

# Методы зондирования окружающей среды



# ОСНОВЫ радиолокационного зондирования атмосферы

Профессор Кузнецов Анатолий Дмитриевич

Российский государственный  
гидрометеорологический университет

При радиометеорологическом зондировании атмосферы с помощью метеорологических радиолокационных станций (МРЛ) могут использоваться:

- одноволновой метод,
- двухволновой метод.

**Одноволновой  
метод  
радиолокационного  
зондирования атмосферы**

**Одноволновой метод** - это такая схема проведения активного дистанционного радиолокационного зондирования, при котором МРЛ генерирует и регистрирует электромагнитное излучение строго на одной длине волны.

Этот метод зондирования основывается на измерении радиолокационной отражаемости метеорологических объектов.

В основе одноволнового метода лежит использование **уравнения дальности** радиолокационного наблюдения метеорологических объектов. Это же уравнение носит название **основного уравнения радиолокации метеорологических объектов**.

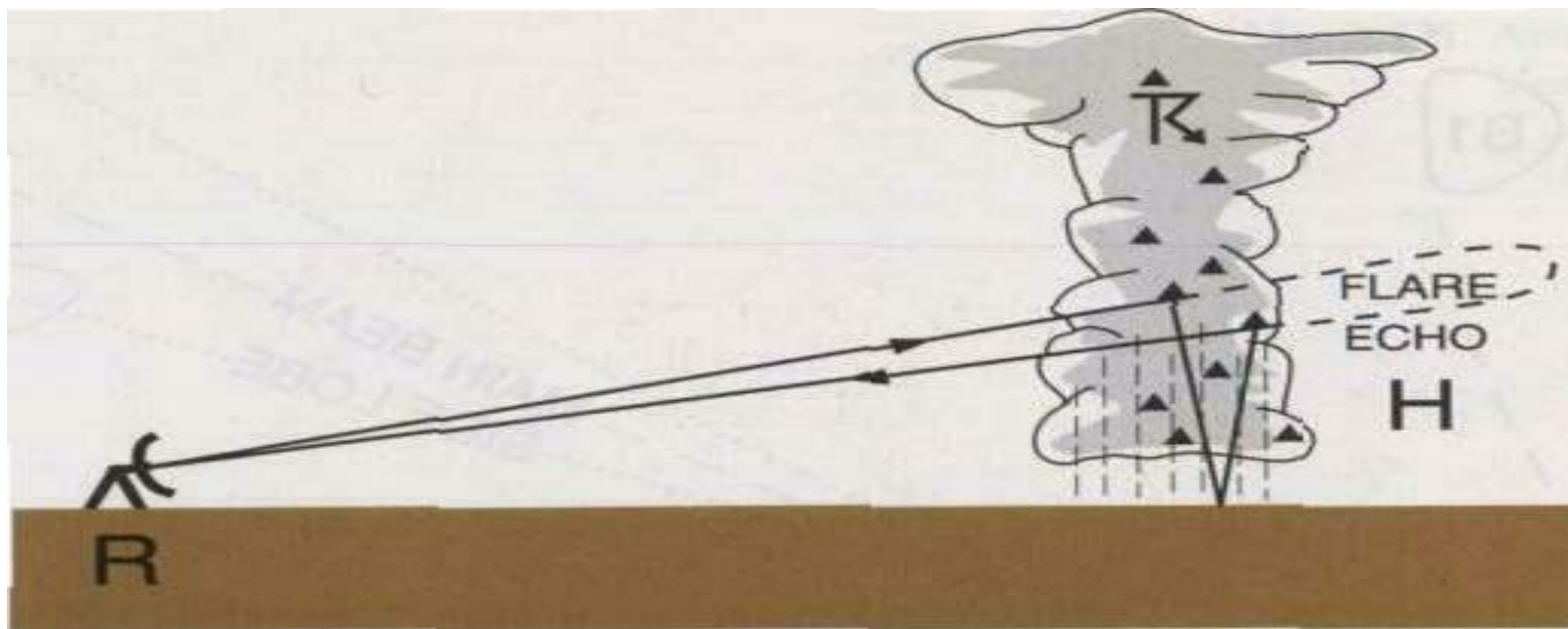
Основное уравнение радиолокации метеорологических объектов связывает между собой:

- технические характеристики используемой РЛС,
- характеристики метеорологических объектов, определяющие их отражающие свойства,
- возможную дальность обнаружения метеорологических объектов.

Вывод **основного уравнения радиолокации** метеорологических объектов проведем для:

- моностатической радиолокационной системы, когда одна и та же антенна работает в режиме излучения и приема;

- одноволнового метода, когда МРЛ работает на одной длине волны.



# **Часть 1.**

**Одиночная цель - отдельная частица**

Рассмотрим при ряде упрощающих предположений формирование регистрируемого МРЛ ответного сигнала, рассеянного от отдельной частицы с известной эффективной площадью рассеяния  $\sigma$ , находящейся на расстоянии  $R$  от радиолокатора с антенной диаметром  $D$ .

