

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Л. И. ДИВИНСКИЙ

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОБЛАКА

Расчетное задание по дисциплине

"Основы метеорологической радиолокационной техники"

Направление 657200 – Гидрометеорология (Код по ОКСО – 020600)

Специальность 073100 – Метеорология (Код по ОКСО – 0206020)

Специализация – гидрометеорологические
информационно-измерительные системы
и сетевые технологии



Санкт-Петербург

2006

Дивинский Л. И. Формирование радиолокационного отражения от облака. Расчетное задание по дисциплине «Основы метеорологической радиолокационной техники». – СПб.: Изд. РГТМУ. 2006 – 28 с.

Излагаются принципы формирования радиолокационного сигнала при отражении зондирующего импульса от частиц облаков и осадков. Для расчетов задаются параметры функций распределения дождевых капель и градовых частиц в облаке по размерам. Вычисляется радиолокационная отражаемость и коэффициент ослабления радиоволн в точке облака с заданными характеристиками дождевых и градовых частиц. Для радиолокационной станции (РЛС) с известными параметрами антенной системы и длительностью зондирующего импульса определяется эффективная отражающая поверхность объемно-распределенной цели, находящейся на заданном удалении от РЛС.

© Л. И. Дивинский

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГТМУ), 2006



ВВЕДЕНИЕ

Цель задания:

1. Расчет радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления радиоволн в точке M облака по известным концентрациям и параметрам функции распределения дождевых капель и градовых частиц по размерам.

2. Вычисление эффективной отражающей поверхности объемно-распределенной цели при заданных параметрах антенной системы радиолокационной станции (РЛС), длительности зондирующего импульса и расстояния до отражающего объема облака.

Типичный вариант задания приведен в Приложении (см. стр. 21).

Выполняя задание, следует:

– рассчитать распределение дождевых капель и градовых частиц по размерам и представить результаты в виде таблиц и графиков;

– вычислить вклад, вносимый дождевыми каплями и градовыми частицами, в радиолокационную отражаемость и в коэффициент ослабления радиоволн;

– определить вклад, вносимый в радиолокационную отражаемость и в коэффициент ослабления радиоволн дождевыми каплями и градовыми частицами, диаметр которых находится в заданном интервале значений;

– с учетом заданного расстояния R от РЛС до точки M в облаке и заданных характеристиках радиолокационной станции (диаметре антенны $D_{\text{ант}}$ и длительности зондирующего импульса τ) вычислить эффективную отражающую поверхность объемно-распределенной цели в окрестности точки M . При вычислении предполагать, что весь отражающий объем пространства имеет такую же радиолокационную отражаемость, как в точке M .

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ ПО РАЗМЕРАМ

В соответствии с рекомендациями [1] предполагается, что распределение частиц в облаке по размерам подчиняется закону гамма-распределения:

$$n(d) = N \frac{b^{m+1}}{\Gamma(m+1)} \frac{d^m}{d_3^{m+1}} \exp\left(-b \frac{d}{d_3}\right), \quad (1)$$

где N – концентрация частиц в облаке;

$\Gamma(m+1)$ – гамма-функция;

d_3 – среднекубический диаметр дождевых капель d_3^A и градин $d_3^{\text{ГР}}$;

m – параметр формы кривой гамма-распределения;

b — параметр, равный $\sqrt[3]{(m+1)(m+2)(m+3)}$.

Величина $n(d)$ измеряется в m^{-4} (либо в $см^{-4}$). Если среднекубический диаметр d_3 измеряется в $см$ (либо в $мм$), а концентрация частиц в m^{-3} , то $n(d)$ может быть в $см^{-1} \cdot m^{-3}$ (либо в $мм^{-1} \cdot m^{-3}$).

Расчеты выполняются отдельно для дождевых капель и для градовых частиц.

Как следует из соотношения (1), для вычисления функции распределения частиц по размерам необходимо найти значение гамма-функции $\Gamma(m+1)$.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ГАММА-ФУНКЦИИ

Для гамма-функции $\Gamma(x+1)$ справедливо соотношение:

$$\Gamma(x+1) = x \cdot \Gamma(x). \quad (2)$$

Поэтому в справочниках, представлены значения гамма-функции только для интервала $x \in [1..2]$. Если аргумент имеет значение $x > 2$, то осуществляется преобразование в соответствии с зависимостью (2) до тех пор, пока аргумент гамма-функции не окажется в интервале значений $x \in [1..2]$. Например,

$$\Gamma(4,25) = 3,25 \cdot \Gamma(3,25) = 3,25 \cdot 2,25 \cdot \Gamma(2,25) = 3,25 \cdot 2,25 \cdot 1,25 \cdot \Gamma(1,25)$$

Для $x=1,25$ значение гамма-функции может быть определено из таблиц, приводимых в математических справочниках [2]. Оно равно 0,9064027 и, таким образом, $\Gamma(4,25) = 8,285088$.

При выполнении расчетного задания на ЭВМ нет необходимости пользоваться справочниками. Для вычисления значения гамма-функции нужно использовать выражение (3), аппроксимирующее $\Gamma(1+x)$ при $x \in [0..1]$ степенным рядом и позволяющее вычислить ее значение с погрешностью, не превышающей $3 \cdot 10^{-7}$ [2].

$$\Gamma(x+1) = 1 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 + b_6x^6 + b_7x^7 + b_8x^8 + \varepsilon(x), \quad (3)$$

где $b_1 = -0,577191652;$

$b_2 = 0,988205891;$

$b_3 = -0,897056937;$

$b_4 = 0,918206857;$

$$\begin{aligned}
 b_5 &= -0,756704078; \\
 b_6 &= 0,482199394; \\
 b_7 &= -0,193527818; \\
 b_8 &= 0,035868343.
 \end{aligned}$$

$\varepsilon(x)$ – погрешность, величина которой не превышает $3 \cdot 10^{-7}$.

При вычислении значения гамма-функции рациональнее воспользоваться соотношением (4), в котором последовательно осуществляются операции умножения и суммирования. Тогда, пренебрегая погрешностью $\varepsilon(x)$, имеем:

$$\Gamma(1+x) = 1 + ((((((x b_8 + b_7) \cdot x + b_6) \cdot x + b_5) \cdot x + b_4) \cdot x + b_3) \cdot x + b_2) \cdot x + b_1) \cdot x \quad (4)$$

РАСЧЕТ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

После расчета гамма-функций вычисляются функции распределения по размерам диаметров дождевых капель и градовых частиц.

Типичная форма графиков, полученных по результатам расчета при исходных данных, приведенных в Приложении, представлена на рис. 1.

Для дождевых капель вычисления следует выполнять с шагом 0,1 мм до диаметра капель 6,5 мм, для градовых частиц – с шагом 1 мм до диаметра частиц, при котором функция распределения по размерам станет меньше максимального значения в 10^6 раз. Например, если максимальное значение функции распределения градовых частиц по размерам, как это следует из рис. 1б, равно $9,8 \text{ см}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, то расчеты нужно выполнять, увеличивая диаметр до тех пор, пока это значение станет меньше $9,8 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$.

Проверка правильности расчетов может быть осуществлена, если учесть, что

$$\int_0^{\infty} n(d) dd = N, \quad (5)$$

т. е. в данном примере площадь подынтегральной кривой на рис. 1а должна быть равна концентрации дождевых капель $N_d = 425$, а для кривой на рис. 1б – концентрации градовых частиц $N_{гр} = 27$. Эти числовые значения соответствуют данным о концентрации, приведенным в задании в Приложении 1 (см. стр. 22).

