

**О МИНИМАЛЬНОЙ МАССЕ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА, СОЗДАЮЩЕГО  
ИОНИЗИРОВАННЫЙ СЛЕД, ОБНАРУЖИВАЕМЫЙ  
РАДИОЛОКАТОРОМ**

Е. И. ФИАЛКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

**Введение**

Выяснение зависимости минимальной массы метеорного тела, создающего ионизированный след, который может быть обнаружен (или использован для измерений) радиосредствами от параметров радиолокатора, имеет большое значение в связи с решением ряда задач, таких, как, например, определение возможностей радиолокационного метода при исследовании слабых метеоров; выбор параметров радиолокатора, предназначенного для исследования слабых метеоров, изучение численности метеоров (обнаруженных или использованных, например, для измерений параметров атмосферы), исследование максимальной и средней характеристической высот обнаруженных метеоров и т. п. Вопросы, касающиеся минимальной массы обнаруживаемых метеоров, затрагивались в ряде работ, [1—5 и др.], однако при этом не учитывалась зависимость минимальной массы обнаруживаемых метеоров от оперативности радиолокатора, от коэффициента диффузии и т. п. Не рассмотрены также вопросы, связанные с выбором параметров радиолокатора, предназначенного для изучения слабых метеоров. В настоящей работе дается общая зависимость минимальной массы обнаруженного (или использованного) метеора  $m_{\min}$  от параметров локатора, свойств атмосферы, некоторых характеристик метеора при нормальном отражении радиоволн от метеорных следов, и рассматриваются некоторые частные случаи.

Из рассмотрения исключены весьма слабые метеоры, порождаемые метеорными телами, не „доходящими“ до точки кипения.

**Основные соотношения (выражения для  $m_{\min}$ )**

Мощность эхо-сигнала  $\epsilon$ , принятого антенной, в случае, когда „пакет“ радиоволн „накрывает“ метеорный след в момент его образования, равна [1, 3, 9]

$$\epsilon = 2,52 \cdot 10^{-18} \frac{P_t \cdot G_m^2 \cdot s^4(\varphi; \psi)}{R^3} \cdot \eta^2 \cdot \xi \cdot x^2 \cdot e^{-2 \left( \frac{2\pi \cdot a}{\lambda} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $P_i$  — импульсная мощность передатчика радиолокатора;  $\lambda$  — длина волны;  $G_m$  — коэффициент направленного действия антенны;  $s(\varphi, \psi)$  — характеристика направленности антенны (по полю);  $\psi$  и  $\varphi$  — азимут и угол места объекта (участка ионизированного метеорного следа, нормально отражающего радиоволны);  $R$  — наклонная дальность от локатора до нормально отражающего участка метеорного следа;  $\alpha$  — линейная плотность электронов в участке метеорного следа, нормально отражающем радиоволны;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий увеличение амплитуды отраженного сигнала при проявлении резонансных эффектов в ионизированном следе;  $\xi$  — коэффициент, учитывающий уменьшение максимального значения амплитуды эхо-сигнала вследствие того, что к моменту завершения формирования участка следа в пределах первой зоны Френеля успевает проявиться эффект диффузии;  $\epsilon$  — начальный радиус метеорного следа.

Формула (1) справедлива для случая  $\alpha < 2,4 \cdot 10^{12}$  эл/см.

Линейная плотность электронов в метеорном следе может быть найдена из рассмотрения процесса испарения метеорного тела и ионизации, производимой в результате соударения испарившихся метеорных атомов с частицами воздуха,

$$\alpha = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{\beta}{m_a} \cdot \frac{1}{v}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса метеорного тела;  $m_a$  — масса атома метеорного тела;  $\beta$  — коэффициент, характеризующий вероятность того, что при испарении метеорного атома и столкновении его с частицами воздуха выделится один свободный электрон;  $v$  — геоцентрическая скорость движения метеорного тела.

Максимальная скорость испарения равна [6]

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\max} = 0,73 \frac{m_0 \cdot v_0 \cdot \cos \lambda}{H} \cdot (\mu - 0,1)^{\frac{\mu - 0,1}{1,1 - \mu}}, \quad (3)$$

где  $m_0$  и  $v_0$  — начальные масса и скорость метеорного тела;  $H$  — высота однородной атмосферы (на характеристической высоте  $h_m$ , которой соответствует наиболее интенсивное испарение);  $\mu$  — коэффициент, характеризующий связь между изменением массы  $m$  и изменением площади лобового сечения  $S$ ;  $\frac{S}{S_0} = \left(\frac{m}{m_0}\right)^\mu$ ; здесь  $m_0$ ,  $S_0$  и  $m$ ,  $S$  — соответственно начальные и текущие значения массы и лобового сечения метеорного тела. Если испарение изменяет форму тела, то  $\mu$  не остается постоянным. В случае невращающегося тела любой формы, сохраняющего эту форму при испарении,  $\mu = \frac{2}{3}$  [6].