При этом напомним, что эффективная площадь рассеяния частицы  $\sigma$  равна

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_2}{P_1}$$

где

$P_1$  - плотности потоков мощности электромагнитной волны в точке расположения частицы;

$P_2$  - плотности потоков мощности рассеянной электромагнитной волны в точке расположения МРЛ;

$R$  - расстояние от МРЛ до частицы.

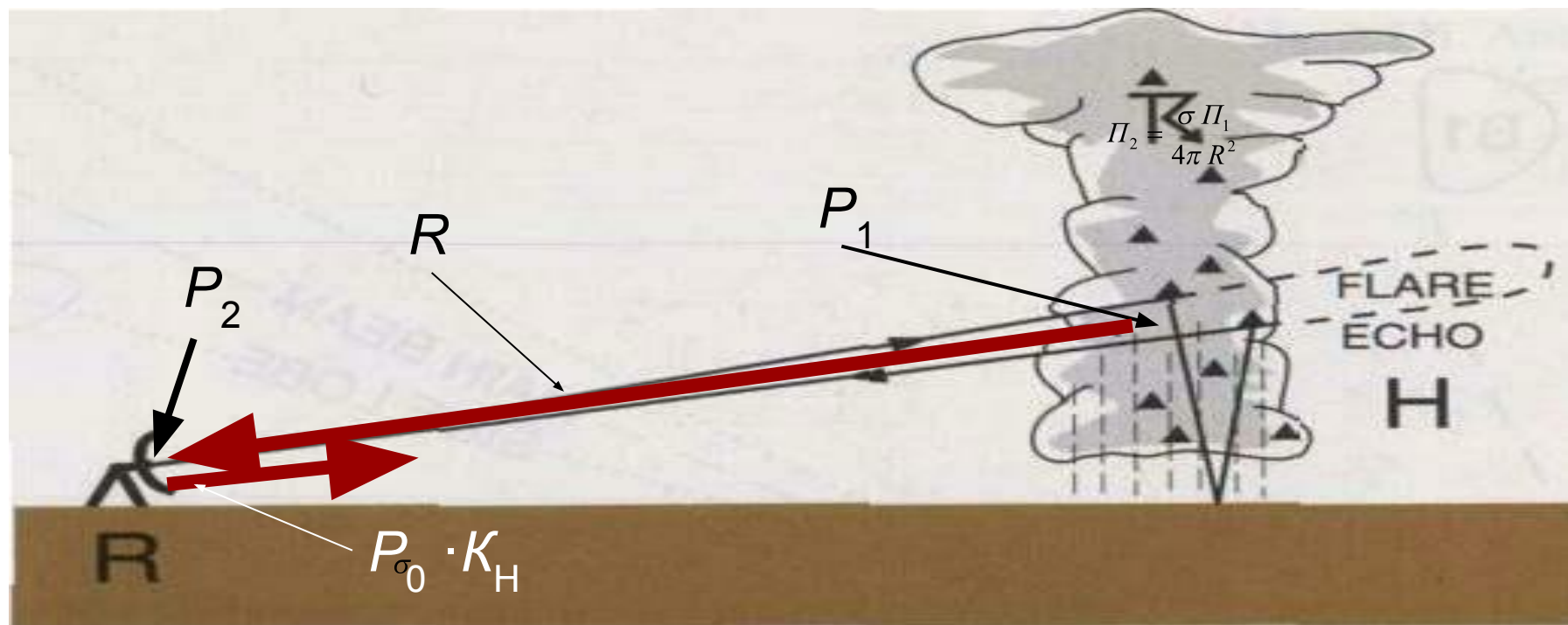
$$P_2 = \frac{\sigma P_1}{4\pi R^2}$$



$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_2}{P_1}$$



$$P_2 = \frac{\sigma P_1}{4\pi R^2}$$



**Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) .**

Пусть  $P_1$  - плотность потока мощности электромагнитной волны от МРЛ в точке нахождения частицы. Если обозначить  $P_0$  - мощность передатчика МРЛ и  $K_H$  - коэффициент направленного действия антенны, то для  $P_1$  в точке, находящейся на расстоянии  $R$  от МРЛ можно записать

$$P_1 = \frac{P_0}{4\pi R^2} K_H$$

По определению эффективной площади рассеяния  $\sigma$  от прошедшего импульса общее количество рассеянной во все стороны от частицы энергии будет равно

$$\sigma \cdot P_1 .$$

При равномерном рассеянии во все стороны вся эта энергия равномерно распространится по поверхности сферы, площадь которой в точке расположения МРЛ будет равна  $4\pi R^2$ . При этом на единицу площади будет приходиться поток излучения, равный

$$B \cdot P_1 / (4\pi R^2).$$

При диаметре антенны  $D$  площадь её поверхности будет равна  $\pi \cdot D^2/4$ . Следовательно, общее количество энергии  $P_2$ , принятой антенной, будет равно

$$P_2 = P_1 \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{\pi D^2}{4}$$

где

$\sigma$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) частицы метеорологической цели,

$D$  – диаметр антенны,

$P_1$  – плотности потока мощности падающей (в точке расположения частицы) электромагнитной энергии,

$R$  – расстояние от МРЛ до частицы.

