропосфере для стандартной радиоатмосфере задается линейное уменьшение температуры воздуха с высотой, равное  $6.5^{\circ}\text{C}$  на 1 км.

Изменение атмосферного давления с высотой определяется барометрическим законом

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{gh}{RT}\right)$$

а убывание удельной влажности воздуха с ростом высоты описывается с помощью следующего эмпирического соотношения

$$q(h) = q_0 \exp(-h(b - ch))$$

В приведенных формулах  $p_0$  и  $q_0$  – давление (гПа) и удельная влажность ( $\text{г/м}^3$ ) на нижнем уровне;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $T$  средняя температура столба влажного воздуха от нижнего уровня до уровня  $h$  (км);  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $b$  и  $c$  – коэффициенты ( $0.1112 \leq b \leq 0.2181$ ;  $0.0286 \leq c \leq 0.0375$ ).

В стандартной радиоатмосфере коэффициент преломления изменяется с высотой по линейному закону и его вертикальный градиент оказывается равным [1/м]

$$\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-8}$$

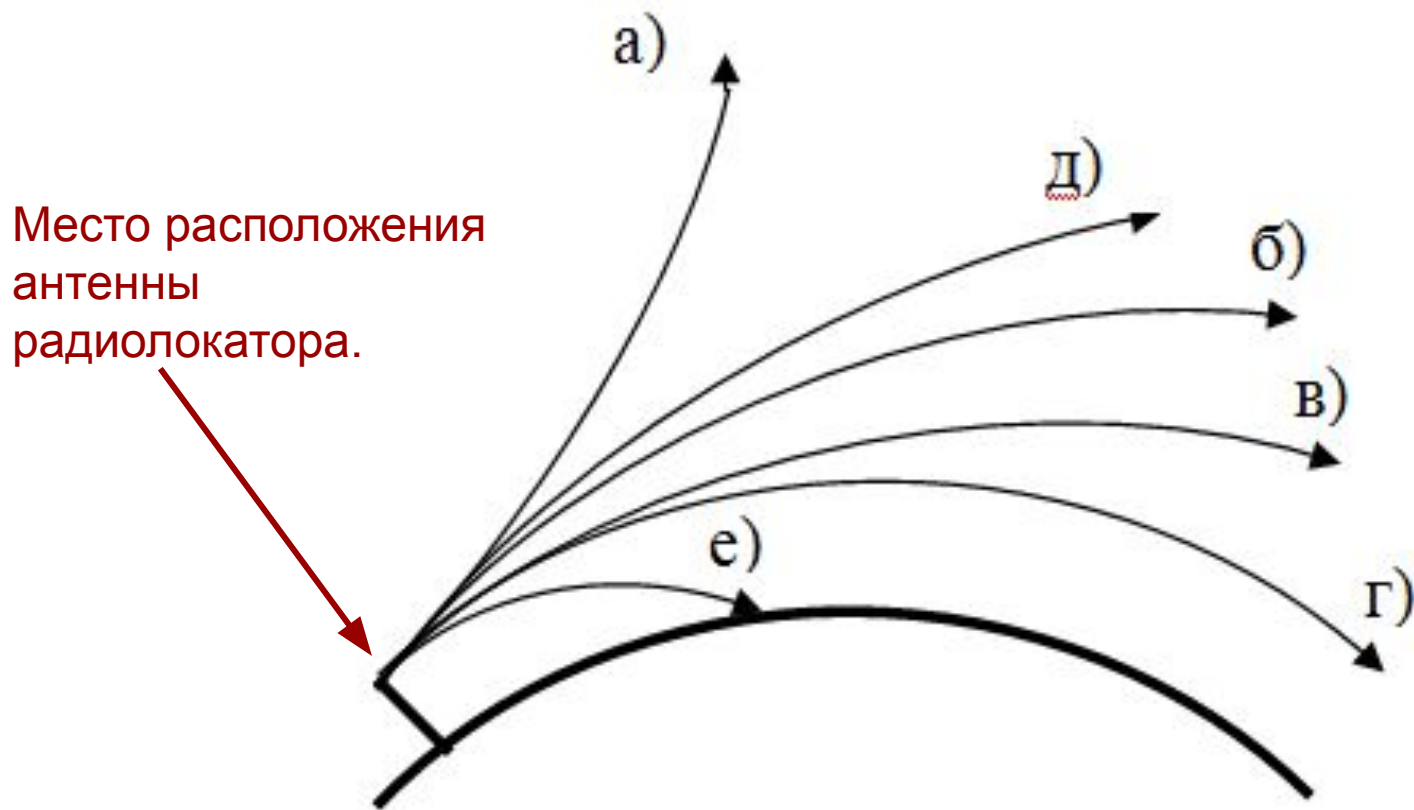
При отличных от стандартной радиоатмосферы изменения метеорологических величин с высотой в тропосфере можно закон изменения коэффициента преломления с высотой описать зависимостью вида

$$n = n_0 e^{-\alpha h}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, величина которого может быть определена в соответствии с вертикальным распределением метеорологических величин.



# **Виды рефракции радиоволн в тропосфере**



Схематическое представление видов атмосферной рефракции в тропосфере Земли

Во всех представленных случаях луч первоначально посылается при угле возвышения антенны, равном  $0^0$  (параллельно поверхности Земли).

1. **Отрицательная рефракция:** на рисунке данная траектория соответствует букве **а**. Реализуется при

$$\frac{dn}{dh} > 0$$

В этом случае  $\rho < 0$ , т. е. траектория волны направлена выпуклостью вниз.