Соотношение (5) должно использоваться для проверки правильности полученных результатов расчетов. Если для вычисления подынтегрального выражения (5) применить метод прямоугольников, т. е. просуммировать все

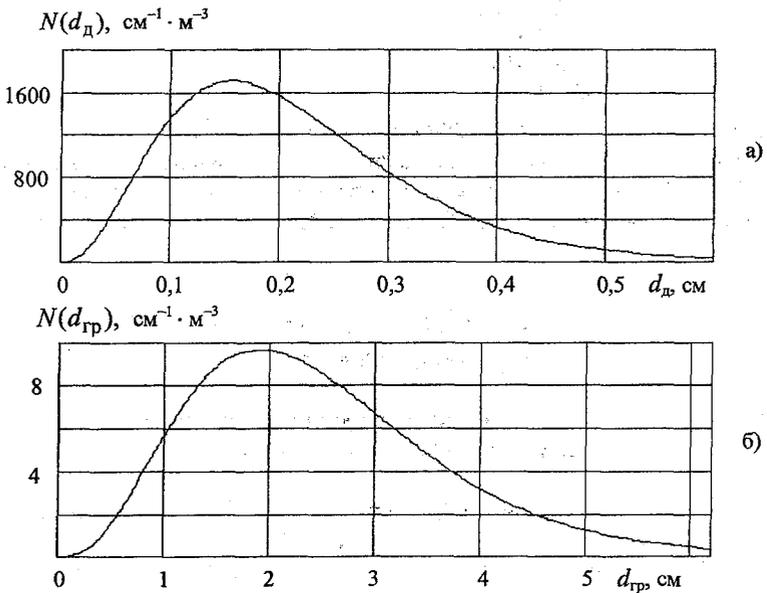


Рис. 1. Функция плотности распределения по размерам капель дождя (а) и градовых частиц (б).

получаемые при вычислениях результаты и умножить сумму на шаг по диаметру, то итоговое значение должно быть близко к значению концентрации соответствующих частиц.

Результаты расчетов функций распределения частиц по размерам используются для расчета радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления радиоволн.

ОТРАЖЕНИЕ И ОСЛАБЛЕНИЕ РАДИОВОЛН СФЕРИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

Находящиеся в атмосфере частицы облаков и осадков взаимодействуют с электромагнитным полем зондирующего импульса. Каждая частица рассеивает радиоволны во все стороны, в том числе отражает их назад в сторону радиолокационной станции, и поглощает радиоволны.

Поэтому принято различать три компонента этого взаимодействия, характеризующих способность частицы отражать радиоволны, а также ее способность рассеивать и поглощать их. Для каждой частицы можно выделить мощность отраженного сигнала $P_{отр}$, рассеянную мощность P_p , и погло-

щенную мощность P_n . Эти компоненты пропорциональны плотности потока мощности Π электромагнитного поля, облучающего частицу:

$$P_{\text{отр}} = \sigma_{\text{отр}} \Pi; \quad P_p = \sigma_p \Pi; \quad P_n = \sigma_n \Pi;$$

В приведенных выражениях коэффициенты пропорциональности называются соответственно эффективной отражающей поверхностью ($\sigma_{\text{отр}}$), эффективной площадью рассеяния (σ_p) и эффективной площадью поглощения (σ_n). При радиолокационном зондировании рассеянная мощность и мощность, поглощенная частицей, определяют общее ослабление зондирующего импульса. Поэтому в радиолокации пользуются представлением об общем ослаблении и вводится понятие "эффективной площади полного ослабления $\sigma_{\text{ос}}$ ", которая равна сумме эффективных площадей рассеяния и поглощения.

$$\sigma_{\text{ос}} = \sigma_p + \sigma_n.$$

Как известно [1], для сферических частиц малого диаметра эффективная отражающая поверхность определяется зависимостью:

$$\sigma_{\text{отр}}(d) = \frac{64 \pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (6)$$

где λ — длина волны, равная, по условиям задания, 3,2 см;

m — комплексный показатель преломления вещества частицы.

Величина $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ равна 0,93 для водных частиц и 0,19 для ледяных.

Эффективная площадь полного ослабления $\sigma_{\text{ос}}$ сферических частиц также зависит от их диаметра и электродинамических характеристик вещества. При малых диаметрах частиц эффективная площадь полного ослабления равна

$$\sigma_{\text{ос}} = \frac{\pi^2}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) d^3, \quad (7)$$

где Im — мнимая часть комплексного числа $\left(-\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)$

Мнимая часть комплексного числа $Im\left(-\frac{m^2-1}{m^2+2}\right)$ зависит от длины

волны и температуры. При температуре 0°C для воды она равна $6,88 \cdot 10^{-3}$ для длины волны 3,2 см и $2,47 \cdot 10^{-3}$ для длины волны 10 см. Для ледяных частиц она существенно меньше, практически не зависит от длины волны и убывает с уменьшением температуры. Так, для температуры 0°C она равна $9,6 \cdot 10^{-4}$, а для температуры -20°C падает до $2,2 \cdot 10^{-4}$.

Однако соотношения (6) и (7) справедливы для малых диаметров, когда выполняются неравенства $\frac{\pi d}{\lambda} \leq 0,13$ и $\left|\frac{\pi d}{\lambda}(m-1)\right| \leq 1$. Отражение радио-

волн от частиц малых размеров, для которых справедливы приведенные неравенства, называется релеевским. Как показывают расчеты, для радиолокационной станции, работающей на длине волны 3,2 см, область релеевского отражения ограничена частицами, диаметр которых не превышает 1,3 мм.

При больших диаметрах частиц эффективная отражающая поверхность и эффективная площадь полного ослабления перестают подчиняться соотношениям (6) и (7). На рис. 2а представлена зависимость эффективной отражающей поверхности $\sigma_{\text{отр}}$ от диаметра для водной сферы больших размеров. Из приведенного графика видно, что для сфер большого диаметра зависимость эффективной отражающей поверхности не является монотонной функцией диаметра¹.

В природных условиях диаметр капель воды не превышает 6–7 мм. Из графика (рис. 2а) видно, что для капель, диаметр которых не превышает этих значений, наблюдается монотонное увеличение эффективной отражающей поверхности и эффективной площади полного ослабления. Зависимости эффективной отражающей поверхности и эффективной площади полного ослабления сферических капель дождя от диаметра капли для интервала диаметров (0...7 мм) представлены на рис. 2б. Зависимости рассчитаны для температуры капли дождя 0°C при длине волны зондирующего импульса 3,2 см. Расчеты были выполнены в Высокогорном геофизическом институте (г. Нальчик) М. Т. Абшаевым, В. И. Розенбергом и Х. Н. Кармовым [3].

¹ Понятно, что сфера, диаметр которой измеряется несколькими сантиметрами, может быть водной лишь в том случае, если она помещена в жесткую оболочку. Для лабораторных измерений эффективной отражающей поверхности водной сферы оболочку можно сделать, например, из такого, практически радиопрозрачного материала, как пенопласт.

