

Методы зондирования  
окружающей среды



# Ослабление электромагнитных волн в атмосфере

Профессор Кузнецов Анатолий Дмитриевич

Российский государственный  
гидрометеорологический университет

В процессе распространения электромагнитных волн в атмосфере происходит их **ослабление** из-за взаимодействия с атмосферными газами и гидрометеорами. При этом общее ослабление электромагнитных волн происходит вследствие двух процессов:

- **поглощения** электромагнитных волн, т. е. превращением электромагнитной энергии в тепловую;

- **рассеяния** электромагнитных волн, т.е. изменение частицей направления их распространения, что и приводит к ослаблению электромагнитной волны в направлении ее первоначального распространения.

**Ослабление = поглощение + рассеяние.**

**Ослабление** электромагнитных волн в земной атмосфере рассмотрим **в два этапа**.

**На первом этапе** рассмотрим ослабление радиоволн в атмосфере за счет **поглощения и рассеяния**:

Часть 1 - ослабление атмосферными газами.

Часть 2 - ослабление атмосферными гидрометеорами.

# Часть 1

## Ослабление электромагнитных волн атмосферными газами

В диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ - частоты: 6...10 ГГц;  $\lambda$ : 3 – 5 см) длина волны электромагнитных колебаний много больше размеров молекул ( $d \approx 10^{-8}$  см), поэтому эффектом **рассеяния радиоволн газами** тропосферы можно пренебречь.

Следовательно, при рассмотрении **ослабления радиоволн газами** тропосферы можно учитывать только эффект **поглощения**.

В свою очередь поглощение радиоволн атмосферными газами делится на **нерезонансное и резонансное поглощение**.

**Нерезонансное поглощение** вызывается затратой энергии воздействующего поля на преодоление сил трения между молекулами атмосферных газов, возникающими при вынужденном колебательном движении молекул под действием электромагнитного поля.

**Нерезонансное поглощение** атмосферными газами не избирательно (не селективно). Оно плавно меняется с изменением длины волны.

**Резонансное поглощение** атмосферными газами связано с тем, что по законам квантовой механики каждая молекула того или иного вещества может поглощать (или излучать) только свои собственные наборы квантов энергии или соответствующие им наборы (спектры) частот.

Из всех газовых составляющих атмосферы в радиодиапазоне свои собственные наборы квантов энергии или соответствующие им наборы частот (спектры), создающие резонансное поглощение, имеют только **молекулы кислорода и водяного пара.**

**Резонансное поглощение молекулами кислорода и водяного пара** возникает вследствие того, что эти молекулы имеют дипольный момент, с которым взаимодействует электромагнитная волна.

При совпадении частоты электромагнитной волны с одной из дискретных частот внутримолекулярных переходов (эти переходы имеют **строго определенный набор значений для каждого вида молекул**) происходит поглощение энергии внешнего поля, в результате чего молекула переходит в более высокое энергетическое состояние.

Поэтому резонансное поглощение селективно и **резко усиливается** в области резонансных частот.