Такой вид рефракции возможен при

$$\frac{dT}{dh} \ll -6,5 \frac{1}{\text{км}} \quad \frac{de}{dh} \gg -3,5 \frac{\text{мб}}{\text{км}}$$

Наблюдается в континентальных районах с умеренным климатом, осенью и весной во время утренних туманов.

2. **Положительная рефракция.** Реализуется при

$$\frac{dn}{dh} < 0$$

В этом случае  $\rho > 0$  и, следовательно, траектория радиолуча обращена выпуклостью вверх.

Различают следующие частные случаи:

- **нормальная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **б**);
- **повышенная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **в**);
- **критическая рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **г**);
- **пониженная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **д**);

2-1. **Нормальная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **б**). Реализуется при

$$\frac{dT}{dh} = -6,5 \frac{1}{\text{км}}$$

$$\frac{de}{dh} = -3,5 \frac{\text{мб}}{\text{км}}$$

При таких средних значениях градиентов температуры и влажности

$$\frac{dn}{dh} = -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}, R_{\text{экв}} = 8500 \text{ км}, \rho = 25000 \text{ км}.$$

Наиболее распространённый вид положительной рефракции.

Чаще наблюдается в дневные часы.

**2-2. Повышенная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере **в**). Реализуется при

$$\frac{dT}{dh} > -6,5 \frac{1}{\text{км}} \quad \frac{de}{dh} < -3,5 \frac{\text{мб}}{\text{км}}$$

В этом случае

$$8500 \text{ км} < R_{\text{экв}} < \infty,$$
$$-15,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1} < \frac{dn}{dh} < -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}.$$

Наблюдается в континентальных районах средних широт в вечерние, ночные и утренние часы летом вследствие температурных инверсий и резкого уменьшения влажности с высотой.

2-3. **Критическая рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует литере г). Реализуется при

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{R_3} = -15,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}.$$

В этом случае радиолуч движется параллельно поверхности Земли на постоянной высоте:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \infty, \quad \rho = R_3.$$

Наблюдается в континентальных районах средних широт в вечерние, ночные и утренние часы летом вследствие температурных инверсий и резкого уменьшения влажности с высотой;

2-4. **Пониженная рефракция** (на рисунке данная траектория соответствует букве **д**). Реализуется при

$$\frac{dT}{dh} < -6,5 \frac{1}{\text{км}}$$

$$\frac{de}{dh} > -3,5 \frac{\text{мб}}{\text{км}}$$

В этом случае

$$R_3 < R_{\text{ЭКВ}} < 8500 \text{ км},$$

$$-4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1} < \frac{dn}{dh} < 0.$$

Температура с высотой убывает быстрее, а влажность – медленнее, чем при нормальной рефракции.

Обычно наблюдается в пасмурную, дождливую погоду.



3. **Сверхрефракция** (волноводная рефракция) (на рисунке данная траектория соответствует литере **е**). Реализуется при

$$\frac{dT}{dh} \gg -6,5 \frac{1}{\text{км}} \qquad \frac{de}{dh} \ll -3,5 \frac{\text{мб}}{\text{км}}$$

При таких градиентах

$$\frac{dn}{dh} < -1/R_{\text{ЭКВ}}, \quad \rho < R_3, \quad R_{\text{ЭКВ}} < 0.$$

В этом случае волна, отразившись от области высокого градиента, достигает поверхности Земли, отражается от нее, снова преломляется в тропосфере и т. д. Так появляется тропосферный волновод.

Условия появления: резкое понижение  $n$  с высотой обычно вследствие температурной инверсии как вблизи поверхности, так и на высотах 2 – 3 км.

Поскольку температурные инверсии наблюдаются нерегулярно, можно прогнозировать только вероятность появления волновода в определенном районе в определенное время.

**Количественные  
характеристики,  
описывающие  
радиорефракцию  
в атмосфере Земли**

# 1. Эффективная высота коэффициента преломления

Кроме коэффициента преломления  $n$  и индекса коэффициента преломления  $N$  для количественного описания характера распределения коэффициента преломления с высотой вводят в рассмотрение еще одну характеристику: **эффективную высоту коэффициента преломления  $H_э$** .

Эффективная высота коэффициента преломления – это высота, на которой величина коэффициента преломления уменьшается по сравнению с исходным значением в  $e$  раз.

В случае стандартной, или нормальной атмосферы, когда  $N_0 = 253 \cdot 10^{-6}$ , эффективная высота оказывается равной около 8 км.

## 2. Радиус кривизны радиолуча в атмосфере

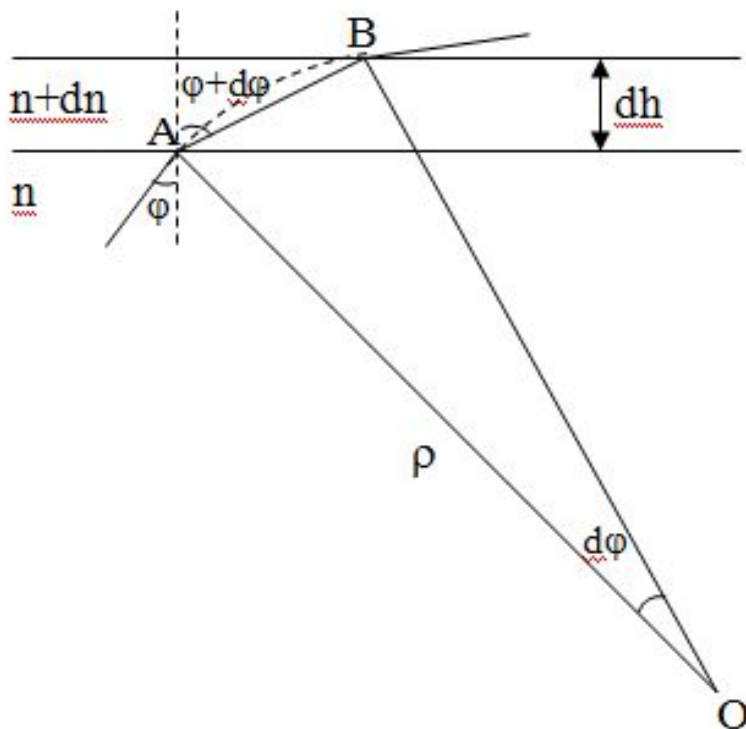
Для количественного описания траектории распространения радиолуча в атмосфере при наличии радиорефракции используется такая количественная характеристика как радиус кривизны радиолуча в атмосфере  $\rho$ .