Здесь приняты **два упрощения**.

**Первое упрощение** - чтобы получить поток излучения на антенну, необходимо, вообще говоря, проинтегрировать сигнал по площади раскрыва антенны в пределах телесного угла, под которым видна цель. Учитывая, что при радиолокации метеорологических целей этот телесный угол весьма мал, можно пренебречь зависимостью ЭПР метеоцели от направления, под которым она просматривается, и заменить интегрирование умножением плотности потока мощности на величину площади раскрытия антенны.

**Второе упрощение** связано с заменой эффективного диаметра антенны геометрическим.

С учетом введенного ранее определения мощности передатчика  $P_0$  и коэффициента направленного действия антенны в режиме излучения ( $K_H$ ) выражение для  $P_1$  можно переписать в следующем виде

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\pi D^2 K_H}{4 (4 \pi R^2)^2} \sigma$$

где, как было показано ранее, в приближении Релеевского рассеяния

$$\sigma = \frac{2^6 \pi^5 a^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

Антенна

$R$



Облучатель



Частица (цель)

Место	Характеристика	Плотность потока мощности
Облучатель	Импульс от передатчика	$P_0$
Антенна	Импульс в сторону цели	$P_0 \cdot K_H$
Цель	Падающая мощность	$P_0 \cdot K_H / (4\pi R^2)$
Цель	Общая рассеянная мощность	$\sigma \cdot P_0 \cdot K_H / (4\pi R^2)$
Антенна	Пришедшая к антенне рассеянная целью мощность	$\sigma \cdot P_0 \cdot K_H / (4\pi R^2) / (4\pi R^2)$
Облучатель	Принятая для приемника мощность	$S_a \cdot \sigma \cdot P_0 \cdot K_H / (4\pi R^2) / (4\pi R^2)$

При этом одиночная цель может быть обнаружена, если информационный сигнал  $P_1$  надежно выделяется как на фоне сигналов от других целей, так и на фоне собственных шумов МРЛ:  $P_{ш}$

$$\frac{P_1}{P_{ш}} > k_p$$

где  $k_p > 1$  и

$$P_1 = P_0 \frac{\pi D^2 K_H}{4 (4 \pi R^2)^2} \sigma$$



## **Часть 2.**

**Пространственно-распределенные  
метеорологические цели - ансамбль  
частиц**

Чтобы получить мощность отраженного сигнала (*радиоэха*) от ансамбля частиц, представляющих метеорологический объект, необходимо **просуммировать** информационные сигналы от всех частиц, расположенных в импульсном отражающем объеме метеорологического объекта  $V_u$ , который может быть определен с помощью соотношения

$$V_u = \frac{c\tau}{2} \pi \left( \frac{\theta}{2} R \right)^2$$

где

$\tau$  – длительность зондирующего импульса,

$c$  – скорость распространения электромагнитной энергии в атмосфере,

$\theta$  – ширина диаграммы направленности антенны МРЛ.

Например, если

$$R = 40 \text{ км}, \quad \theta = 0,5, \quad \tau = 1 \text{ мкс},$$

то отражающий объем в облаке будет равен  $1,43 \times 10^7 \text{ м}^3$ , а эхосигнал будет создаваться  $10^{10}$  частицами (при средней концентрации – несколько сотен частиц в  $1 \text{ м}^3$ ).

В этом случае величина отраженного сигнала (радиоэха) будет определяться следующим выражением

$$P_{\Pi} = V_C \int_0^{\infty} P_1(\sigma_i) N(\sigma_i) d\sigma_i$$

где  $P_1(\sigma_i)$  - плотности потоков мощности электромагнитной волны в точке расположения  $i$ -ой частицы, а интегрирование (суммирование) ведется по всему ансамблю частиц с различными значениями  $\sigma_i$ , заключенных в импульсным отражающим объемом  $V_u$ .

Для получения зависимости  $P_{\Pi}$  от удельной ЭПР  $\eta$  разложим функцию  $P_1(\sigma_i)$  в ряд Тейлора

$$P_1(\sigma_i) = P_1(\sigma_0) + \frac{\partial P_1(\sigma_i)}{\partial \sigma_i} (\sigma_i - \sigma_0) + \dots$$

Теперь положим, что и  $\sigma_0 = 0$  и учтем (как было показано ранее для одной частицы), что

$$P_1 = P_0 \frac{\pi D^2 K_H}{4(4\pi R^2)^2} \sigma_i$$

Тогда

$$\frac{\delta P_1}{\delta \sigma_i} = P_0 \frac{\pi D^2 K_H}{4(4\pi R^2)^2}$$

и, следовательно,  $\frac{\partial P_1}{\partial \sigma_i}$  не зависит от  $\sigma_i$

Тогда учитывая, что по определению

$$\eta = \int_0^{\infty} N(\sigma_i) \sigma_i d\sigma_i$$

для  $P_{\Pi}$  получаем

$$P_{\Pi} = V_C \int_0^{\infty} P_1(\sigma_i) N(\sigma_i) d\sigma_i = V_C \frac{\partial P_1}{\partial \sigma_i} \int_0^{\infty} N(\sigma_i) \sigma_i d\sigma_i = V_C \frac{\partial P_1}{\partial \sigma_i} \eta$$

Здесь учтено, что  
следовательно,

$\frac{\partial P_1}{\partial \sigma_i}$  не зависит от  $\sigma_i$  и,

может быть вынесено за знак интеграла, а так же тот факт, что  $P_1(\sigma_0) = 0$ .