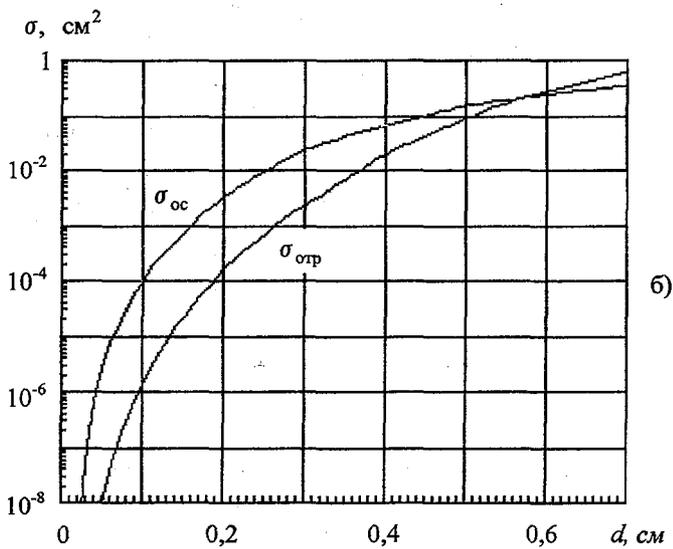
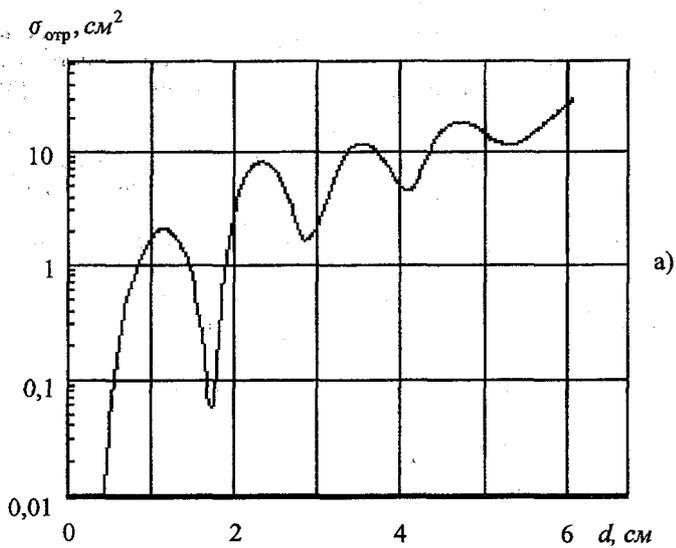


Рис. 2. Зависимость эффективной отражающей поверхности и поперечного сечения полного ослабления сферической дождевой капли от диаметра.

Аналогично, немонотонно меняется эффективная отражающая поверхность и эффективная площадь полного ослабления градовых частиц. В отличие от дождевых, градовые частицы в облаках могут иметь весьма значительные размеры. Рассчитаны и представлены в виде таблиц [3] безразмерные (т. е. отнесенные к площади $\pi d^2/4$) величины эффективных отражающих поверхностей и эффективных площадей полного ослабления для нормированных значений диаметров ρ ледяных сфер. При вычислениях аргументом была нормированная величина $\rho = \frac{\pi d}{\lambda}$, где d – диаметр градовой частицы, а λ – длина волны. Поэтому для длины волны $\lambda = 3,2$ см нормированным значениям диаметров градин, приведенным в таблице [3], соответствовали целому числу миллиметров, результаты, полученные в [3], были пересчитаны с использованием методов сплайн-интерполяции. Результаты вычислений представлены на рис. 3.

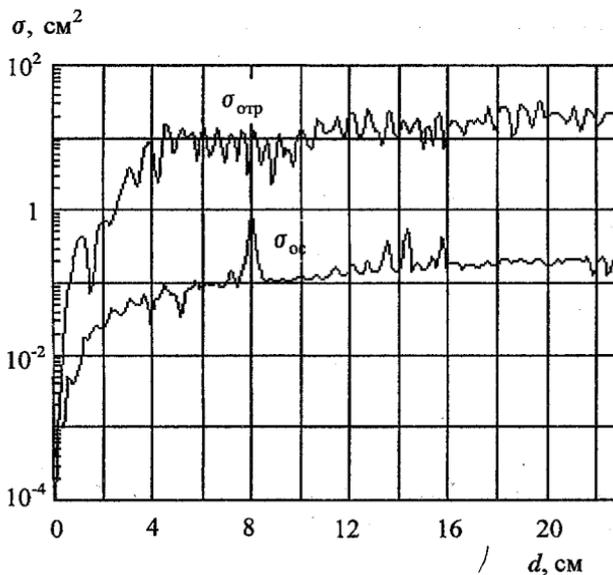


Рис. 3. Зависимость эффективной отражающей поверхности и эффективной площади полного ослабления сферической градовой частицы от диаметра.

Численные данные о значениях эффективной отражающей поверхности и эффективной площади полного ослабления радиоволн для различных диаметров дождевых капель и градовых частиц представлены в таблицах, находящихся в Приложении (стр. 23-27), а также в файле rl-kharakt.xls

ходящихся в Приложении (стр. 23-27), а также в файле tl-kharakt.xls

Приведенные в файле данные размещены на двух листах ("Дождь" и "Град"). На каждом листе данные располагаются в трех столбцах. В первом столбце приведены данные о диаметре частицы, во втором – значение ее эффективной отражающей поверхности, в третьем – значение эффективной площади полного ослабления радиоволн. Значения эффективной отражающей поверхности сферической частицы и эффективной площади полного ослабления приведены в см^2 .

Приведенные в таблицах данные используются для расчета радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления радиоволн.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ОТРАЖАЕМОСТЬ ЧАСТИЦ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Радиолокационное отражение от частиц облаков и осадков формируется за счет суммирования сигналов, отраженных большой совокупностью частиц, от которых к радиолокационной станции одновременно приходят отраженные радиоволны. Поэтому для оценки отражающих свойств различных областей пространства в радиолокации пользуются понятием "радиолокационная отражаемость". Под радиолокационной отражаемостью η понимают суммарную величину эффективных отражающих поверхностей (ЭОП) всех частиц, находящихся в единице объема пространства. Радиолокационная отражаемость измеряется количеством квадратных метров ЭОП в одном кубометре пространства $[\text{м}^2/\text{м}^3]$, т. е. в $[\text{м}^{-1}]$ (либо количеством квадратных сантиметров ЭОП в одном кубическом сантиметре пространства $[\text{см}^2/\text{см}^3]$, т. е. в $[\text{см}^{-1}]$).

Дождевые капли и градовые частицы в облаке имеют различные диаметры. Это обстоятельство должно учитываться при вычислении радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления. Для вычисления радиолокационной отражаемости η необходимо найти сумму радиолокационной отражаемости дождевых капель $\eta_{\text{д}}$ и градовых частиц $\eta_{\text{гр}}$:

$$\eta = \eta_{\text{д}} + \eta_{\text{гр}}.$$

С учетом вычисленных распределений этих частиц по размерам отражаемость дождевых капель определяется выражением:

$$\eta_{\text{д}} = \int_0^{d_{\text{макс}}} n(d) \sigma_{\text{отр}}^{\text{д}}(d) dd, \quad (8)$$

а для градовых частиц – выражением:

$$\eta_{\text{гр}} = \int_0^{d_{\text{макс}}^{\text{гр}}} n(d) \sigma_{\text{отр}}^{\text{гр}}(d) dd, \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{отр}}^{\text{д}}$ – эффективная отражающая поверхность дождевой капли;

$\sigma_{\text{отр}}^{\text{гр}}$ – эффективная отражающая поверхность градовой частицы;

$d_{\text{макс}}^{\text{д}}$ – максимальный диаметр дождевой капли, при котором подынтегральная функция становится пренебрежимо малой (ориентировочно 0,6 – 0,7 см);

$d_{\text{макс}}^{\text{гр}}$ – максимальный диаметр градовой частицы, при котором подынтегральная функция становится пренебрежимо малой.

Если в соотношения (8) и (9) подставлять значения $n(d)$ в см^{-4} , эффективную отражающую поверхность частицы в см^2 , а диаметр частиц в см, то радиолокационная отражаемость будет измеряться в см^{-1} .