Найдём связь между средним градиентом коэффициента преломления в тропосфере и радиусом кривизны радиолуча.

Пусть плоская волна, распространяясь в слое с коэффициентом преломления  $n$  под углом  $\phi$ , падает на слой толщиной  $dh$  с коэффициентом преломления  $n + dn$ . Проходя такой слой, она преломится и выйдет из него под углом  $\phi + d\phi$ .

На участке АВ траекторию волны можно представить отрезком кривой с радиусом  $\rho$ . Угол между касательными к кривой в точках А и В, а следовательно, и  $\angle AOB$ , равен  $d\phi$ .

Тогда для радиуса кривизны траектории можно записать:



$$\rho = \frac{AB}{d\phi}$$

Но

$$AB = \frac{dh}{\cos(\varphi + d\varphi)} \approx \frac{dh}{\cos \varphi}$$

Продифференцируем равенство

$$n \cdot \sin \phi = \text{const} :$$

$$d(n \cdot \sin \phi = \text{const}) = \sin \phi \, dn + n \cdot \cos \phi \cdot d\phi = 0,$$

Из последних двух равенств после их подстановки в формулу для радиуса кривизны траектории получаем

$$\rho = \frac{n}{-\sin \varphi \frac{dn}{dh}}$$

Поскольку радиотрассы обычно можно считать пологими, т. е.

$$\sin\phi \approx 1,$$

и, кроме того, в тропосфере

$$n \approx 1,$$

окончательно получаем

$$\rho = \frac{1}{-\frac{dn}{dh}} = \frac{10^6}{-\frac{dN}{dh}}$$

Если коэффициент преломления меняется с высотой по линейному закону, то радиус кривизны траектории с высотой не меняется, т. е. имеем распространение по дуге окружности.