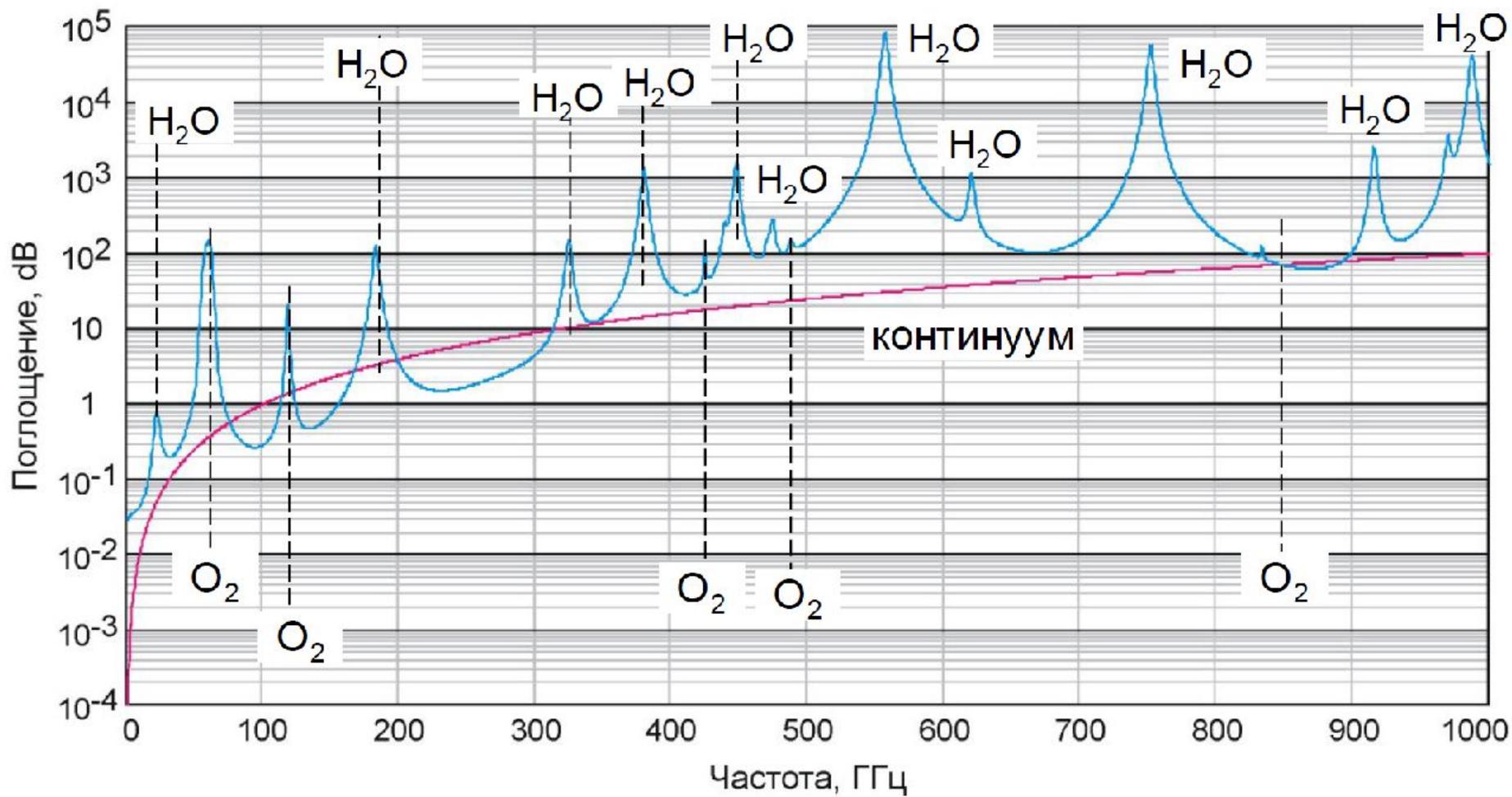


Так как в области частот, расположенных в районе **резонансного поглощения молекул кислорода и водяного пара**, происходит резкое увеличение поглощения электромагнитного излучения, то для активного радиометеорологического зондирования атмосферы такое увеличение поглощения является крайне нежелательным эффектом:

**сигнал сильно поглощается** как при распространении импульса от локатора до зондируемого облака, так и при распространении рассеянного излучения от облака до локатора.

У **кислорода** резонансная область лежит вблизи длин волн 0.5 и 0.25 см (60гГц и 120 гГц).

Резонансное поглощение у **водяного пара** наблюдается на длинах волн 0.16 и 1.35 см.



**Поглощение водяным паром и кислородом**

Сильное поглощение электромагнитного излучения в области резонансного поглощения приводит к тому, что в метеорологических радиолокаторах не используются длины волн, расположенные вблизи резонансных частот молекул кислорода и водяного пара.

По этой причине в дальнейшем рассмотрим лишь нерезонансное ослабление электромагнитных волн, т.е. ослабление на частотах, расположенных «вдали» от резонансных частот.

Нерезонансное ослабление  
электромагнитных волн молекулами  
кислорода

Ослабляющие свойства **кислорода** зависят от давления  $p$  и температуры  $T$ .