Подставив вместо  $\frac{\partial P_1}{\partial \varphi_i} V_{\text{и}}$  соответствующие выражения, получаем **уравнение радиолокации пространственно метеорологического объекта** **распределенного**

$$\frac{P_{\text{П}}}{P_0} = \frac{D^2 c \tau \theta^2}{2 \cdot 4^4} K_{\text{Н}} \frac{\eta}{R^2}$$

В метеорологических РЛС, как правило, применяются антенны с осесимметричными диаграммами направленности.

Для антенны с осесимметричными диаграммами направленности коэффициент направленного действия с шириной диаграммы направленности  $\theta$  можно приближенно считать, что

$$K_n \approx 16 / \theta^2 .$$



Подставляя последнее соотношение в уравнение радиолокации пространственно распределенного метеорологического объекта, получаем:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_0} = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2} D^2 c \tau \frac{\eta}{R^2}$$

Если ввести **постоянную радиолокатора**  $C_{РЛ}$ :

$$C_{РЛ} = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2} D^2 c \tau$$

то **уравнение радиолокации пространственно распределенного метеорологического объекта** теперь можно записать следующим образом:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_0} = C_{РЛ} \frac{\eta}{R^2} .$$

Здесь  $P_{\Pi}$  – поток излучения, сформированный импульсным отражающим объемом,  $P_0$  – импульсная мощность передатчика РЛС.

В уравнение радиолокации метеорологических объектов наряду со значением  $P_{\Pi}$  – потоком излучения, сформированного импульсным отражающим объемом и значением  $P_0$  – импульсной мощностью передатчика РЛС можно ввести **мощность собственных шумов приемника радиолокатора  $P_{ш}$** .

Тогда **уравнение радиолокации метеорологических объектов** будет иметь следующий удобный для практического применения вид

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{ш}} = C_{РА}^* \frac{\eta}{R^2}$$

где

$$C_{РА}^* = \frac{\pi}{2 \cdot 4^2} \frac{P_0}{P_{ш}} D^2 c \tau$$

В таком варианте в левой части уравнение радиолокации метеорологических объектов оказывается величина превышения полезного сигнала над уровнем собственных шумов РЛС.

Ранее было показано что **удельная ЭПР** метеорологического объекта  $\eta$  при релеевском типе рассеяния электромагнитной энергии (размер частиц существенно меньше длины волны) может быть определена из соотношения

$$\eta = \frac{\sigma}{V_u} = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} \sum_{V,i} a_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2$$

Кроме того, ранее было введено значение **радиолокационной отражаемости**  $Z_a$ , определяемое следующим соотношением

$$Z_a = \sum_{V,i} a_i^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2$$

где суммирование ведется по всем частицам, содержащихся в импульсном объеме.

Если ввести функцию распределения капель по размерам в импульсном объеме  $N(a)$ , то для функции  $Z_a$  можно записать

$$Z_a = \int_0^{\infty} N(a) a^6 \left| \frac{m_i^2 - 1}{m_i^2 + 2} \right|^2 da$$

где  $a$  – диаметр частицы.

Для монодисперсного распределения отражающих частиц внутри импульсного объема радиолокационная отражаемость будет определяться следующим выражением

$$Z_a = Na^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

где  $N$  – количество частиц в единице объема,  $a$  – диаметр частиц,  $m$  – комплексная диэлектрическая проницаемость материала частиц.

Тогда для удельной эффективной площади рассеяния (удельной ЭПР) можно записать

$$\eta = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} Z_a$$

где  $\lambda$  – длина волны,

$Z_a$  - радиолокационная отражаемость.

Объединив выражения для удельной эффективной площади рассеяния единицы объема  $\eta$

$$\eta = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} Z_a$$

и

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{и}} = C_{\text{P}\Lambda}^* \frac{\eta}{R^2}$$

окончательно получаем:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{и}} = \Pi_{\text{P}\Lambda} \frac{Z_a}{R^2}$$

где

$$\Pi_{\text{P}\Lambda} = C_{\text{P}\Lambda}^* \frac{\pi^5}{\lambda^4} = \frac{\pi^6}{2^7} \frac{P_0}{P_{и}} \frac{1}{\lambda^4} D^2 c \tau$$

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{ш}} = \Pi_{\text{РЛ}} \frac{Z_a}{R^2}$$

Величина  $\Pi_{\text{рл}}$  носит название метеорологического потенциала МРЛ. Потенциал РЛС определяется только ее техническими характеристиками и может быть для каждого МРЛ рассчитан заранее.