Однако, если концентрацию частиц измерять в м^{-3} , т. е. если использовать размерность $n(d)$ $\text{см}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, то число частиц увеличится в 10^6 раз. Для сохранения размерности радиолокационной отражаемости в см^{-1} в соотношения (8) и (9) нужно ввести множитель 10^{-6} . Тогда радиолокационная отражаемость дождевых капель будет определяться выражением:

$$\eta_{\text{д}} = 10^{-6} \int_0^{d_{\text{макс}}^{\text{д}}} n(d) \sigma_{\text{отр}}^{\text{д}}(d) dd, \quad (10)$$

а градовых частиц – выражением

$$\eta_{\text{гр}} = 10^{-6} \int_0^{d_{\text{макс}}^{\text{гр}}} n(d) \sigma_{\text{отр}}^{\text{гр}}(d) dd. \quad (11)$$

Эти соотношения будут использоваться при расчетах.

КОЭФФИЦИЕНТ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН В ОБЛАКАХ И ОСАДКАХ

Если выделить трассу длиной dR и площадью сечения S (рис. 4), то при концентрации частиц N в элементарном объеме $dV = SdR$ число частиц будет равным $NSdR$. На первом этапе анализа предположим, что все частицы объема dV имеют одинаковые эффективные площади полного ослабления,

равные σ_{oc} . Тогда при плотности потока мощности Π элементарное ослабление мощности dP_o на участке dR определится соотношением

$$dP_o = -\Pi \sigma_{oc} N S dR.$$

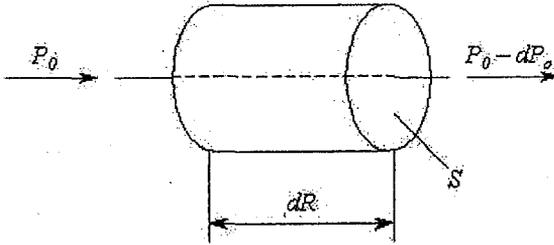


Рис. 4. К пояснению принципа определения коэффициента ослабления радиоволн.

С учетом того, что $\Pi S = P_o$, получаем

$$\frac{dP_o}{P_o} = -N \sigma_{oc} dR.$$

Считая, что в конце трассы, на расстоянии R_k , мощность сигнала будет равна P_k после интегрирования и несложных преобразований получим:

$$\ln \frac{P_k}{P_o} = -N \sigma_o R_k.$$

Переходя от натуральных логарифмов к десятичным, имеем:

$$\lg \frac{P_k}{P_o} = -N \sigma_{oc} R_k \lg e.$$

Для оценки ослабления радиоволн введено понятия коэффициента ослабления $K_{oc} = N \sigma_{oc} \lg e = 0,4343 N \sigma_{oc}$. Если в единице объема имеются частицы с различными эффективными площадями полного ослабления σ_{oci} , то выражение для коэффициента ослабления записывается в виде

$$K_{oc} = 0,4343 \sum_{i=1}^N \sigma_{oci}.$$

Если концентрация частиц измеряется в м^{-3} , а эффективная площадь полного ослабления в м^2 , то коэффициент ослабления радиоволн будет определяться в Б/м (Бел на метр). Однако на практике для оценки коэффициента ослабления радиоволн используют другую единицу – дБ/км (децибел/км), т. е. величину, численное значение которой в 10^4 раз больше. Тогда

$$K_{oc} = 4,343 \cdot 10^3 \sum_{i=1}^N \sigma_{oc i} . \quad (12)$$

Если пользоваться данными об эффективной площади ослабления, приведенными в см^2 , то, чтобы получить значение коэффициента ослабления в дБ/км, выражение (12) необходимо уменьшить в 10^4 раз:

$$K_{oc} = 0,4343 \sum_{i=1}^N \sigma_{oc i} , \quad (13)$$

где N – концентрация частиц в м^{-3} .

При известном распределении частиц по размерам $n(d)$ коэффициент ослабления радиоволн вычисляется по формуле:

$$K_{oc} = 0,4343 \int_0^{d_{\text{Макс}}} n(d) \sigma_{oc}(d) dd . \quad (14)$$

Это соотношение будет использоваться при вычислении коэффициента ослабления радиоволн в данном расчетном задании.

Если вдоль трассы, длина которой равна R_k , коэффициент ослабления радиоволн K_{oc} не меняется, то мощность электромагнитной волны, распространяющейся внутри цилиндра (рис. 4), будет на его выходе равной

$$P_k = P_0 \cdot 10^{-0,1 \cdot K_{oc} R_k} ,$$

где P_0 – мощность, проходящая через площадь S при отсутствии ослабления.

Но если коэффициент ослабления вдоль трассы меняется, то выражение становится более сложным:

$$P_k = P_0 \cdot 10^{-0,1 \cdot \int_0^{R_k} K_{oc}(R) dR} .$$

Однако в радиолокации коэффициент 0,1 в показателе степени заменяется на 0,2, так как учитывается двукратное прохождение радиоволн по трассе – от РЛС до цели и обратно.

РАСЧЕТ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ОТРАЖАЕМОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИОВОЛН

Функция распределения частиц по размерам $n(d)$ рассчитана для дискретных значений d_i , где $i = 1, 2, 3, \dots, n_{\text{макс}}$. Аналогично значения эффективной отражающей поверхности сферических частиц и их эффективной площади полного ослабления приведены в таблицах для дискретных значений диаметров с шагом 0,1 мм для капель дождя и с шагом 1 мм для градовых частиц. При вычислении интегралов (10), (11) и (14) можно предположить, что в интервале между известными смежными значениями функции распределения частиц по размерам $n(d_i)$ и $n(d_{i+1})$, значениями эффективной отражающей поверхности $\sigma_{\text{отр}}^n(d_i)$ и $\sigma_{\text{отр}}^{\text{гр}}(d_{i+1})$ и значениями эффективной площади полного ослабления $\sigma_{\text{ос}}(d_i)$ и $\sigma_{\text{ос}}(d_{i+1})$ происходит линейное изменение этих величин, как это проиллюстрировано на рис. 5.

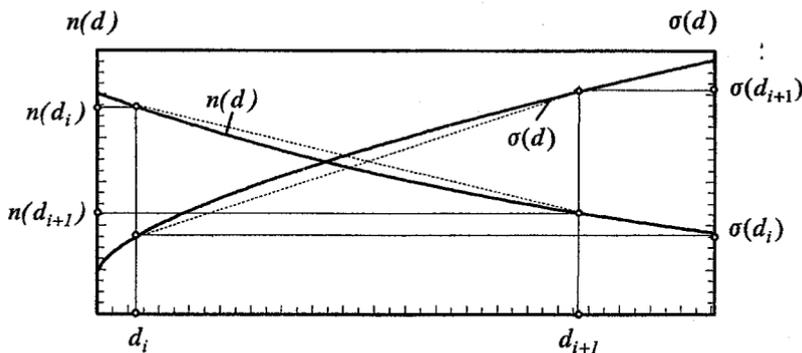


Рис. 5. Пояснение принципа вычисления интегралов (10), (11) и (14) для интервала диаметров $d_i < d \leq d_{i+1}$.

При небольшом интервале между смежными отсчетами d_i и d_{i+1} зависимости $n(d)$ и $\sigma(d)$ пренебрежимо мало отличаются от линейных. [Величина $\sigma(d)$ приведена без индексов, поскольку используемые ниже соотношения в равной мере справедливы как для эффективной отражающей поверхности $\sigma_{\text{отр}}(d)$, так и для эффективной площади полного ослабления радиоволн $\sigma_{\text{ос}}(d)$.]