С учетом (2) и (3) максимальная линейная плотность электронов  $\alpha_m$  равна (в предположении  $v \approx v_0$ ):

$$\alpha_m = 0,73 \cdot (\mu - 0,1)^{\frac{\mu - 0,1}{1,1 - \mu}} \cdot \frac{m_0 \cdot \beta \cdot \cos \lambda}{H \cdot m_a},$$

и для случая  $\mu = \frac{2}{3}$   $\alpha_m = 0,47 \cdot \frac{m_0 \cdot \beta \cdot \cos \lambda}{H \cdot m_a}$ . (4)

При  $h \neq h_m$  [3] 
$$\alpha = \frac{m_0 \cdot \cos \chi}{m_a \cdot H} \cdot \frac{p}{p_m} \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{p}{p_m}\right)^2 \cdot \beta,$$

где  $p$  — атмосферное давление в точке расположения участка метеорного следа, нормально отражающего радиоволны;  $p_m$  — давление на характеристической высоте  $h_m$ .

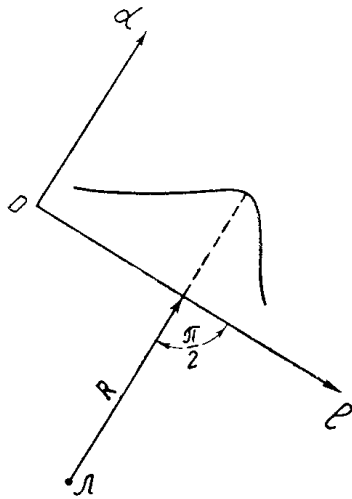


Рис. 1. Случай, когда линейная электронная плотность в участке, нормально отражающем радиоволны, максимальна.  $L$  — точка расположения локатора.  $O-l$  — метеорный след.

Очевидно, что минимальная масса обнаруживаемого метеорного тела (при данной скорости метеора) будет соответствовать случаю благоприятного расположения следа относительно локатора, а именно: случаю отражения радиоволн от участка следа с близкой к максимальной электронной плотностью (рис. 1), равной:

$$\alpha_{\min} = \frac{4}{9} \cdot m_0 \cdot \frac{\beta \cdot \cos \chi}{m_a \cdot H}. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5), полученные из [6] и [3], различаются совершенно незначительно.

Мощность принятого сигнала в случае  $h = h_m$ , как следует из (1) и (4) или (5), будет равна

$$\varepsilon = 0,55 \cdot 10^{-28} \frac{P_i \cdot \lambda^3 \cdot G_m^2 \cdot S^1(\varphi, \psi)}{R^3} \cdot \eta_i^2 \cdot \xi \cdot m_0^c \cdot \frac{\beta^2 \cdot \cos^2 \chi}{m_a^2 \cdot H^2} \cdot e^{-2 \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2}.$$

Минимальной массе метеорного тела  $m_{0 \min}$ , создающего обнаруживаемый (или используемый для измерений) след, будет соответствовать минимальная мощность сигнала  $\varepsilon_{\min}$ :

$$m_{\min} = 1,35 \cdot 10^{14} \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{P_i}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3/2} \cdot G_m \cdot S^2(\varphi, \psi)} \cdot \frac{R^{3/2} \cdot H \cdot m_a}{\beta \cdot \cos \chi \cdot \eta_i \cdot \sqrt{\xi}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2} \quad (6)$$

Мощность  $\varepsilon_{\min}$  определяется мощностью порогового сигнала  $\varepsilon_{\text{пор}}$  и минимальным временем  $T_{\min}$ , в течение которого отражение должно превышать уровень  $K_n \cdot \varepsilon_{\text{пор}}$ , для обеспечения необходимой точности измерений или для обнаружения метеора; величина коэффициента  $K_n$  также определяется требуемой точностью измерений.

Если  $U_{m_0}$  — начальная амплитуда отражения, то через  $t$  секунд после образования следа амплитуда эхо-сигнала будет равна [1]

$$U_m = U_{m_0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ca}}},$$

Примечание. В формуле (6) и ниже индекс „0“ в выражении массы опущен. Вместо  $m_{0 \min}$  фигурирует обозначение  $m_{\min}$ .

где 
$$T_{cl} = \frac{\lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot D}; \quad (7)$$

$T_{cl}$  — длительность отражения от следа (на уровне  $\frac{U_{mo}}{e}$ );

$D$  — коэффициент диффузии.