Метеорологический потенциал МРЛ составляет порядка 50 дБкм.

Для облаков характерный диапазон значений  $Z_a$  - **радиолокационная отражаемость**, может изменяться на 12 порядков. При этом величина  $Z_a$  варьирует в интервале от  $10^5$  мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup> до  $10^{-7}$  мм<sup>6</sup>/м<sup>3</sup>. Поэтому на практике вместо  $Z_a$  обычно используют либо величину  $\lg Z_a$ , либо другую единицу – децибелл:

$$\text{дБ}Z_a = 10 \cdot (\lg Z_a / \lg Z_0), \quad (3),$$

где  $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ .



Таким образом, **основное уравнение радиолокации метеорологических целей** принимает следующий вид:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{ш}} = \Pi_{\text{рл}} \frac{Z_a}{R^2}$$

Здесь

$P_{\Pi}$  – поток излучения, сформированного импульсным отражающим объемом, находящимся на расстоянии  $R$  от РЛС,

$P_{ш}$  – мощность собственных шумов радиолокатора,

$\Pi_{\text{рл}}$  – метеорологический потенциал РЛС,

$Z_a$  – радиолокационная отражаемость.

Выведенное уравнение позволяют по величине измеренного отраженного сигнала  $P_{\Pi}$  определить отражаемость метеорологического объекта  $Z_a$ , находящегося на расстоянии  $R$  от МРЛ.

Величины, входящие в основное уравнение радиолокации метеорологических целей имеют следующие размерности:

- метеорологического потенциала МРЛ  $\Pi_{рл}$  измеряется в  $\text{км}^2/(\text{мм}^6/\text{м}^3)$ ;

- расстояние  $R$  от МРЛ измеряется в км;

- радиолокационная отражаемость  $Z_a$  измеряется в  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ;

- мощности  $P_{п}$  и  $P_{ш}$  измеряются в Вт.

На практике основное уравнение радиолокации используется несколько в другом виде что, соответственно, приводит к изменению размерностей входящих в него величин.

Для получения такой используемой на практике формы прологарифмируем **основное уравнение радиолокации метеорологических целей** и умножим левую и правую части полученного выражения на 10. Тогда рабочий вид **основного уравнения радиолокации метеорологических целей** можно записать следующим образом:

$$\left( \frac{P_n}{P_{ш}} \right)' = \Pi'_{РЛ} + 10 \lg Z_a - 20 \lg R$$

где

$$\left( \frac{P_n}{P_{ш}} \right)' = 10 \lg \frac{P_n}{P_{ш}} \quad \Pi'_{РЛ} = 10 \lg \Pi_{РЛ}$$

Размерности двух последних величин (с апострофами) – децибеллы (дБ).

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\pi D^2 K_H}{4(4\pi R^2)^2} \sigma_i$$

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{\text{и}}} = \Pi_{\text{РЛ}} \frac{Z_a}{R^2}$$

Сравнивая два выражения: уравнение радиолокации точечной цели и уравнение радиолокационного наблюдения пространственно-распределенной цели, можно заметить, что:

- при радиолокационном наблюдении **точечной цели** величина отраженного сигнала обратно пропорциональна **четвертой степени расстояния от МРЛ**,

- при радиолокационном наблюдении **пространственно-распределенной цели** величина отраженного сигнала обратно пропорциональна **второй степени корню расстояния от МРЛ**.

Такая особенность обусловлена различиями в зависимости эффективной площади рассеяния (ЭПР) **точечных и пространственно-распределенных** метеорологических объектов от расстояния.

Здесь важно отметить, что поскольку метеорологические объекты обладают разной отражаемостью и, более того, даже один метеорологический объект может иметь достаточно сложное распределение отражаемости в вертикальном и горизонтальном направлениях, выведенные уравнения определяют возможность получения ряда **дополнительных характеристик метеорологических объектов.**

К таким дополнительным характеристикам метеорологических объектов, в частности, относятся:

- вертикальный профиль отражаемости,
- горизонтальные и горизонтальные размеры метеорологических объектов,
- пространственные и временные градиенты отражаемости,
- высоты верхней и нижней границ облачности.

**Двухволновой  
метод  
радиолокационного  
зондирования атмосферы**

Большими возможностями обладает **двухволновой метод** радиометеорологического зондирования атмосферы. В этом случае зондирование производится с использованием электромагнитного излучения на двух длинах волн.

В двухволновом методе отсутствуют те недостатки, которые присущи одноволновому методу. Однако появляются существенные трудности в его технической реализации. Более широкое развитие этот метод получил при реализации лидарного зондирования атмосферы.

**Двухволновой метод** основывается на различиях в частотной зависимости характеристик рассеяния электромагнитных волн гидрометеорами различных размеров.