**Для модели нормальной тропосферы**

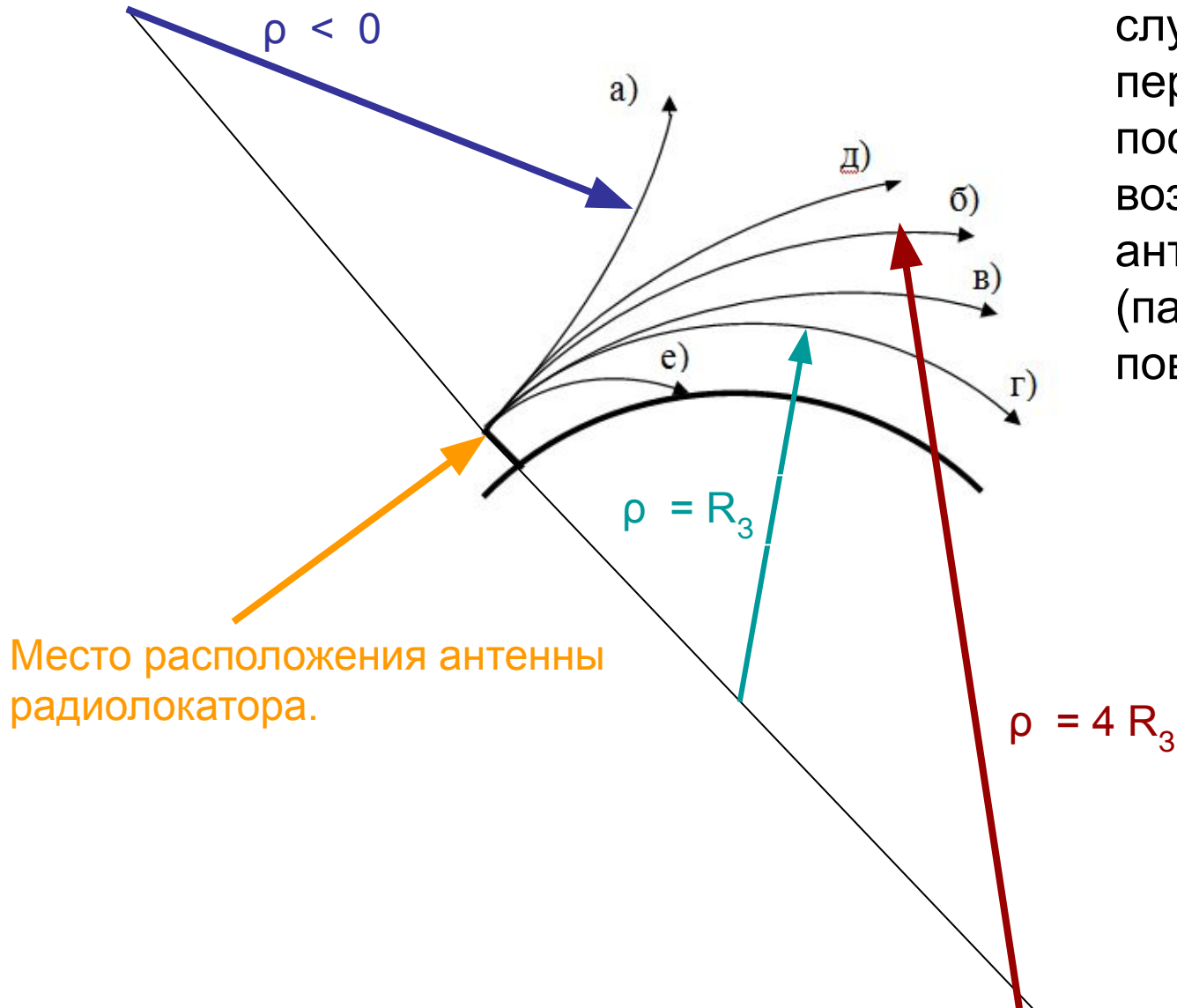
$$\frac{dn_1}{dh} = -4 \cdot 10^{-8}$$

следовательно,  $\rho \approx 25000 \text{ км} \approx 4 R_3$ .

Напомним, что распространение радиоволн по дуге круга такого радиуса называется **нормальной тропосферной рефракцией**.



Во всех представленных случаях луч первоначально посылается при угле возвышения антенны, равном  $0^0$  (параллельно поверхности Земли).

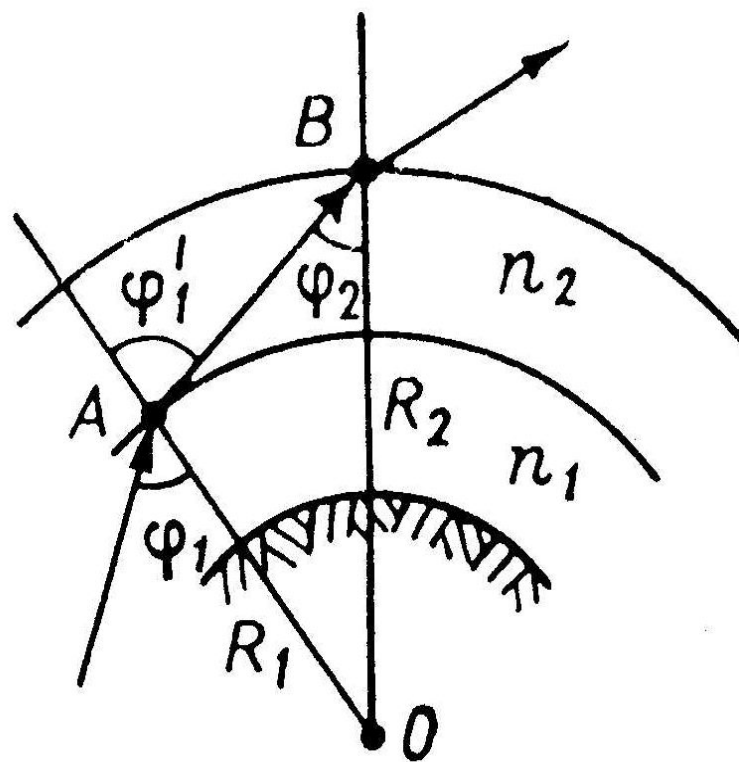


Место расположения антенны радиолокатора.

# **Законы рефракции в сферической атмосфере Земли**

Если луч падает на границу раздела сферических слоев с различными значениями коэффициента преломления, то, считая в пределах каждого слоя распространение прямолинейным (что представляется вполне возможным при достаточно тонких слоях), для точки  $A$  можно записать

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi'_1.$$



Теперь на основе теоремы синусов определим из треугольника  $AOB$  значение  $\sin \phi'_1$ .

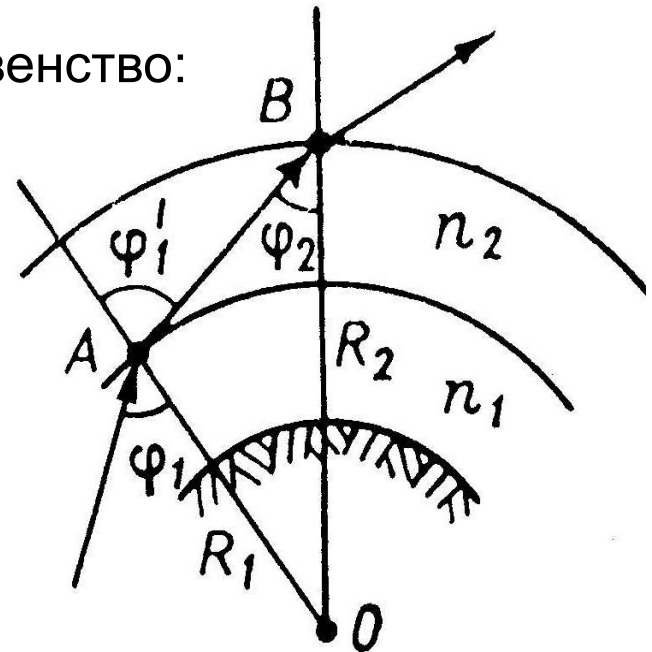
**Теорема синусов:** для произвольного треугольника выполняется следующее равенство

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R,$$

где  $a, b, c$  — стороны треугольника,  $\alpha, \beta, \gamma$  — соответственно противолежащие им углы, а  $R$  — радиус описанной около треугольника окружности.