Для определения **коэффициента ослабления кислородом на некоторой высоте  $h$**  можно воспользоваться следующим соотношением

$$\alpha_{\text{К}}(\lambda, h) = \frac{p^2}{T^{5/2}} e^{-h/5.3}$$

Обозначим для  $h = 0$  км

$$\alpha_{\text{К}}(\lambda, 0) = \frac{p^2}{T^{5/2}}$$

Тогда для коэффициента ослабления кислородом в области нерезонансных частот можно записать

$$\alpha_{\text{К}}(\lambda, h) = \alpha_{\text{К}}(\lambda, 0) e^{-h/5.3}$$

Величина  $h_k = 5.3$  км называется **эффективной высотой слоя кислорода**. На этой высоте

$$\alpha_k(\lambda, 0) / \alpha_k(\lambda, h) = e,$$

т.е. эффективная высота слоя кислорода соответствует изменению его коэффициента ослабления в  $e$  раз.

Нерезонансное ослабление  
электромагнитных волн молекулами  
водяного пара

Ослабление **водяным паром** оказывается пропорциональным удельной влажности воздуха и увеличивается с понижением температуры.

Для расчетов коэффициента поглощения водяным паром **вне областей резонанса** обычно используется следующая зависимость:

$$\alpha_{\text{ВП}}(\lambda) = \frac{Q_p}{T^2} \left( \sqrt{T} + e^{-280/T} \right)$$

где  $Q_p$  – абсолютная влажность воздуха.

Учитывая, что абсолютная влажность так же, как давление и температура воздуха, уменьшаются с высотой, по аналогии с кислородом можно записать

$$\alpha_{\text{ВП}}(\lambda, h) = \alpha_{\text{ВП}}(\lambda, 0)e^{-h/2.1}$$

Величина  $h_{\text{ВП}} = 2.1$  км называется **эффективной высотой слоя водяного пара**.

# **Общее молекулярное ослабление электромагнитных волн**

Таким образом, профиль коэффициента поглощения энергии электромагнитного излучения вне области резонанса газами атмосферы в зависимости от высоты  $h$  может быть определен в соответствии с выражением

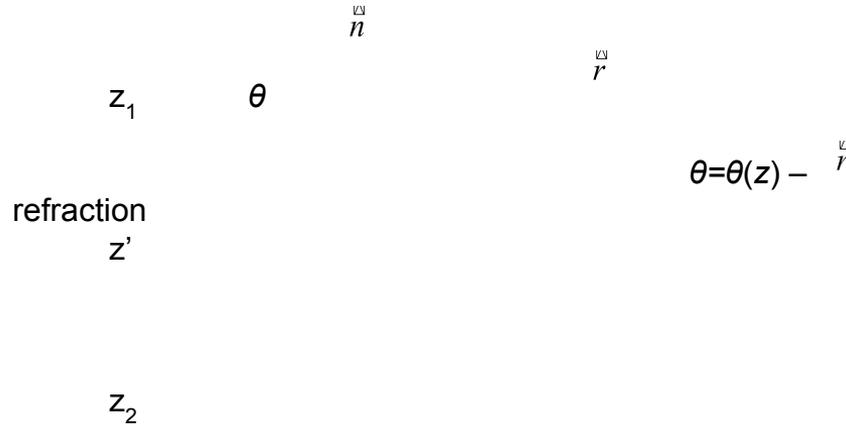
$$\begin{aligned}\alpha(\lambda, h) &= \alpha_{\text{К}}(\lambda, h) + \alpha_{\text{ВП}}(\lambda, h) = \\ &= \alpha_{\text{К}}(\lambda, 0)e^{-h/5.3} + \alpha_{\text{ВП}}(\lambda, 0)e^{-h/2.1}\end{aligned}$$

# **Интегральное поглощение электромагнитных волн на трассе конечной длины**

Introduce 2 characteristics for convenience :

**Optical thickness** of atmospheric layer at fixed angle  $\theta$  and at the wavelength  $\lambda$

**Transmission function** of atmospheric layer at fixed angle  $\theta$  and at the wavelength  $\lambda$



**Geometrical thickness**

$$\Delta s(z_2, z_1, \theta) = \frac{z_2 - z_1}{\cos \theta} \quad (4.5)$$

With taking into account the refraction:

$$\Delta s(z_2, z_1, \theta) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\cos \theta(z)} \quad (4.6)$$

It is to point out that the value **is always positive** for angles  $\theta \neq 90^\circ$ , and finite value of the difference  $z_2 - z_1$ .

## DEFINITIONS:

### 1. Optical thickness

$$\tau_{\lambda}(z_2, z_1, \theta) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho(x)k_{\lambda}(x)dx}{\cos \theta(x)}$$

The dimension of absorption coefficient is chosen for dimensionless optical thickness.