Чтобы в течение времени  $t \geq T_{min}$  амплитуда эхо-сигнала превышала уровень  $U_m = \sqrt{K_n} \cdot U_{пор}$ , необходимо выполнение условия

$$U_{mo} \geq U_{пор} \cdot \sqrt{K_n} \cdot e^{\frac{T_{min}}{T_{cl}}}, \text{ и так как } \varepsilon \sim U^2, \text{ то}$$

$$\varepsilon_{min} = \varepsilon_{пор} \cdot K_n \cdot e^{2 \frac{T_{min}}{T_{cl}}}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (6), получим

$$m_{min} = 1,35 \cdot 10^{14} \sqrt{\frac{\varepsilon_{пор}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3/2} \cdot G_m \cdot s^2(\varphi, \psi)} \cdot \frac{R^3 \cdot H \cdot m_a}{\beta \cdot \cos \chi \cdot \eta \sqrt{\xi}} \cdot \sqrt{K_n} \cdot e^{\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 + \frac{T_{min}}{T_{cl}}},$$

или с учетом (7)

$$m_{min} = 1,35 \cdot 10^{14} \sqrt{\frac{\varepsilon_{пор}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3/2} \cdot G_m \cdot s^2(\varphi, \psi)} \cdot \frac{R^3 \cdot H \cdot m_a}{\beta \cdot \cos \chi \cdot \eta \sqrt{\xi}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 + (a^2 + 4D \cdot T_{min})}. \quad (9)$$

Величина минимальной массы  $m_{min}$  при  $h = h_m$  определяется параметрами радиолокатора ( $P_i, \lambda, G_m, \eta_{пор}, E_{min}$ ), параметрами метеора ( $\chi: m_a; \nu$ , так как от  $\nu$  зависят  $\beta, \xi, D, a$ ), параметрами атмосферы ( $H, D$ ), взаимным расположением метеорного следа и локатора ( $R, s(\varphi, \psi), \eta$ ), требуемой точностью измерений ( $K_n$ ).

Связь между величинами, входящими в (9), в ряде случаев весьма сложная. Например,  $D, a, H$  зависят от характеристической высоты  $h_m$ , которая определяется величинами  $\nu, \chi, m$  и т. д.

Таким образом, при данных параметрах локатора и метеора величина  $m_{min}$  зависит от расположения метеора относительно локатора. Формула (9) принципиально позволяет найти  $m_{min}$  для общего случая. Из (9) можно также найти наименьшее значение минимальной массы  $m_{min}^*$  при данных  $\nu$  и  $\chi$ .  $m_{min}^*$  будет соответствовать определенное направление ( $\varphi, \psi$ ).

Для нахождения  $m_{min}$  представим наклонную дальность через характеристическую высоту  $h_m$ , зенитное расстояние радианта  $\chi$  и угол  $\Theta$ , отсчитываемый в плоскости эхо от линии пересечения этой плоскости ( $ЛЛ_1$ ) с нормальной плоскостью, проходящей через точку расположения локатора, зенит и радиант (рис. 2):

$$R = \frac{h_m}{\sin \chi \cdot \cos \Theta}.$$

Таким образом, в случае, когда направление максимального излучения лежит в пересечении плоскости эхо с плоскостью, содержа-

шей точки радианта и зенита и точку расположения локатора.  $m_{\min}$  можно представить в виде

$$m_{\min} = 1,35 \cdot 10^{14} \sqrt{K_n} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{нор}}}{P_1}} \cdot \frac{1}{\lambda^3 \cdot G_m} \cdot \frac{h_m^{3/2} \cdot H \cdot m_a}{\beta \cdot \gamma_1 \cdot \sqrt{\xi}} \cdot \frac{1}{s(\Theta) \cdot \cos \chi \cdot \sin \chi \cdot \cos \Theta} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})}, \quad (10)$$

где  $s(\Theta)$  — линия пересечения объемной диаграммы направленности с плоскостью ЭХО.