В нашем случае выполняется следующее равенство:

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{\sin \varphi_2} &= \frac{R_2}{\sin (180^\circ - \varphi_1')} = \\ &= \frac{R_2}{\sin 180^\circ \cos \varphi_1' - \cos 180^\circ \sin \varphi_1'} = \\ &= \frac{R_2}{\sin \varphi_1'} \end{aligned}$$



Подставляя в соотношение

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi'_1$$

значение  $n_2 \sin \phi'_1$  из соотношения

$$\frac{R_1}{\sin \varphi_2} = \frac{R_2}{\sin \varphi'_1} \quad \sin \varphi'_1 = \frac{R_2}{R_1} \sin \varphi_2$$

получаем

$$n_1 R_1 \sin \phi_1 = n_2 R_2 \sin \phi_2$$

Или, в общем случае

$$n R \sin \phi = \text{const.}$$

Если электромагнитный луч будет распространяться в плоскостой атмосфере, в которой коэффициент преломления изменяется постепенно, то будет происходить плавное искривление траектории луча.

Как уже было показано ранее, радиус кривизны радиолуча в атмосфере  $\rho$  определяется величиной градиента коэффициента преломления в соответствии с выражением

$$\rho = -\frac{1}{dn/dh}$$

где  $dn/dh$  – вертикальный градиент коэффициента преломления.

Когда радиус кривизны радиолуча, направленного вдоль земной поверхности, равен радиусу кривизны земной поверхности, луч огибает земной шар. Такая рефракция называется **критической рефракцией**.

Условием критической рефракции будет

$$\frac{dn}{dh} = -\frac{1}{R_3} = -15.7 \cdot 10^{-8}$$

где  $[dn/dh] = 1/\text{м}$ ,  $R_3$  – радиус Земли.

Учет явления радиорефракции  
**необходим:**

- при определении высоты объектов над земной поверхностью, измеренной радиолокационным методом;
- при определении предельной дальности обнаружения метеообъектов.



# **Методы учета радиорефракции**

Различают два основных метода учета радиорефракции в атмосфере:

- метод эквивалентного радиуса Земли;
- метод приведенного коэффициента преломления.

# **Метод эквивалентного радиуса Земли**

**Метод эквивалентного радиуса** сводит задачу криволинейного распространения радиоволн к задаче с прямолинейным распространением.

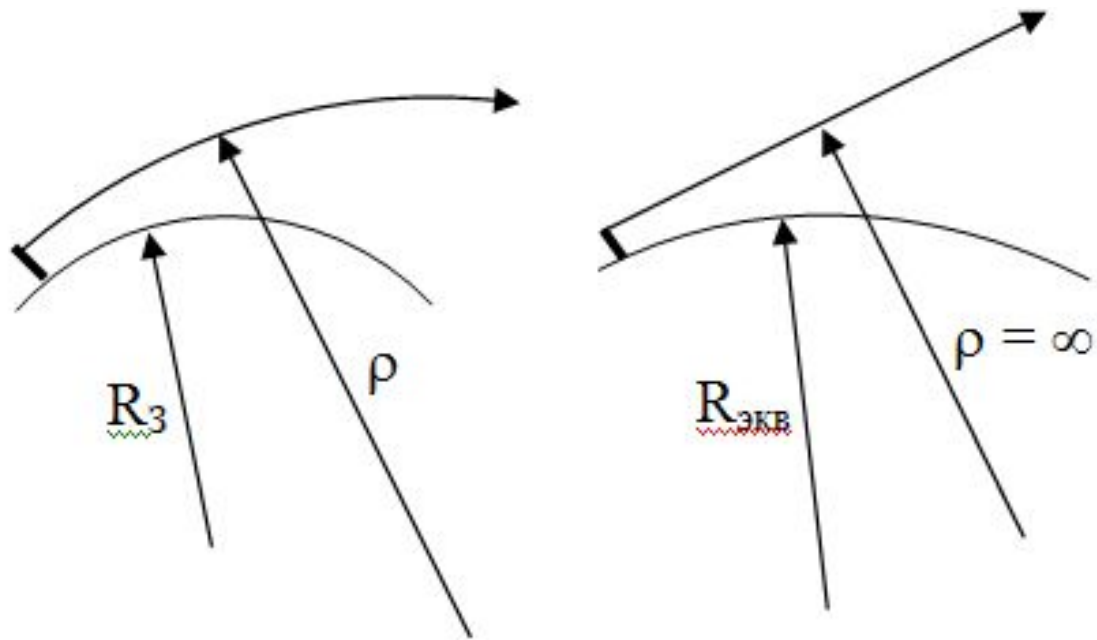
Для этого криволинейную траекторию луча как бы “разгибают”, изменяя радиус Земли до тех пор, пока траектория луча не станет прямолинейной.

Полученный таким образом радиус сферы называют **эквивалентным радиусом Земли  $R_э$** .

Определим эквивалентный радиус для случая, когда:

- вертикальный градиент коэффициента преломления постоянен,

- луч первоначально направлен под углом  $\phi_0$  к вертикали.



К определению эквивалентного радиуса Земли

Для двух точек, одна из которых расположена на земной поверхности, а вторая – на высоте  $H$ , на основании соотношения

$$n R \sin \phi = \text{const}$$

можно записать

$$n_0 R_3 \sin \phi_0 = n (R_3 + H) \sin \phi ,$$

где  $n_0$  и  $n$  – значения коэффициента преломления на уровне земной поверхности и на высоте  $H$  соответственно.

Из последнего выражения выразим значение  $\sin \phi_0$  для двух случаев: при отсутствии рефракции и при ее наличии.