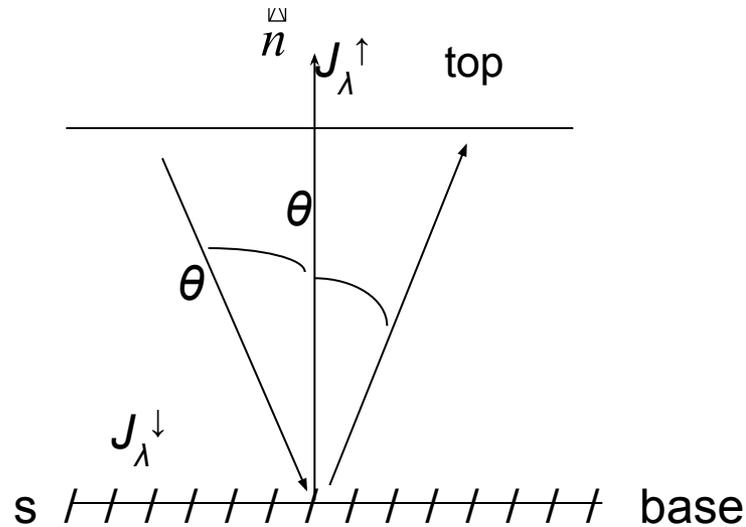
Properties:

$\tau_{\lambda} \in [0, \infty)$ , the equality  $\tau_{\lambda} = 0$  is possible for  $\rho(x) = 0$  or  $k_{\lambda}(x) = 0$

$\tau_{\lambda}$  might vary for fixed coordinates  $z_2, z_1$  and  $\theta$  provoked by only absorption coefficient  $k_{\lambda}(x)$

### 2. Transmission function

$$P_{\lambda}(z_2, z_1, \theta) = \exp[-\tau_{\lambda}(z_2, z_1, \theta)]$$



Boarder conditions for the equations (4.2):

It is valid for the upward radiance at the atmosphere base

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(z = 0, \theta) = \varepsilon_{\lambda} B[\lambda, T_s]$$

because the radiation is formed by the surface with the temperature  $T_s$ .

It is possible to neglect by the solar heat radiation comparing with the earth heat radiation because of small angle dimension of the Sun (0.5') at the atmosphere top

$$J_{\lambda}^{\downarrow}(z_{top}, \theta) = 0 \tag{4.10}$$

Ранее были получены выражения, позволяющие определить коэффициенты ослабления радиоволн кислородом и водяным паром на заданной высоте  $h$ :

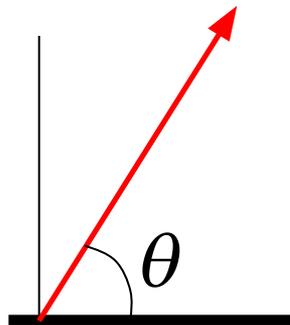
$$\alpha_{\text{к}}(\lambda, h) \quad \text{и} \quad \alpha_{\text{ВП}}(\lambda, h)$$

и общее ослабление радиоволн атмосферными газами на заданной высоте  $h$ :  $\alpha(\lambda, h)$ .

При распространении радиоволн по трассам конечной протяженности необходимо учесть ослабление радиоволн атмосферными газами в каждой точке трассы распространения и тогда результирующее ослабление (для плоскопараллельной атмосферы при распространении электромагнитной волны под вертикальным углом  $\theta$  к нормали и без учета рефракции) будет определяться **интегральным атмосферным поглощением** :

$$\tau_a(\lambda)$$
$$\tau_a(\lambda) = \int_0^H \alpha_a(\lambda, h) \frac{1}{\sin(\theta)} dh \approx \alpha_a(\lambda, h) H_a$$

где  $H_a$  – эквивалентная длина трассы поглощения.