Этот метод разработан в результате обширных теоретических исследований закономерностей рассеяния электромагнитных волн СВЧ диапазона (сантиметровых) встречающихся в облаках и осадках моделями спектров различных гидрометеоров (капли, градины, крупа, снег) и экспериментальных многоволновых радиолокационных исследований метеорологических объектов.



Двухволновый метод основан на том, что в мелкодисперсных осадках независимо от их интенсивности отношение отражаемости для длин волн  $\lambda_1 = 3,2$  и  $\lambda_2 = 10$  см равно , а с укрупнением града уменьшается в 10 - 100 раз.

Этот метод обеспечивает распознавание градовых облаков и измерение размера и кинетической энергии града (при условии введения коррекции на ослабление 3,2 см излучения в осадках).

Практическая реализация двухволнового метода исследования метеорологических объектов требует:

- проведения **одновременных** и **пространственно-совмещенных** измерений эффективной площади рассеивания единичного объема с помощью **двух МРЛ**, работающих на двух различающихся между собой длинах волн,

- непосредственного измерения отношения эффективных площадей рассеивания единичного объема с помощью **одного двухволнового МРЛ**, имеющего одинаковую ширину диаграммы направленности на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и синхронизированные по времени длительности зондирующих импульсов по обоим каналам.

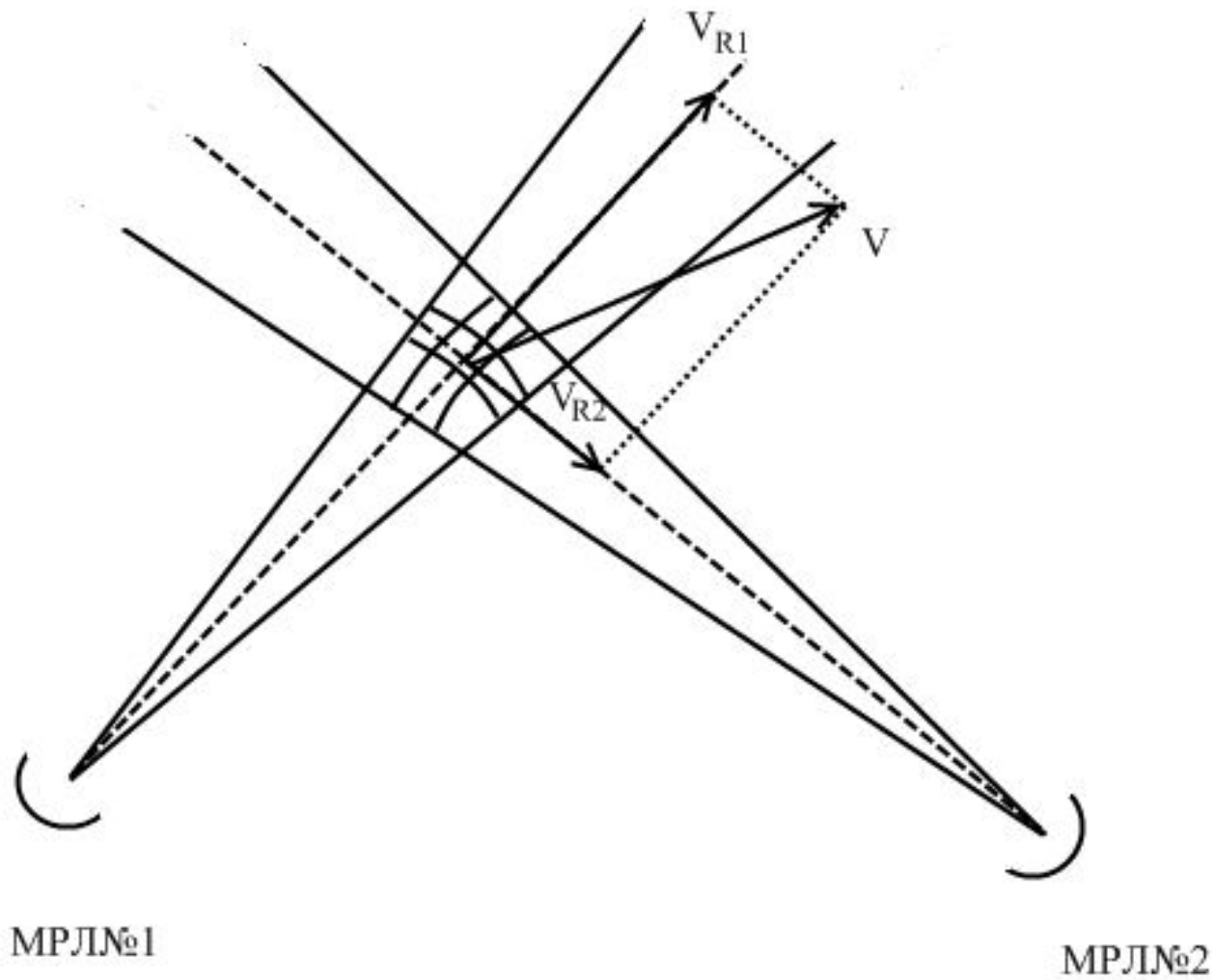


Схема радиолокационного зондирования при помощи двух радиолокаторов

**Двухволновой метод** основывается на различиях в частотной зависимости рассеяния электромагнитных волн гидрометеорами различных размеров.