Таким образом, для промежуточных значений $d_i < d \leq d_{i+1}$ функция распределения частиц по размерам может считаться подчиняющейся линейной зависимости, описываемой соотношением

$$n_i(d) = n(d_i) + \frac{n(d_{i+1}) - n(d_i)}{d_{i+1} - d_i} (d - d_i),$$

а эффективная отражающая поверхность сферической частицы – соотношением

$$\sigma_{\text{отр},i}(d) = \sigma_{\text{отр}}(d_i) + \frac{\sigma_{\text{отр}}(d_{i+1}) - \sigma_{\text{отр}}(d_i)}{d_{i+1} - d_i} \cdot (d - d_i)$$

и ее эффективная поверхность полного ослабления зависимостью

$$\sigma_{\text{ос},i}(d) = \sigma_{\text{ос}}(d_i) + \frac{\sigma_{\text{ос}}(d_{i+1}) - \sigma_{\text{ос}}(d_i)}{d_{i+1} - d_i} \cdot (d_{i+1} - d_i).$$

После несложных алгебраических преобразований можно получить более удобные зависимости:

$$n_i(d) = A_i d + B_i; \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{отр},i}(d) = C_i d + D_i; \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{ос},i}(d) = E_i d + F_i. \quad (17)$$

В соотношениях (15)–(17)

$$A_i = \frac{n(d_{i+1}) - n(d_i)}{d_{i+1} - d_i};$$

$$B_i = \frac{n(d_i)d_{i+1} - n(d_{i+1})d_i}{d_{i+1} - d_i};$$

$$C_i = \frac{\sigma_{\text{отр}}(d_{i+1}) - \sigma_{\text{отр}}(d_i)}{d_{i+1} - d_i};$$

$$D_i = \frac{\sigma_{\text{отр}}(d_i)d_{i+1} - \sigma_{\text{отр}}(d_{i+1})d_i}{d_{i+1} - d_i};$$

$$E_i = \frac{\sigma_{\text{ос}}(d_{i+1}) - \sigma_{\text{ос}}(d_i)}{d_{i+1} - d_i};$$

$$F_i = \frac{\sigma_{\text{ос}}(d_i)d_{i+1} - \sigma_{\text{ос}}(d_{i+1})d_i}{d_{i+1} - d_i}.$$

Выражения (15) – (17) позволяют вычислить вклад в радиолокационную отражаемость и в коэффициент ослабления радиоволн частиц, диаметр которых находится в интервале $d_i < d \leq d_{i+1}$. Для вычисления радиолокационной отражаемости частиц, имеющих диаметр $d_i < d \leq d_{i+1}$, необходимо вычислить интеграл

$$\Delta\eta_i = 10^{-6} \int_{d_i}^{d_{i+1}} (A_i d + B_i)(C_i d + D_i) dd,$$

а для вычисления вклада в коэффициент ослабления радиоволн – интеграл

$$\Delta K_{\text{осн.}i} = 0,4343 \int_{d_i}^{d_{i+1}} (A_i d + B_i)(E_i d + F_i) dd.$$

Выполняя интегрирование, получаем составляющую радиолокационной отражаемости, обусловленную отражением от частиц, диаметр которых находится в интервале $d_i < d \leq d_{i+1}$:

$$\Delta\eta_i = 10^{-6} \cdot \left[A_i C_i \frac{d_{i+1}^3 - d_i^3}{3} + (A_i D_i + B_i C_i) \frac{d_{i+1}^2 - d_i^2}{2} + B_i D_i (d_{i+1} - d_i) \right];$$

и составляющую коэффициента ослабления радиоволн этими частицами:

$$\Delta K_{\text{осн.}i} = 0,4343 \cdot \left[A_i E_i \frac{d_{i+1}^3 - d_i^3}{3} + (A_i F_i + B_i E_i) \frac{d_{i+1}^2 - d_i^2}{2} + B_i F_i (d_{i+1} - d_i) \right].$$

Для нахождения радиолокационной отражаемости и коэффициента ос-

лабления при учете всех имеющихся в облаке частиц, диаметр которых находится в интервале $0 < d < d_{\text{макс}}$, расчеты, подобные приведенным выше, выполняются многократно. При этом радиолокационная отражаемость определяется соотношением

$$\eta = 10^{-6} \sum_{i=0}^m \int_{d_i}^{d_{i+1}} (A_i d + B_i)(C_i d + D_i) dd, \quad (18)$$

а коэффициент ослабления радиоволн –

$$K_{\text{oc}} = 0,4343 \sum_{i=0}^m \int_{d_i}^{d_{i+1}} (A_i d + B_i)(E_i d + F_i) dd. \quad (19)$$

В зависимостях (18) и (19) начальное значение диаметра равно нулю, и ему соответствуют равные нулю эффективная отражающая поверхность и эффективная поверхность полного ослабления радиоволн. Величинам d_m и d_{m+1} соответствуют такие диаметры, для которых очередной член суммы становится пренебрежимо малым по сравнению с вычисленными значениями η и K_{oc} . Пренебрежимо малой можно считать $\Delta\eta_i$ и $\Delta K_{\text{oc},i}$, если они в 10^6 раз меньше η и K_{oc} .

Следует отметить, что для капель, диаметр которых меньше 1,3 мм, можно воспользоваться более точной зависимостью

$$\eta_{0-1,3} = \int_0^{d_{1,3}} n(d) \frac{64\pi^5 d^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 dd; \quad (20)$$

$$K_{\text{oc } 0-1,3} = 0,4343 \int_0^{d_{1,3}} n(d) \frac{\pi^2}{\lambda} \text{Im} \left(-\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) d^3 dd. \quad (21)$$

Однако вклад частиц малых размеров в общую радиолокационную отражаемость невелик, вносимые в рассчитываемые величины уточнения крайне незначительны, и поэтому усложнение программы расчетов на ЭВМ за счет использования соотношений (20) и (21) для вычисления эффективной отражающей поверхности и эффективной поверхности полного ослабления радиоволн представляется нерациональным.

ЭФФЕКТИВНАЯ ОТРАЖАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ М ОБЛАКА

Отраженный от облака сигнал, поступающий на вход приемного устройства радиолокационной станции, формируется за счет суммирования отраженных сигналов, приходящих одновременно от большой совокупности отражающих частиц.

В метеорологических радиолокаторах кратковременный зондирующий импульс обычно распространяется внутри узкого сектора пространства, формируемого антенной системой РЛС. Поэтому в каждый момент времени облачаются зондирующим импульсом не все частицы облака, а только те, которые находятся внутри луча, формируемого антенной. Отраженный сигнал создается ими также в течение короткого временного интервала, пока они облачаются зондирующим импульсом. Это демонстрируется на рис. 6.

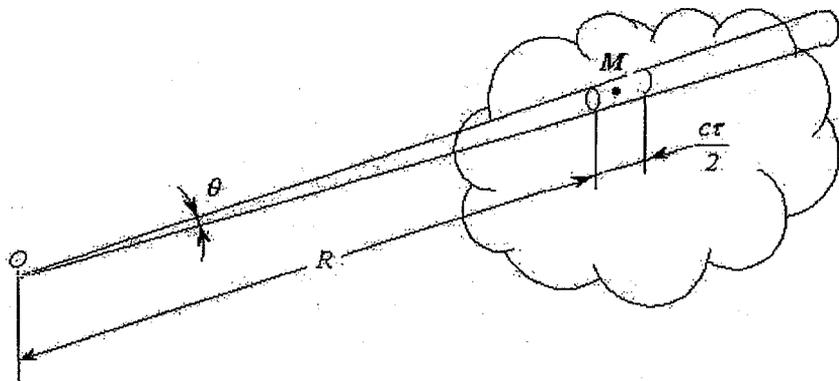


Рис. 6. Отражающий объём пространства
в окрестности точки М.