**Случай 1:** рефракция отсутствует.

В этом случае всегда  $n = n_0$  и из уравнения

$$n_0 R_3 \sin\phi_0 = n_0 (R_3 + H) \sin\phi$$

получаем

$$R_3 \sin\phi_0 = R_3 \sin\phi + H \sin\phi$$

Или

$$\sin\phi_0 = [1 + H/R_3] \sin\phi$$



## Случай 2: присутствует рефракция.

В этом случае  $n \neq n_0$  и значение коэффициента преломления атмосферы на высоте  $H$  связано с его приземным значением  $n_0$  соотношением (линейное приближение)

$$n = n_0 + \frac{dn}{dh} H.$$

Поэтому соотношение

$$n_0 R_3 \sin \varphi_0 = n (R_3 + H) \sin \varphi$$

может быть теперь

$$R_3 \sin \varphi_0 = \left( 1 + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh} H \right) (R_3 + H) \sin \varphi$$

Перепишем последнее соотношение как

$$\sin \varphi_0 = \left( 1 + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh} H + \frac{H}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{H^2}{R_3} \frac{dn}{dh} \right) \sin \varphi$$

Теперь учтем (для пренебрежения последним слагаемым в скобках), что

$$\frac{H}{R_3} \ll 1 \qquad \frac{dn}{dh} \ll 1$$

Теперь для учета радиорефракции получаем следующее приближенное выражение

$$\sin \varphi_0 = \left[ 1 + H \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh} \right) \right] \sin \varphi$$

Сравним выражения для  $\sin\phi_0$  при отсутствии и наличии рефракции (для случаев 1 и 2):

- случай 1

$$\sin\phi_0 = [1 + H(1/R_3)] \sin\phi$$

- случай 2

$$\sin\phi_0 = \left[ 1 + H \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh} \right) \right] \sin\phi$$

После сравнения двух уравнений можно заметить, что они совпадают друг с другом при условии, что в последнем уравнение вместо  $R_3$  следует подставить так называемый эквивалентный радиус  $R_э$  (учитывающий наличие градиента коэффициента преломления)

$$\frac{1}{R_э} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh}$$

Последнее уравнение и есть определение эффективного радиуса  $R_э$ .

Тогда

$$\sin \varphi_0 = \left[ 1 + H(1/R_э) \right] \sin \varphi$$

**Определение  
дальности радиовидимости  
при наличии радиорефракции  
с использованием  
метода эквивалентного радиуса  
Земли**

Введенное понятие эквивалентного радиуса позволяет, в частности, определить **дальность радиовидимости**  $R_{пр}$ , т.е. такое расстояние до объекта, при котором еще возможно его «визуальное» обнаружение (объект не находится в зоне радиотени).

Для нулевых углов возвышения  $R_{пр}$  определяется следующим выражением

$$R_{пр} = \sqrt{2R_{\vartheta}} \left( \sqrt{H} + \sqrt{h^*} \right),$$

где  $h^*$  – высота антенны радиолокатора над поверхностью,  $H$  – высота объекта над поверхностью.

В условиях нормальной рефракции  $R_{\vartheta} = 8548$  км и

$$R_{пр} \text{ (км)} = 4.1 \left( \sqrt{H \text{ (м)}} + \sqrt{h^* \text{ (м)}} \right).$$

# **Определение высоты объектов**

**при использовании для учета  
радиорефракции метода  
эквивалентного радиуса Земли**

**Реальная высота  $H$**  объектов в атмосфере может быть найдена только путем введения соответствующей **поправки на радиорефракцию**, зависящей от вертикального угол радиолуча и расстояния до объекта.

С учетом рефракции реальная высота объекта  $H$  определяется по следующей формуле

$$H = L \sin\delta + \xi L^2 + h,$$

где  $h$  – высота антенны радиолокатора над поверхностью,  $L$  – расстояние до объекта,  $\delta$  – вертикальный угол радиолуча,  $\xi$  – коэффициент, который для условий **нормальной** рефракции равен  $6 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}$ .



# **Метод приведенного коэффициента преломления**

**Использование метода приведенного коэффициента преломления** позволяет рассматривать распространение луча **над плоской поверхностью**.

При этом влияние кривизны земной поверхности и кривизны сферической слоистой атмосферы учитываются за счет введения дополнительного значения коэффициента преломления атмосферы:  $\Delta n$ . Таким образом, задача построения траектории луча сводится к построению траектории над плоской поверхностью при для профиля приведенного коэффициента преломления

$$n_{\text{прив}}(H) = n(H) + \Delta n(H),$$

где  $H$  – высота.

С помощью **приведенного коэффициента преломления** криволинейная траектория луча вместе с земной поверхностью **«разгибается»** до тех пор, пока сферическая поверхность Земли не превратится в плоскую. При этом луч будет иметь другую, по сравнению со сферической атмосферой, кривизну и его новая траектория как раз и будет определяться приведенным коэффициентом преломления.

Для получения аналитического выражения для задания приведенного коэффициента преломления вспомним, что для плоскопараллельной неоднородной атмосферы выполняется соотношение

$$n \sin\phi = \text{const},$$

а для сферической неоднородной атмосферы

$$n R \sin\phi = \text{const}.$$

В том случае, если нам удастся свести последнее соотношение к случаю плоскопараллельной атмосферы (убрав зависимость от  $R$ ), мы и получим метод приведенного коэффициента преломления.