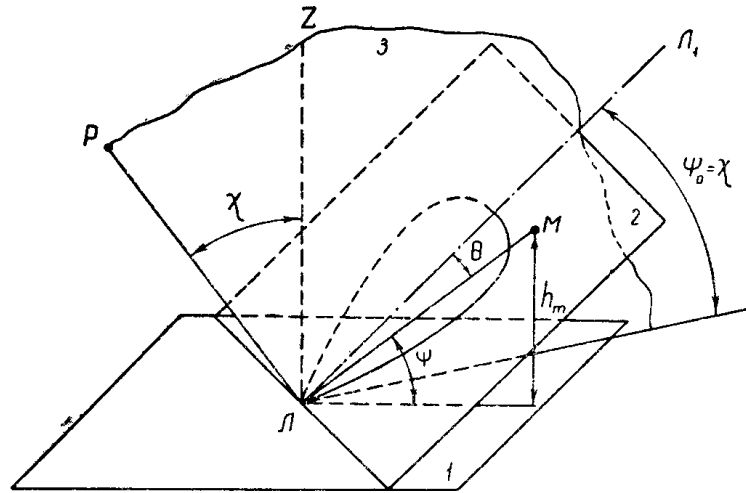


Рис. 2. К выражению наклонной дальности через высоту.  $M$  — „нормально отражающая точка“ на метеорном следе.  $L$  — локатор,  $Z$  — зенит,  $LP$  — направление на радиант. 1 — горизонтальная плоскость. 2 — плоскость ЭХО (нормальная направлению  $LP$ ). 3 — вертикальная плоскость, проходящая через локатор, полюс и зенит.  $R$  — наклонная дальность.  $h_m$  — характеристическая высота.  $\chi$  — зенитное расстояние радианта.  $\psi$  — угол места.  $LL_1$  — линия пересечения плоскостей 2 и 3. Направление максимального излучения совмещено с  $LL_1$ .

При данных  $\psi$  и  $\chi$  минимальная масса будет наименьшей при максимальном значении произведения  $s(\Theta) \cdot \cos \Theta$ .

Совершенно очевидно, что это будет иметь место при  $\Theta = 0$ , причем  $[s(\Theta) \cdot \cos \Theta]_{\max} = 1$ . Физически это соответствует случаю, когда направление на нормально отражающий участок метеорного следа, в котором  $\alpha = \alpha_m$ , совпадает с направлением максимального излучения.

Итак, при данных скорости  $v$  и зенитном расстоянии радианта  $\chi$  наименьшая величина минимальной массы равна

$$m_{\min}^* = 2,7 \cdot 10^{14} \sqrt{K_n} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{нор}}}{P_1}} \cdot \frac{1}{\lambda^3 \cdot G_m} \cdot \frac{h_m^{3/2} \cdot H \cdot m_a}{\beta \cdot \gamma_1 \cdot \sqrt{\xi} \cdot \sin 2\chi} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})}. \quad (11)$$

Формула (11) позволяет рассмотреть зависимость величины минимальной массы  $m_{\min}^*$  от параметров локатора (при данных параметрах ме-

теора) и выбрать оптимальные параметры радиолокатора, обеспечивающие наименьшее значение  $m_{\min}^*$ . Анализируя [11], можно также рассмотреть изменение  $m_{\min}^*$  в зависимости от параметров метеора при данных параметрах локатора и выяснить предельные возможности как данного вида радиолокатора, так и радиолокатора, обладающего оптимальными параметрами.

### Предельные возможности локатора ( $m_{\min \min}$ )

Для определения минимальной массы метеорного тела, создающего метеорный след, который может быть использован при данном виде измерений, выполняемых с помощью данного радиолокатора, необходимо построить зависимость  $m_{\min}^*(\chi, v)$  при данном значении  $T_{\min}$ , и, определив  $\chi_{\text{опт}}$  и  $v_{\text{опт}}$ , найти соответствующее им значение  $m_{\min}^*$ . Общее решение этой задачи в настоящее время еще не представляется возможным.

В случае же обнаружения метеора задача упрощается, при этом целесообразно использование системы с весьма высокой оперативностью ( $T_{\min}$  порядка периода посылки).

Величина предельно малой массы метеорного тела, которое может быть обнаружено (по ионизированному следу), соответствует случаю, когда след „накрывается“ пакетом волн в момент завершения формирования 1-й зоны Френеля, и при этом отраженный сигнал превышает уровень порогового сигнала в течение весьма малого времени  $T_{\min} = \Delta t$ ; в случае использования „меченых“ импульсов  $\Delta t$  — это время, в течение которого излучается весь „меченый“ импульс.

Можно показать, что в этом случае (в частности, при сравнительно больших  $\lambda$ ) наименьшее значение минимальной массы соответствует  $\chi \approx 45^\circ$  и  $v_{\text{опт}}$  (причем при таких  $\lambda$   $v_{\text{опт}}$  лежит в области больших скоростей).