Расчет поглощения газами атмосферы при распространении электромагнитного излучения по наклонным трассам в диапазоне вертикальных углов  $5^{\circ} \leq \Theta \leq 90^{\circ}$  производится с помощью выражений, учитывающих сферичность слоев атмосферы:

$$\tau_a(\lambda) = \alpha_K(\lambda, h) \cdot l_1 + \alpha_{ВП}(\lambda, h) \cdot l_2$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – эквивалентные длины путей, проходимых электромагнитной волной соответственно в сухой атмосфере и в водяном паре, приведенные к приземным условиям:

$$l_1 = \frac{5.3}{\sin \theta} \left( 1 - e^{-h/5.3} \right),$$

$$l_2 = \frac{2.1}{\sin \theta} \left( 1 - e^{-h/2.1} \right)$$

Интегральное поглощение **на вертикальной трассе** может быть определено с помощью соотношения вида

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{К}}(\lambda) + \tau_{\text{ВП}}(\lambda) = \alpha_{\text{К}}(\lambda, 0) \cdot h_{\text{К}} + \alpha_{\text{ВП}}(\lambda, 0) \cdot h_{\text{ВП}}$$

где  $h_{\text{К}}$  и  $h_{\text{ВП}}$  - эффективные высоты слоя кислорода и водяного пара.

Наряду с коэффициентами ослабления потери электромагнитной энергии в газах атмосферы можно учитывать с помощью **удельных коэффициентов ослабления** в кислороде ( $\gamma_k$ ) и в водяном паре ( $\gamma_{вп}$ ), характеризующих ослабление проходящей электромагнитной энергии **на единице расстояния.**

На длине волны около 3 см (рабочая длина волны радиолокаторов МРЛ-2, МРЛ-5 и доплеровского радиолокатора с двойной поляризацией METEOR 50DX) удельные коэффициенты ослабления имеют следующие значения:

- в кислороде удельный коэффициент ослабления равен 0.0072 дБ/км,

- в водяном паре при температуре 20<sup>0</sup>С и влажности 1 г/м<sup>3</sup> удельный коэффициент ослабления равен 0.00039 дБ/км.

**Ослабление мощности  
электромагнитной волны  
атмосферными газами на трассе  
конечной длины**

Мощность электромагнитной волны с учетом ослабления может быть определена с помощью выражения

$$P = P_0 \cdot 10^{-0.1\tau_A}$$

где  $P_0$  – мощность электромагнитной волны при отсутствии ослабления.

# Часть 2

## Ослабление электромагнитных волн атмосферными гидрометеорами

**На втором этапе** рассмотрим формирование того сигнала, который несет информацию об атмосферных образованиях при радиолокационном зондировании атмосферы с помощью МРЛ.

Для этого **на втором этапе** подробно рассмотрим **рассеяния радиоволн атмосферными образованиями.**

При этом полученные на первом этапе соотношения будут использоваться для описания процессов распространения генерируемых МРЛ радиоволн к метеорологическим образованиям и процесса распространения рассеянного этими образованиями радиоволн обратно к МРЛ.

Поглощение и рассеяние радиоволн гидрометеорами не является селективным (избирательным).

Количественные данные об ослаблении радиоволн гидрометеорами могут быть получены в результате решения электродинамической задачи о дифракции радиоволн на отдельной частице, имеющей, например, в простейшем случае форму шара.

**Ослабление гидрометеорами** при распространении электромагнитной волны происходит вследствие как поглощения, так и рассеяния энергии на гидрометеорных частицах.

Интенсивность процессов поглощения и рассеяния **для одной частицы** оценивают с помощью эффективных площадей поглощения ( $\sigma_{ni}$ ) и рассеяния ( $\sigma_{pi}$ ):

$$\sigma_{ni} = \frac{P_{\Pi}}{P} \qquad \sigma_{pi} = \frac{P_p}{P}$$

где  $P_{\Pi}$  и  $P_p$  — **мощности**, теряемые падающей электромагнитной волной вследствие поглощения и рассеяния соответственно;  $P$  — плотность потока мощности падающей на частицу электромагнитной волны.

Эффективные площади поглощения и рассеяния **сферических частиц** могут быть рассчитаны по **формулам Ми**, которые для случая малых частиц, удовлетворяющих условию  $\pi d/\lambda \ll 1$ , имеют следующий вид

$$\sigma_{ni} = \frac{\pi^2 d^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left( -\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad \sigma_{pi} = \frac{2\pi^5 d^6}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

где  $d$  – диаметр  $i$ -ой частицы,  $\lambda$  – длина волны,  $m$  – комплексный коэффициент преломления вещества частицы,  $\operatorname{Im}$  – мнимая часть стоящего в скобках комплексного числа,  $|\dots|$  – модуль комплексного числа.