Для этого снова обратимся к соотношению для сферической атмосферы для двух точек, одна из которых расположена на земной поверхности, а вторая – на высоте  $H$

$$n_0 R_3 \sin\phi_0 = n (R_3 + H) \sin\phi ,$$

где  $n_0$  и  $n$  – значения коэффициента преломления на уровне земной поверхности и на высоте  $H$  соответственно.

Перепишем это соотношение, разделив левую и правую его части на  $R_3$ :

$$n_0 \sin \phi_0 = (n R_3 / R_3 + n H / R_3) \sin \phi .$$

Учтем, что  $n \approx 1$ . Тогда

$$n R_3 / R_3 \approx n, \quad \text{и} \quad n H / R_3 \approx H / R_3 .$$

Отсюда получаем, что для любой высоты  $H$

$$n_0 \sin \phi_0 = (n + H / R_3) \sin \phi .$$

Сравнивая полученное уравнение

$$n_0 \sin\phi_0 = (n + H/R_3) \sin\phi$$

с уравнением

$$n \sin\phi = \text{const}$$

можно рассматривать распространение луча уже над плоской поверхностью, но при условии, что коэффициент преломления на каждой высоте  $H$  имеет значение не  $n$ , а **дополнительное** значение коэффициента преломления атмосферы:

$$\Delta n = H/R_3$$

Иными словами, теперь закон распространения будет иметь следующий вид (рефракция над плоской поверхностью):

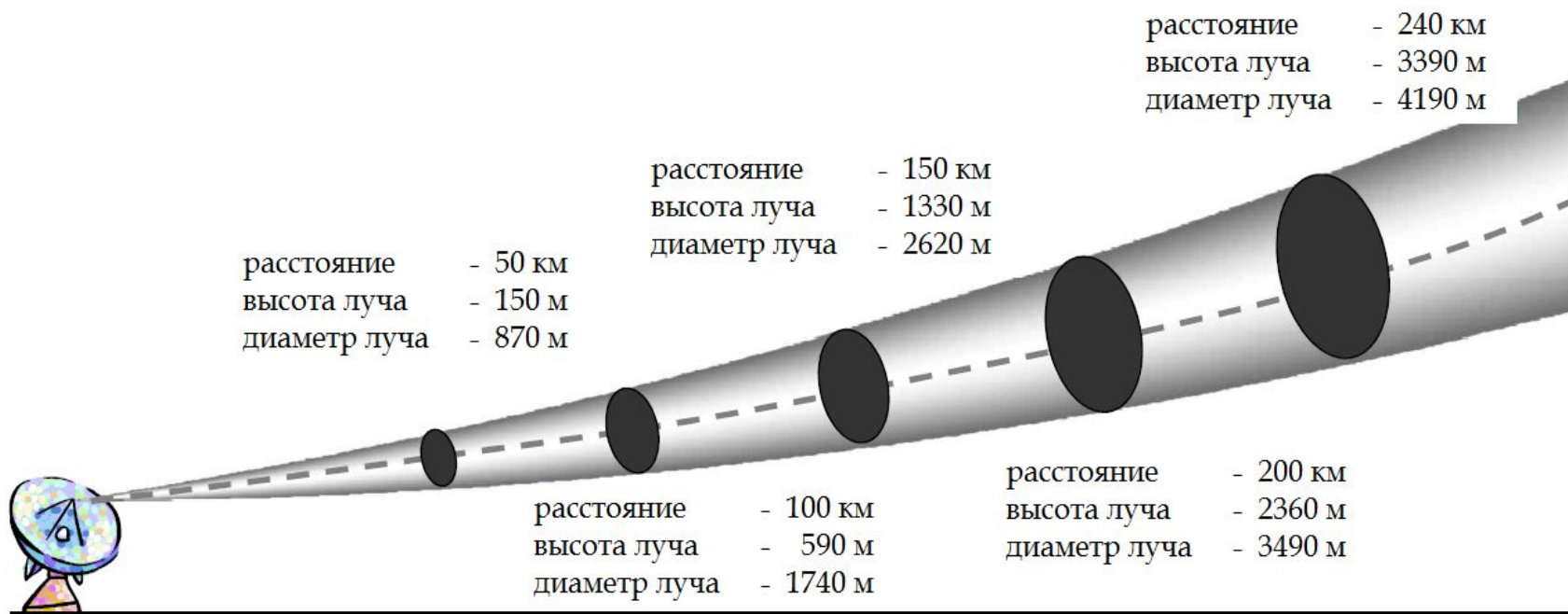
$$n_{\text{прив}} \sin\phi = \text{const},$$

где для любой высоты  $H$  при расчете траектории распространения вместо истинного значения коэффициента преломления  $n$  следует использовать его приведенное значение  $n_{\text{прив}}$  :