На рис. 6 в точке О находится фазовый центр антенны. Из этой точки как бы расходится в пространстве узкий пространственный луч, в пределах которого распространяется зондирующий импульс. Представление о луче можно получить по плоскому углу θ в вертикальном сечении, представленном на рис. 6. Как правило, для метеорологических радиолокаторов формируемые лучи характеризуются осевой симметрией, и можно считать, что сечение луча плоскостью, перпендикулярной направлению максимального излучения, является кругом. Будем предполагать, что в пределах луча плотность потока мощности сохраняется постоянной.

Ширина угла θ диаграммы направленности антенной системы метеорологических РЛС, характеризующихся так называемым игольчатым лучом,

связана с диаметром параболической антенны $D_{\text{ант}}$ соотношением:

$$\theta = (50 - 70) \frac{\lambda}{D_{\text{ант}}},$$

где λ — длина волны зондирующего импульса.

В этом соотношении ширина угла диаграммы направленности представлена в градусах.

Будем считать коэффициент в скобках равным 60, т. е. считать, что

$$\theta_{(\text{град})} = 60 \frac{\lambda}{D_{\text{ант}}}.$$

При посылке кратковременного зондирующего импульса длительностью τ отраженный сигнал формируется всеми частицами облака, находящимися в объеме, ограниченном диаграммой направленности антенной системы РЛС и двумя сферическими поверхностями, одна из которых имеет радиус R , а другая $R + \frac{c\tau}{2}$. Этот объем называется отражающим объемом пространства.

Если расстояние до цели R велико и значительно превосходит величину $\frac{c\tau}{2}$, то отражающий объем пространства можно считать цилиндрическим. При осесимметричном луче с шириной угла диаграммы направленности, равном $\theta_{(\text{рад})}$, основание цилиндра представляет собой круг, диаметр которого равен $R\theta_{(\text{рад})}$, и, следовательно, площадь основания цилиндра равна

$$S_{\text{осн}} = \pi \frac{[R\theta_{(\text{рад})}]^2}{4}.$$

Здесь ширина угла диаграммы направленности антенной системы выражена в радианах. Если ширина угла диаграммы направленности антенной системы представлена в градусах, то перевести ее в радианы следует, используя соотношение:

$$\theta_{(\text{рад})} = \frac{\pi}{180} \theta_{(\text{град})}.$$

Тогда отражающий объем пространства будет равен

$$V_{\text{отр}} = \pi \frac{[R\theta_{(\text{рад})}]^2}{4} \frac{c\tau}{2}.$$

Предполагая, что во всех точках этого объема радиолокационная отражаемость η сохраняется одинаковой, такой же, как в точке M , можно вычислить эффективную отражающую поверхность окрестности этой точки для радиолокационной станции с известными параметрами антенной системы и известной длительностью зондирующего импульса:

$$\sigma = \eta V_{\text{отр}}.$$

На этом выполнение расчетного задания завершается.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчетное задание студента(ки) группы _____
Вариант № _____

В ограниченной зоне конвективного облака имеются дождевые капли и градовые частицы. Концентрация дождевых капель N_d . Концентрация градовых частиц $N_{гр}$. Распределение частиц по размерам считать подчиняющимся закону гамма-распределения:

$$n(d) = N \frac{b^{m+1}}{\Gamma(m+1)} \frac{d^m}{d_3^{m+1}} \exp\left(-b \frac{d}{d_3}\right),$$

где $\Gamma(m+1)$ — гамма-функция;
 d_3 — среднекубический диаметр дождевых капель d_3^D и градин $d_3^{ГР}$;
 m — параметр формы кривой гамма-распределения;
 b — параметр, равный $\sqrt[3]{(m+1)(m+2)(m+3)}$.

Для рассматриваемой зоны облака:

1. Построить графики зависимости $n(d)$ для дождевых капель и градовых частиц.

2. Определить вклад в радиолокационную отражаемость, вносимый дождевыми каплями и градовыми частицами, а также суммарную радиолокационную отражаемость.

3. Определить вклад в коэффициент ослабления радиоволн, вносимый дождевыми каплями и градовыми частицами, а также суммарный коэффициент ослабления радиоволн.

4. Определить вклад в радиолокационную отражаемость и в коэффициент отражения радиоволн, вносимый дождевыми каплями, диаметр которых находится в интервале $d_d^{\text{мин}} < d < d_d^{\text{макс}}$. Вычислить количество дождевых частиц, диаметр которых находится в этом интервале.

5. Определить вклад в радиолокационную отражаемость и в коэффициент отражения радиоволн, вносимый градовыми частицами, диаметр которых находится в интервале $d_{\text{гр}}^{\text{мин}} < d < d_{\text{гр}}^{\text{макс}}$. Вычислить количество градовых частиц, диаметр которых находится в этом интервале.

6. Определить эффективную отражающую поверхность объемно-распределенной цели, если отражающий объем пространства находится на расстоянии R , а радиолокационная станция имеет параболическую антенну, диаметр которой равен $D_{\text{ант}}$ и излучает зондирующий импульс длительностью τ .

Исходные данные:

| | | |
|----|---|------|
| 1 | Концентрация дождевых капель N_d , м^{-3} | 425 |
| 2 | Концентрация градовых частиц $N_{\text{гр}}$, м^{-3} | 27 |
| 3 | Среднекубический диаметр дождевых капель d_3^d , см | 0,27 |
| 4 | Параметр формы функции распределения дождевых капель m^d | 2,67 |
| 5 | Среднекубический диаметр градовых частиц $d_3^{\text{гр}}$, см | 3,1 |
| 6 | Параметр формы функции распределения градовых частиц $m^{\text{гр}}$ | 3,12 |
| 7 | Длина волны радиолокационной станции, см | 3,2 |
| 8 | Минимальный диаметр дождевых капель $d_d^{\text{мин}}$, см | 0,15 |
| 9 | Максимальный диаметр дождевых капель $d_d^{\text{макс}}$, см | 0,75 |
| 10 | Минимальный диаметр градовых частиц $d_{\text{гр}}^{\text{мин}}$, см | 1,2 |
| 11 | Максимальный диаметр градовых частиц $d_{\text{гр}}^{\text{макс}}$, см | 2,2 |
| 12 | Расстояние до отражающего объема пространства R , км | 25 |
| 13 | Диаметр антенны радиолокационной станции $D_{\text{ант}}$, м | 3,5 |
| 14 | Длительность зондирующего импульса РЛС τ , мкс | 0,9 |