Величины  $\sigma_{pi}$  и  $\sigma_{ri}$  в различной степени зависят от размеров частиц и длины волны падающего электромагнитного излучения. Для частиц малых размеров:

$$\sigma_{pi} \gg \sigma_{ri} ,$$

т.е. **эффективная площадь полного ослабления** практически определяется **лишь эффективной площадью поглощения.**

Для практических расчетов полагают, что для воды при  $0^{\circ}\text{C}$  и  $\lambda \approx 3$  см

$$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \approx 0.930$$

и при  $0^{\circ}\text{C}$  и  $\lambda \approx 10$  см

$$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \approx 0.934$$

Для льда при любых температурах

$$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \approx 0.197$$

**Для воды** величина мнимой части, т.е.

$$\text{Im}\left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right)$$

при  $0^\circ\text{C}$  и  $\lambda \approx 3$  см равна 0.0335 ,

а при  $0^\circ\text{C}$  и  $\lambda \approx 10$  см равна 0.1102.

**Для льда** величина мнимой части равна  $9.6 \cdot 10^{-4}$ .

Величины, определяющие потери мощности на пути в 1 км, представляют собой удельные коэффициенты поглощения ( $\gamma_{\text{п}}$ ) и удельные коэффициенты рассеяния ( $\gamma_{\text{р}}$ ), имеющие размерность в дБ/км:

$$\gamma_{\text{п}} = 4.34 \cdot 10^3 N \sigma_{\text{пi}} ,$$

$$\gamma_{\text{р}} = 4.34 \cdot 10^3 N \sigma_{\text{рi}} .$$

Если потери на поглощение и рассеяние электромагнитной энергии суммировать, то полное ослабление можно оценить удельным коэффициентом полного ослабления

$$Y_{\Sigma} = Y_{\text{п}} + Y_{\text{р}} = 4.34 \cdot 10^3 N \sigma_{\Sigma i} ,$$

где  $\sigma_{\Sigma i} = \sigma_{\text{п}i} + \sigma_{\text{р}i}$  — эффективная площадь полного ослабления одной частицей.

# Часть 3

Ослабление  
электромагнитных волн  
атмосферными  
образованиями:  
облака, туманы, дождь,  
град

Удельное ослабление  
электромагнитных волн  
в дожде

**Ослабление в дожде** обычно рассчитывают не по функции распределения капель по размерам, а по его интенсивности  $I$ , выраженной в мм/ч.

Для наиболее типичных законов распределения капель по размерам в дождях различной интенсивности коэффициент удельного ослабления определяют с помощью следующей эмпирической формулы

$$\gamma = \beta I^\alpha$$

где  $\gamma$  - коэффициент ослабления в дожде, выраженный в дБ/км,  $I$  - интенсивность дождя в мм/ч,  $\alpha$  и  $\beta$  - эмпирические коэффициенты.

Следует отметить, что указанная зависимость между удельным коэффициентом ослабления и интенсивностью дождя является усредненной. Могут иметь место случаи, когда дожди с одинаковой интенсивностью будут давать различное ослабление.

Значения эмпирических коэффициента могут варьировать в очень широких пределах в зависимости от региона, сезона и синоптической ситуации.

Для нашего региона можно задать следующие средние значения этих коэффициентов:  $\alpha$  составляют 1.31 при  $\lambda \approx 3$  см и 1.00 при  $\lambda \approx 10$  см, а коэффициента  $\beta$  — 0.0074 и 0.0003, соответственно.

Удельное ослабление  
электромагнитных волн  
в облаках и туманах

**Ослабление в облаках и туманах** можно рассчитать, пользуясь такой характеристикой этих образований, как их **водность  $W$** .

В случае **монодисперсного образования** со сферическими частицами водность  $W$  определяется следующим соотношением

$$W = N \frac{\pi d^3}{6} \rho$$

где  $N$  – количество частиц в  $1 \text{ м}^3$ ;  $\rho$  – плотность вещества;  $d$  – диаметр частиц.