$$n_{\text{прив}} = n + H/R_3 .$$

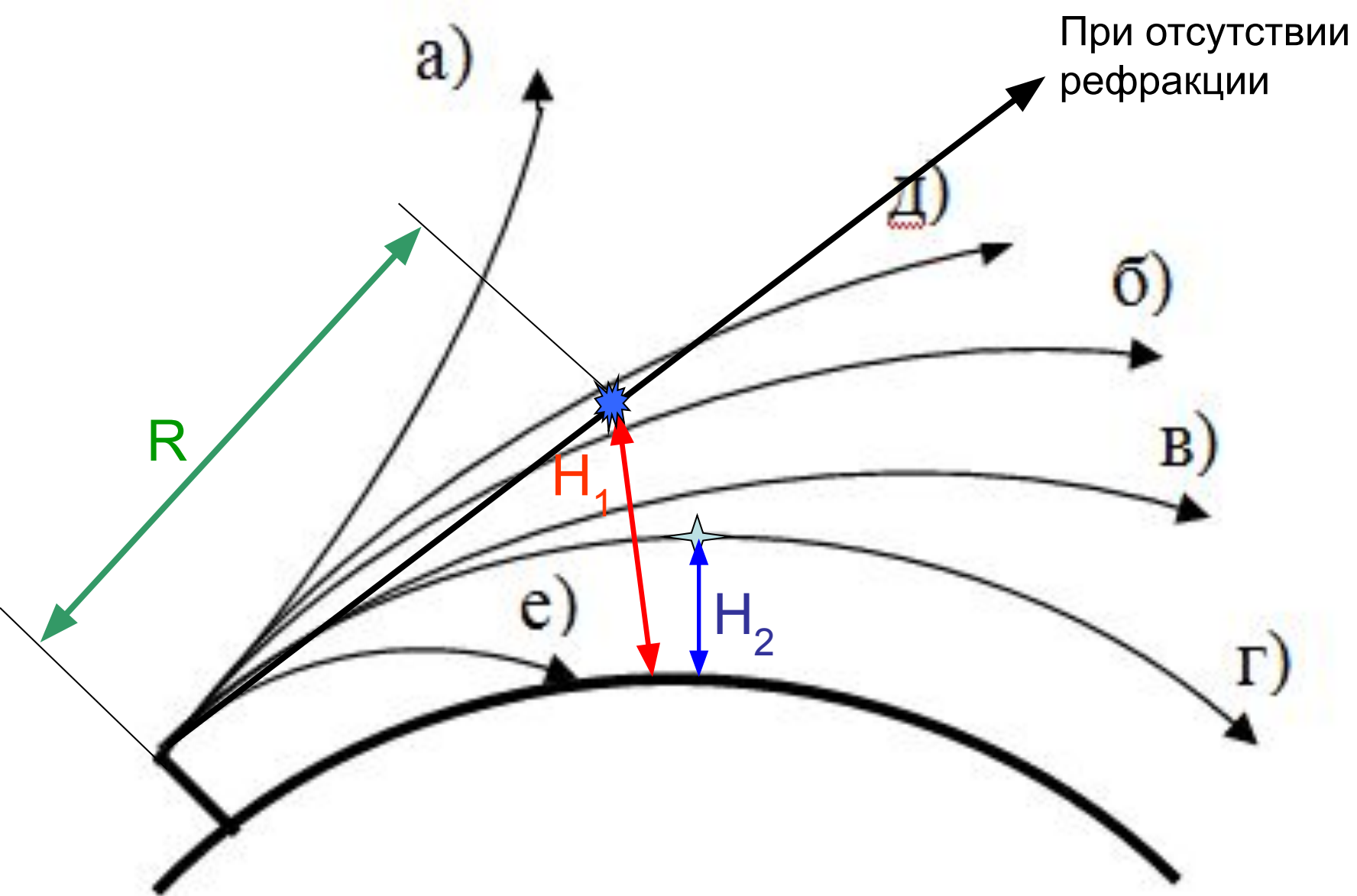


Влияние радиорефракции  
на  
работу МРЛ



Ширина луча - 1 градус,  
 высота ДМРЛ - 0 м.

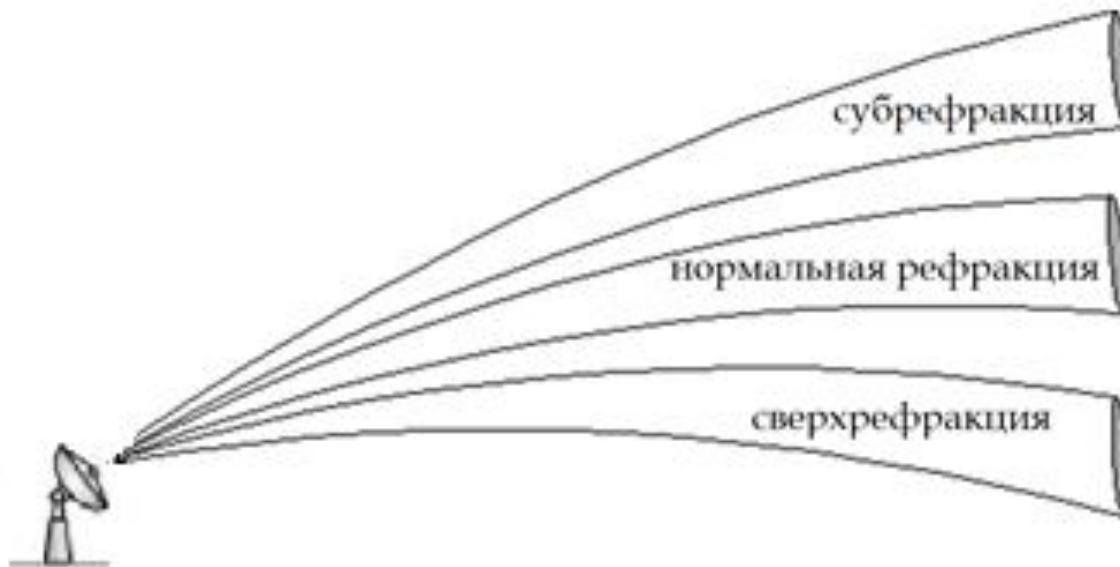
**Изменение траектории распространения и расширение радиолокационного луча с расстоянием от ДМРЛ (нормальная рефракция при «плоской» поверхности Земли).**



Влияние атмосферной рефракции на определение высоты отражающего объема



Какие будут вопросы ?



## Атмосферная рефракция