Двухволновой метод базируется:

- на результатах обширных теоретических исследований закономерностей рассеяния электромагнитных волн СВЧ диапазона (сантиметровых) встречающихся в облаках и осадках моделями спектров различных гидрометеоров (капли, градины, крупа, снег);

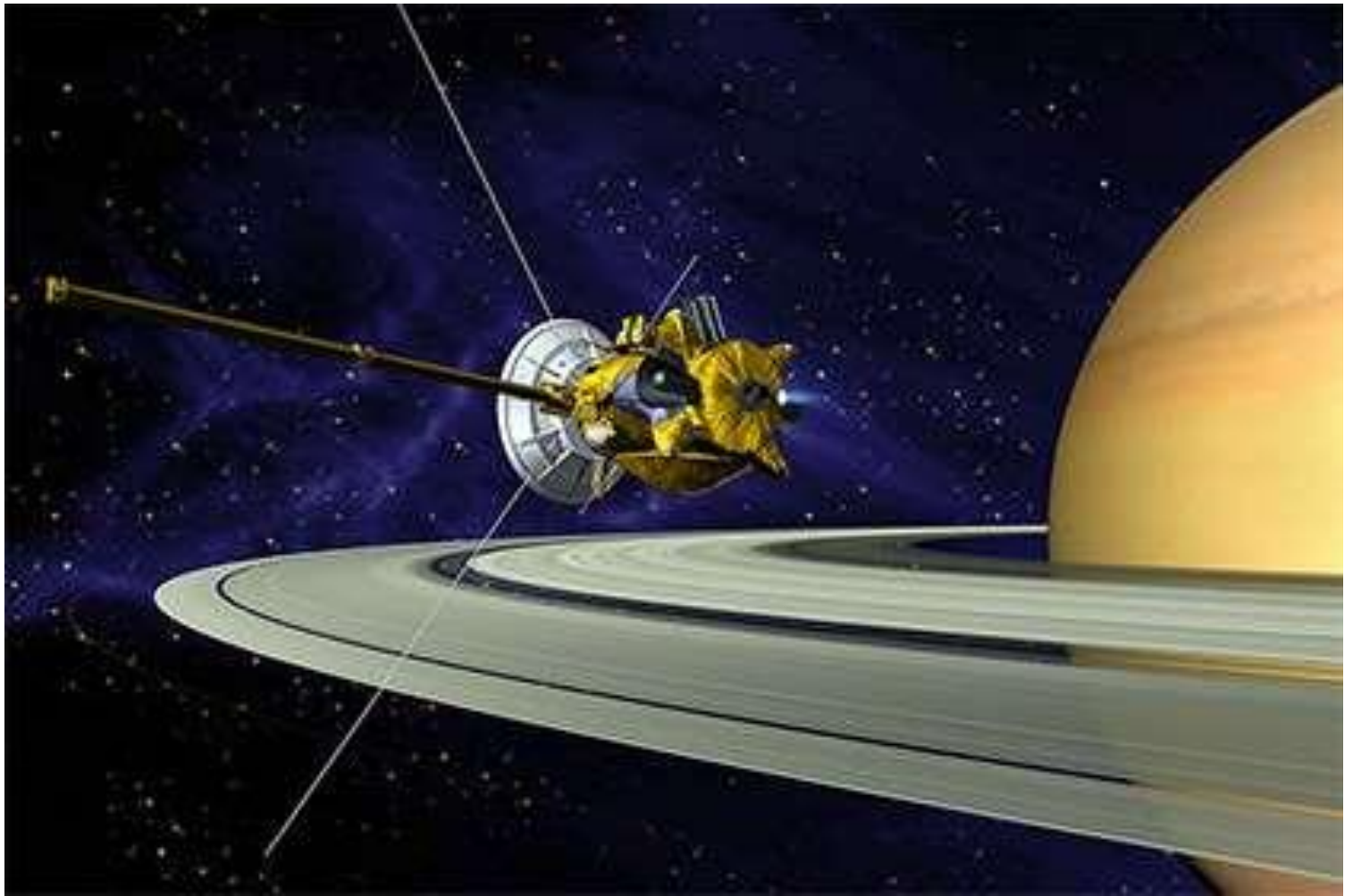
- на результатах, полученных на основе экспериментальных исследований взаимодействия метеорологических объектов с электромагнитным излучением в радиодиапазоне.

В случае малых сферических частиц, где возможно применение релеевского типа рассеяния отношение отражаемостей на двух длинах волн является в первом приближении однозначной функцией размера рассеивающих частиц, т.е.

$$\frac{\eta_{\lambda_1}}{\eta_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^4}{\lambda_1^4} = \text{const.}$$

где  $\eta$  - эффективной площади рассеяния единицы объема на длине волны  $\lambda$ .