Радиолокационные параметры дождевых частиц

| Диаметр дождевой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | $2,72 \cdot 10^{-12}$ | $7,62 \cdot 10^{-10}$ |
| 0,2 | $1,74 \cdot 10^{-10}$ | $6,10 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,3 | $1,98 \cdot 10^{-9}$ | $2,06 \cdot 10^{-7}$ |
| 0,4 | $1,11 \cdot 10^{-9}$ | $4,88 \cdot 10^{-7}$ |
| 0,5 | $4,25 \cdot 10^{-8}$ | $9,53 \cdot 10^{-7}$ |
| 0,6 | $1,27 \cdot 10^{-7}$ | $1,65 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,7 | $3,20 \cdot 10^{-7}$ | $2,61 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,8 | $7,13 \cdot 10^{-7}$ | $3,90 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,9 | $1,44 \cdot 10^{-6}$ | $5,56 \cdot 10^{-6}$ |
| 1,0 | $2,73 \cdot 10^{-6}$ | $1,73 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,1 | $5,12 \cdot 10^{-6}$ | $2,45 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,2 | $8,40 \cdot 10^{-6}$ | $3,50 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,3 | $1,47 \cdot 10^{-5}$ | $5,00 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,4 | $2,11 \cdot 10^{-5}$ | $7,00 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,5 | $3,34 \cdot 10^{-5}$ | $9,80 \cdot 10^{-4}$ |
| 1,6 | $5,00 \cdot 10^{-5}$ | $1,40 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,7 | $7,33 \cdot 10^{-5}$ | $1,85 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,8 | $1,10 \cdot 10^{-4}$ | $2,45 \cdot 10^{-3}$ |
| 1,9 | $1,67 \cdot 10^{-4}$ | $3,25 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,0 | $2,11 \cdot 10^{-4}$ | $4,10 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,1 | $2,90 \cdot 10^{-4}$ | $5,15 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,2 | $3,83 \cdot 10^{-4}$ | $6,28 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,3 | $5,00 \cdot 10^{-4}$ | $7,66 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,4 | $6,43 \cdot 10^{-4}$ | $9,50 \cdot 10^{-3}$ |
| 2,5 | $8,60 \cdot 10^{-4}$ | $1,13 \cdot 10^{-2}$ |
| 2,6 | $1,13 \cdot 10^{-3}$ | $1,40 \cdot 10^{-2}$ |
| 2,7 | $1,47 \cdot 10^{-3}$ | $1,67 \cdot 10^{-2}$ |
| 2,8 | $1,83 \cdot 10^{-3}$ | $1,90 \cdot 10^{-2}$ |
| 2,9 | $2,28 \cdot 10^{-3}$ | $2,22 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,0 | $2,84 \cdot 10^{-3}$ | $2,56 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,1 | $3,50 \cdot 10^{-3}$ | $2,90 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,2 | $4,40 \cdot 10^{-3}$ | $3,17 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,3 | $5,50 \cdot 10^{-3}$ | $3,66 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,4 | $6,57 \cdot 10^{-3}$ | $4,00 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,5 | $8,20 \cdot 10^{-3}$ | $4,50 \cdot 10^{-2}$ |

| Диаметр дождевой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 3,6 | $1,03 \cdot 10^{-2}$ | $4,90 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,7 | $1,30 \cdot 10^{-2}$ | $5,50 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,8 | $1,60 \cdot 10^{-2}$ | $6,00 \cdot 10^{-2}$ |
| 3,9 | $1,87 \cdot 10^{-2}$ | $6,54 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,0 | $2,22 \cdot 10^{-2}$ | $7,00 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,1 | $2,62 \cdot 10^{-2}$ | $7,66 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,2 | $3,00 \cdot 10^{-2}$ | $8,40 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,3 | $3,66 \cdot 10^{-2}$ | $9,00 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,4 | $4,20 \cdot 10^{-2}$ | $9,85 \cdot 10^{-2}$ |
| 4,5 | $4,90 \cdot 10^{-2}$ | $1,07 \cdot 10^{-1}$ |
| 4,6 | $5,75 \cdot 10^{-2}$ | $1,20 \cdot 10^{-1}$ |
| 4,7 | $6,57 \cdot 10^{-2}$ | $1,27 \cdot 10^{-1}$ |
| 4,8 | $7,66 \cdot 10^{-2}$ | $1,40 \cdot 10^{-1}$ |
| 4,9 | $8,60 \cdot 10^{-2}$ | $1,47 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,0 | $1,00 \cdot 10^{-1}$ | $1,57 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,1 | $1,17 \cdot 10^{-1}$ | $1,63 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,2 | $1,33 \cdot 10^{-1}$ | $1,73 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,3 | $1,50 \cdot 10^{-1}$ | $1,80 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,4 | $1,65 \cdot 10^{-1}$ | $1,87 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,5 | $1,80 \cdot 10^{-1}$ | $1,93 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,6 | $1,97 \cdot 10^{-1}$ | $2,06 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,7 | $2,17 \cdot 10^{-1}$ | $2,17 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,8 | $2,39 \cdot 10^{-1}$ | $2,28 \cdot 10^{-1}$ |
| 5,9 | $2,67 \cdot 10^{-1}$ | $2,39 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,0 | $2,84 \cdot 10^{-1}$ | $2,45 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,1 | $3,57 \cdot 10^{-1}$ | $2,56 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,2 | $3,42 \cdot 10^{-1}$ | $2,67 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,3 | $3,75 \cdot 10^{-1}$ | $2,79 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,4 | $4,00 \cdot 10^{-1}$ | $2,90 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,5 | $4,40 \cdot 10^{-1}$ | $2,95 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,6 | $4,70 \cdot 10^{-1}$ | $3,08 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,7 | $5,00 \cdot 10^{-1}$ | $3,17 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,8 | $5,37 \cdot 10^{-1}$ | $3,34 \cdot 10^{-1}$ |
| 6,9 | $5,87 \cdot 10^{-1}$ | $3,50 \cdot 10^{-1}$ |
| 7,0 | $6,28 \cdot 10^{-1}$ | $3,58 \cdot 10^{-1}$ |

Радиолокационные параметры обводнённых градовых частиц

| Диаметр градовой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | 0,0001 | 0,00039 |
| 0,2 | 0,001 | 0,001 |
| 0,3 | 0,006 | 0,001 |
| 0,4 | 0,016 | 0,001 |
| 0,5 | 0,038 | 0,002 |
| 0,6 | 0,076 | 0,005 |
| 0,7 | 0,132 | 0,004 |
| 0,8 | 0,209 | 0,004 |
| 0,9 | 0,296 | 0,005 |
| 1,0 | 0,380 | 0,006 |
| 1,1 | 0,433 | 0,008 |
| 1,2 | 0,429 | 0,017 |
| 1,3 | 0,345 | 0,017 |
| 1,4 | 0,197 | 0,016 |
| 1,5 | 0,075 | 0,020 |
| 1,6 | 0,104 | 0,024 |
| 1,7 | 0,307 | 0,025 |
| 1,8 | 0,512 | 0,025 |
| 1,9 | 0,613 | 0,023 |
| 2,0 | 0,655 | 0,023 |
| 2,1 | 0,683 | 0,026 |
| 2,2 | 0,683 | 0,030 |
| 2,3 | 0,626 | 0,036 |
| 2,4 | 0,686 | 0,043 |
| 2,5 | 0,949 | 0,041 |
| 2,6 | 1,317 | 0,038 |
| 2,7 | 1,614 | 0,036 |
| 2,8 | 1,954 | 0,037 |
| 2,9 | 2,557 | 0,043 |
| 3,0 | 3,561 | 0,053 |
| 3,1 | 3,846 | 0,061 |
| 3,2 | 3,306 | 0,056 |
| 3,3 | 2,256 | 0,050 |
| 3,4 | 2,187 | 0,050 |
| 3,5 | 3,183 | 0,049 |
| 3,6 | 4,951 | 0,059 |
| 3,7 | 7,131 | 0,069 |
| 3,8 | 8,613 | 0,051 |
| 3,9 | 8,756 | 0,026 |
| 4,0 | 7,158 | 0,039 |