Для капельно-жидких облаков и туманов ( $\rho = 1$ ) удельный коэффициент полного ослабления электромагнитного излучения определяется формулой

$$\gamma_{\Sigma} = \left[ 0.43 \frac{6\pi}{\lambda} \operatorname{Im} \left( -\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] W$$

В диапазоне длин волн, используемых в метеорологических радиолокационных станциях, величина стоящего в квадратных скобках множителя обратно пропорциональна  $\lambda$ , поэтому последняя формула может быть представлено в упрощенном виде

$$\gamma_{\Sigma} = 0.438 \frac{W}{\lambda^2}$$

Поскольку одной из основных характеристик тумана является оптическая дальность видимости  $D$  (в метрах), связанная с водностью соотношением

$$W = 9286 D^{-1.43}$$

то дальность видимости может использоваться в качестве параметра при определении удельного коэффициента ослабления электромагнитной волны

$$\gamma = 4067 \frac{D^{-1.43}}{\lambda^2}$$

Удельное ослабление  
электромагнитных волн  
в граде и снеге

**Ослабление в граде и снеге** составляет всего несколько процентов ослабления в дожде той же интенсивности, что обусловлено малым значением множителей

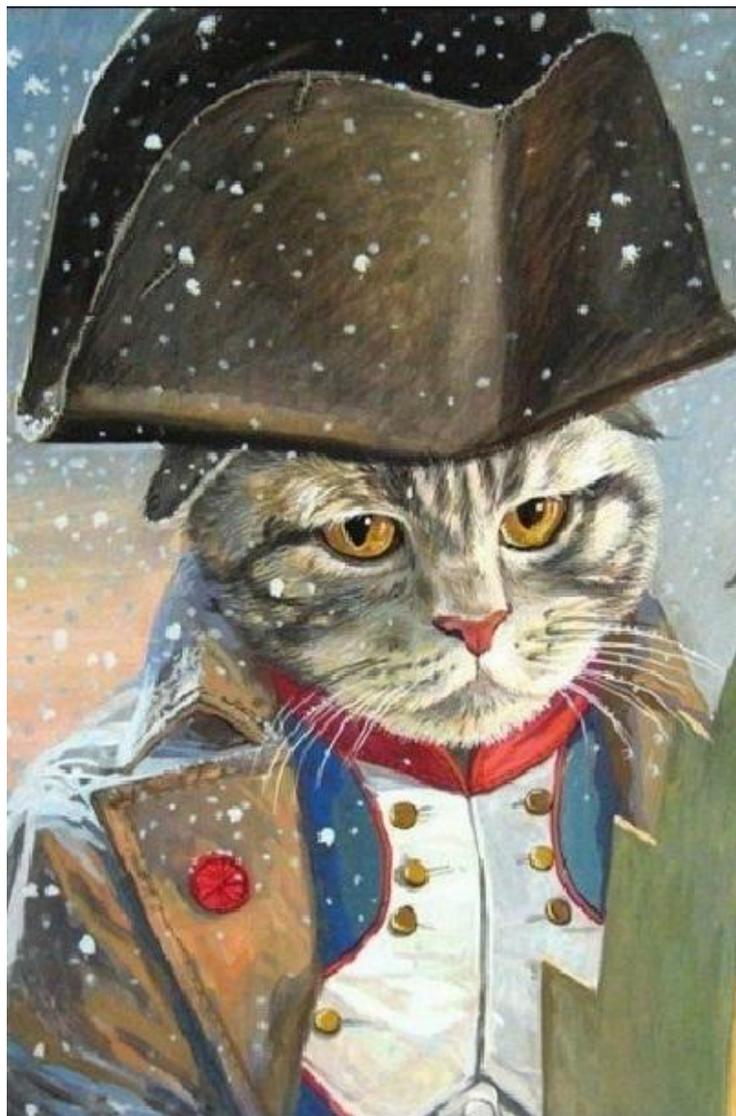
$$\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad \text{и} \quad \text{Im} \left( -\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$$

Поэтому, если интенсивность града не очень велика, **ослаблением в граде** в диапазоне длин волн от 3 до 10 см можно пренебречь.