Это выражение называется **уравнением двухволновой радиолокации** и является справедливым практически для любых гидрометеоров, так как влияние их диэлектрических свойств на величину отражаемости в случае малых частиц оказывается несущественным.



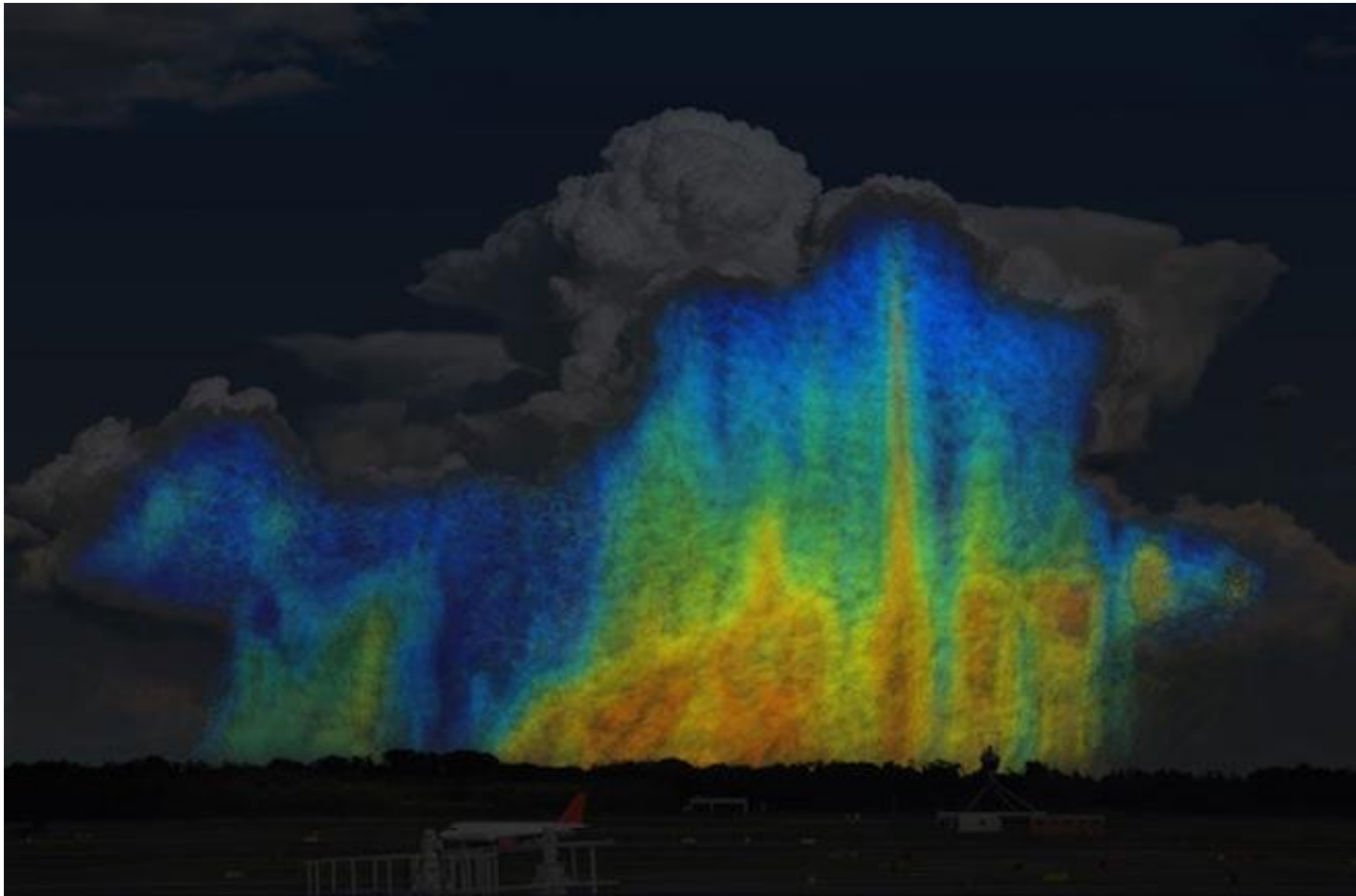
Какие будут вопросы ?

Рядом Тейлора для функции  $f(x)$  в окрестности точки  $a$  называется степенной ряд относительно двучлена  $(x - a)$  следующего вида:

$$f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x - a) + \frac{f''(a)}{2!}(x - a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x - a)^n + \dots$$

Метеорологический потенциал МРЛ-5 составляет порядка 50 дБкм, для ДМРЛ С-диапазона метеорологический потенциал в режиме регистрации отраженного сигнала равен 57 дБкм, в доплеровском режиме составляет 65 дБкм.





3D-снимков, сделанных спутником *GPM Core Observatory* — совместного проекта США и Японии. На изображении показаны размер и распределение капель дождя в пределах штормового фронта. Синим и зеленым цветами выделены капли, размеры которых варьируют от 0,5 до 3 миллиметров. Желтым, оранжевым и красным показаны капли размером от 4 до 6 миллиметров.