| Диаметр градовой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 4,1 | 3,675 | 0,058 |
| 4,2 | 2,475 | 0,062 |
| 4,3 | 4,608 | 0,069 |
| 4,4 | 9,122 | 0,077 |
| 4,5 | 14,867 | 0,093 |
| 4,6 | 15,275 | 0,085 |
| 4,7 | 10,845 | 0,067 |
| 4,8 | 6,318 | 0,069 |
| 4,9 | 6,345 | 0,070 |
| 5,0 | 9,650 | 0,060 |
| 5,1 | 12,455 | 0,034 |
| 5,2 | 13,411 | 0,046 |
| 5,3 | 11,202 | 0,074 |
| 5,4 | 9,791 | 0,077 |
| 5,5 | 11,089 | 0,084 |
| 5,6 | 11,516 | 0,090 |
| 5,7 | 7,502 | 0,107 |
| 5,8 | 4,920 | 0,102 |
| 5,9 | 9,182 | 0,083 |
| 6,0 | 13,939 | 0,086 |
| 6,1 | 12,751 | 0,099 |
| 6,2 | 7,082 | 0,100 |
| 6,3 | 5,487 | 0,093 |
| 6,4 | 7,152 | 0,094 |
| 6,5 | 11,052 | 0,098 |
| 6,6 | 13,352 | 0,098 |
| 6,7 | 10,304 | 0,090 |
| 6,8 | 5,953 | 0,090 |
| 6,9 | 4,518 | 0,097 |
| 7,0 | 7,671 | 0,106 |
| 7,1 | 10,494 | 0,136 |
| 7,2 | 11,284 | 0,142 |
| 7,3 | 8,617 | 0,104 |
| 7,4 | 4,915 | 0,089 |
| 7,5 | 8,402 | 0,118 |
| 7,6 | 12,889 | 0,147 |
| 7,7 | 10,972 | 0,213 |
| 7,8 | 3,171 | 0,317 |
| 7,9 | 4,151 | 0,679 |
| 8,0 | 8,407 | 0,893 |
| 8,1 | 12,265 | 0,508 |

Радиолокационные параметры обводнённых градовых частиц
(Продолжение)

| Диаметр градовой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 8,2 | 8,230 | 0,185 |
| 8,3 | 4,965 | 0,151 |
| 8,4 | 4,307 | 0,120 |
| 8,5 | 6,154 | 0,115 |
| 8,6 | 9,173 | 0,109 |
| 8,7 | 6,228 | 0,111 |
| 8,8 | 2,247 | 0,113 |
| 8,9 | 2,618 | 0,109 |
| 9,0 | 8,548 | 0,105 |
| 9,1 | 11,182 | 0,108 |
| 9,2 | 8,322 | 0,112 |
| 9,3 | 5,420 | 0,111 |
| 9,4 | 7,139 | 0,109 |
| 9,5 | 6,927 | 0,108 |
| 9,6 | 4,574 | 0,106 |
| 9,7 | 4,034 | 0,110 |
| 9,8 | 8,903 | 0,116 |
| 9,9 | 12,818 | 0,120 |
| 10,0 | 13,153 | 0,126 |
| 10,1 | 11,602 | 0,122 |
| 10,2 | 9,816 | 0,114 |
| 10,3 | 8,046 | 0,114 |
| 10,4 | 7,114 | 0,114 |
| 10,5 | 8,716 | 0,119 |
| 10,6 | 14,445 | 0,131 |
| 10,7 | 17,984 | 0,126 |
| 10,8 | 16,113 | 0,113 |
| 10,9 | 12,659 | 0,114 |
| 11,0 | 11,458 | 0,117 |
| 11,1 | 12,119 | 0,124 |
| 11,2 | 12,480 | 0,144 |
| 11,3 | 13,859 | 0,151 |
| 11,4 | 17,578 | 0,166 |
| 11,5 | 19,000 | 0,160 |
| 11,6 | 14,439 | 0,133 |
| 11,7 | 9,836 | 0,130 |
| 11,8 | 11,263 | 0,130 |
| 11,9 | 18,341 | 0,139 |
| 12,0 | 22,227 | 0,171 |
| 12,1 | 22,255 | 0,175 |
| 12,2 | 18,012 | 0,153 |

| Диаметр градовой частицы, мм | Эффективная отражающая поверхность, см ² | Эффективная площадь поглощения, см ² |
|------------------------------|---|---|
| 12,3 | 11,921 | 0,143 |
| 12,4 | 10,049 | 0,135 |
| 12,5 | 12,527 | 0,141 |
| 12,6 | 19,216 | 0,182 |
| 12,7 | 25,815 | 0,195 |
| 12,8 | 23,279 | 0,164 |
| 12,9 | 16,725 | 0,147 |
| 13,0 | 12,261 | 0,143 |
| 13,1 | 12,533 | 0,144 |
| 13,2 | 9,993 | 0,164 |
| 13,3 | 8,235 | 0,196 |
| 13,4 | 12,142 | 0,312 |
| 13,5 | 22,303 | 0,383 |
| 13,6 | 23,292 | 0,265 |
| 13,7 | 17,789 | 0,165 |
| 13,8 | 11,483 | 0,155 |
| 13,9 | 9,652 | 0,147 |
| 14,0 | 12,187 | 0,156 |
| 14,1 | 15,699 | 0,183 |
| 14,2 | 16,844 | 0,365 |
| 14,3 | 13,282 | 0,553 |
| 14,4 | 11,750 | 0,369 |
| 14,5 | 13,025 | 0,146 |
| 14,6 | 15,670 | 0,163 |
| 14,7 | 17,803 | 0,184 |
| 14,8 | 14,506 | 0,173 |
| 14,9 | 9,089 | 0,156 |
| 15,0 | 7,286 | 0,158 |
| 15,1 | 13,776 | 0,160 |
| 15,2 | 14,419 | 0,186 |
| 15,3 | 9,366 | 0,228 |
| 15,4 | 7,943 | 0,208 |
| 15,5 | 18,702 | 0,170 |
| 15,6 | 22,695 | 0,253 |
| 15,7 | 15,233 | 0,418 |
| 15,8 | 7,080 | 0,341 |
| 15,9 | 8,747 | 0,167 |
| 16,0 | 14,691 | 0,172 |
| 16,1 | 17,294 | 0,183 |
| 16,2 | 17,749 | 0,186 |
| 16,3 | 17,242 | 0,193 |

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф.* Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. – Л.: Гидрометеоиздат. 1980, 230 с.
2. Справочник по специальным функциям Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979, 830 с.
3. *Абшаев М.Т., Розенберг В.И. Кармов Х.Н.* // Поглощение и рассеяние микрорадиоволн сферическими частицами воды и льда. Труды ВГИ, 1975, вып.29. с. 40 – 71.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Функция распределения частиц облаков и осадков по размерам..... | 3 |
| Вычисление гамма-функции | 4 |
| Расчет функции распределения диаметров облачных частиц по размерам | 5 |
| Отражение и ослабление радиоволн сферическими частицами | 6 |
| Радиолокационная отражаемость частиц облаков и осадков..... | 11 |
| Коэффициент ослабления радиоволн в облаках и осадках | 12 |
| Расчет радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления радиоволн | 15 |
| Эффективная отражающая поверхность окрестности точки <i>M</i> облака | 19 |
| Приложение | 21 |
| Радиолокационные параметры дождевых частиц..... | 23 |
| Радиолокационные параметры обводнённых градовых частиц | 24 |
| Список использованных источников | 27 |

Учебное издание

Леонид Исаевич Дивинский

**ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОБЛАКА**

Расчётное задание по дисциплине "Основы
метеорологической радиолокационной техники"

Компьютерный набор и верстка Л. И. Дивинского
Редактор И. Г. Максимова

Лицензия ЛР № 020309 от 30.12.96

195196, СПб, Малоохтинский пр. 98. РГТМУ.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»
Заказ № 31. Подписано в печать 14.02.2006 г. Бумага офсетная.

Формат 60×84¹/₁₆. Объем 1,75 п. л. Тираж 100 экз.

Санкт-Петербург, 191015, а/я 83,
тел. /факс (812) 275-73-00, 275-53-92, тел. 970-35-70