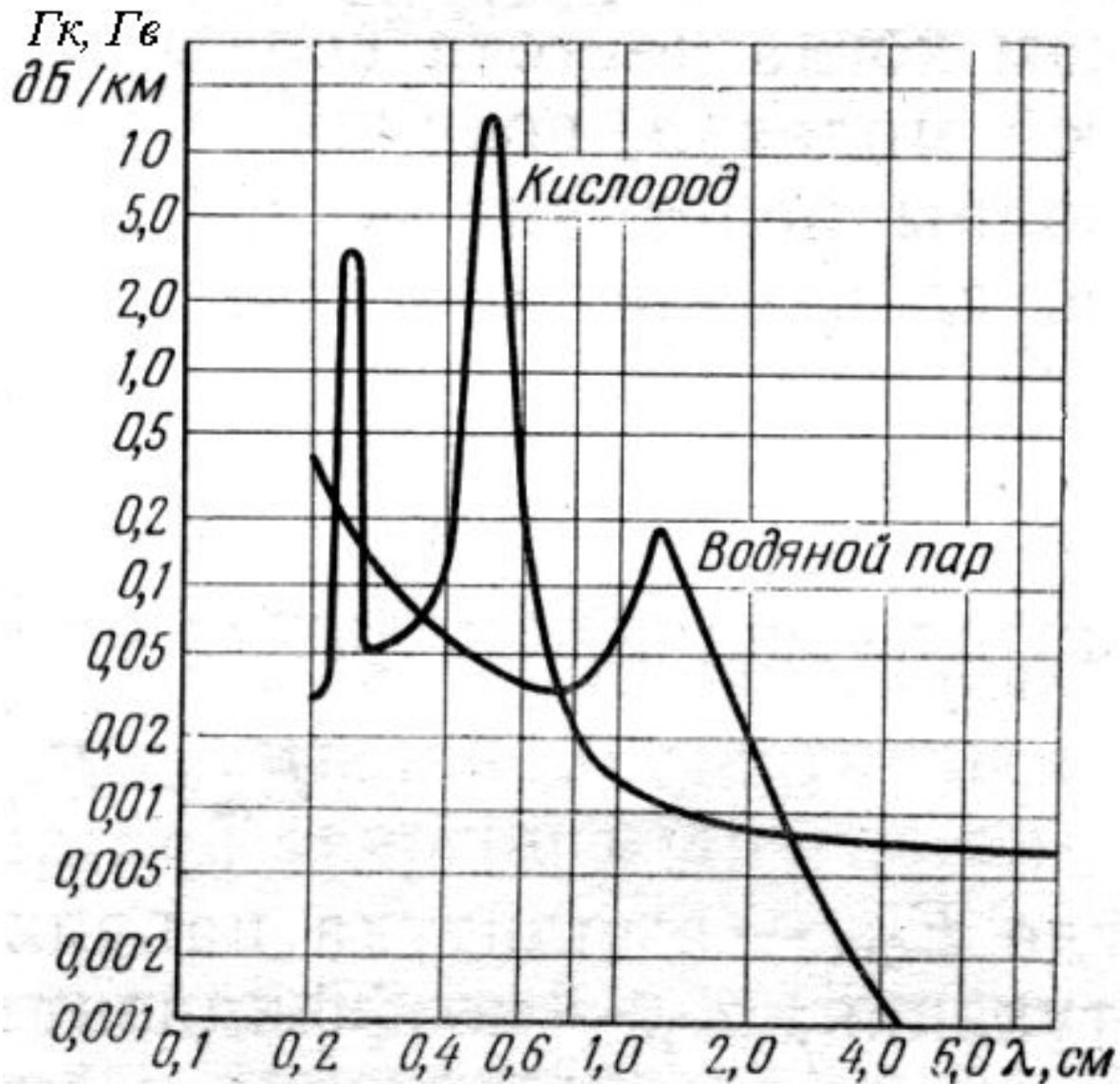
Что касается **ослабления в снеге**, то в случае сухого снега ослабление также пренебрежимо мало. Если снег мокрый, то ослабление электромагнитной волны в нем такое же, как и в дожде той же интенсивности.

# Использованные термины

1. Ослабление, поглощение, рассеяние.
2. Ослабление атмосферными газами.
3. Ослабление гидрометеорами.
4. Резонансное и нерезонансное поглощение кислородом и водяным паром.
5. Коэффициент ослабления кислородом и водяным паром.
6. Коэффициент общего ослабления атмосферными газами.
7. Интегральное поглощение электромагнитных волн атмосферными газами на трассе конечной длины.
8. Ослабление электромагнитных волн атмосферными образованиями: облака, туманы, дождь, град.



Какие будут вопросы ?



Водяной пар имеет полосы поглощения с центрами поглощения вблизи частот 22, 183 и 320 ГГц, а кислород - вблизи частот 60 и 120 ГГц.