Таким образом, предельное значение минимальной массы метеорного тела, создающего обнаруживаемый след, будет равно:

$$m_{\min \min} = 2,7 \cdot 10^{14} \cdot m_a \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{нор}}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3/2} \cdot G_m} \cdot \left[ \frac{h_m^{3/2} \cdot H}{\beta \cdot \sqrt{\xi}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})} \right]_{(v_{\text{опт}}; \chi_{\text{опт}})} \cdot \frac{1}{\eta_1} \quad (12)$$

Коэффициент  $\eta_1$  характеризует увеличение интенсивности отраженного сигнала в случае проявления резонансных эффектов в метеорном следе.

Как известно, резонанс проявляется при наличии составляющей электрического поля  $E$  нормальной оси следа в случае  $\alpha < 2,4 \cdot 10^{12}$  и  $a \ll \lambda$ ; вместе с тем, при очень малых  $\alpha$  резонансный эффект проявляется весьма слабо. Практически резонанс имеет место при [7]  $10^{10} < \alpha < 10^{12}$ ; в этом случае [8]  $\eta \approx 1 \div 4$ . Однако если чувствительность аппаратуры высока и массе  $m_{\min}$  соответствует  $\alpha < 10^{10}$ , то интенсивность отражения при нормальной поляризации будет практически такой же, как и при параллельной поляризации, т. е.  $\eta \approx 1$ .

Для приближенного определения величины  $m_{\min \min}$  можно принять для  $v \approx 50 \div 60$  км/сек;  $h_m \approx 100$  км;  $H \sim 8$  км;  $\sqrt{\xi} \approx 0,5$ ;  $\beta \approx 1$ . Полагая, что  $m_{\min \min}$  будет соответствовать  $\alpha < 10^{10}$ , примем  $\eta = 1$ .

Молекулярный вес атома метеорного тела (железного)  $m_a \approx 10^{-22} \text{ г}$ . Подставляя эти величины в (16), получим:

$$m_{\min \min} \approx 1,35 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пор}}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3,2} \cdot G_m} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})}$$

В случае

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min}) \ll 1 \quad m_{\min \min} \approx (1-2) \cdot 10^9 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пор}}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3,2} \cdot G_m}; \quad (13)$$

(здесь  $\lambda$  измеряется в сантиметрах,  $m$  — в граммах).

Заметим, что коэффициент  $\xi$  зависит от  $v$ ,  $\lambda$ ,  $R$ ,  $D$  и т. д. и, естественно, его величина при изменении  $v$  и  $\lambda$  не будет оставаться постоянной. Влияние времени пролета метеором 1-й зоны Френеля на величину  $m_{\min}$  здесь не рассматривается<sup>1)</sup>.

Таким образом, величина предельно минимальной массы обнаруживаемого метеорного тела  $m_{\min \min}$  существенно зависит от параметров радиолокатора, используемого для наблюдений<sup>2)</sup>

### Зависимость минимальной массы от параметров радиолокатора

Как следует из (11), величина  $m_{\min}$  зависит от ряда параметров радиолокатора: длины волны  $\lambda$ , мощности передатчика  $P_i$ , величины порогового сигнала  $\varepsilon_{\text{пор}}$ , коэффициента направленного действия антенны  $G_m$ , а также от оперативности системы, характеризуемой временем  $T_{\min}$ , минимально необходимым для обнаружения метеора или выполнения определенного измерения

$$m_{\min}^* \sim \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пор}}}{P_i}} \cdot \frac{1}{\lambda^{3,2} \cdot G_m \cdot \sqrt{\xi}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})} \quad (14)$$

Строго говоря, нужно учесть также зависимость  $h_m$  от  $m_{\min}^*$  [10], а следовательно, и от параметров радиолокатора (напомним, что  $D$  зависит от  $h_m$ );  $H(m_{\min}^*)$  [10] и т. п.

Однако, так как  $h_m$  и  $H$  изменяются незначительно при изменении  $m_{\min}^*$ , анализ влияния этих связей здесь не приводится.

Зависимость  $m_{\min}^*$  от мощности передатчика и коэффициента направленного действия антенны совершенно очевидна:  $m_{\min}^* \sim \frac{1}{G_m \cdot \sqrt{P_i}}$ .

Рассмотрим зависимость  $m_{\min}^*(\lambda)$ :

$$m_{\min}^* \sim \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{пор}}}}{\lambda^{3,2} \sqrt{\xi}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 + 4DT_{\min})} \quad (15)$$

Анализ формулы (15) с учетом зависимости уровня помех от длины волны устанавливает наличие оптимальной длины волны  $\lambda_{\text{опт}}$ , зависящей от оперативности системы ( $T_{\min}$ ) и скорости метеора.

В случае высокооперативных систем  $\lambda_{\text{опт}} \approx 12 \text{ м}$ . Поэтому для исследований метеоров в области малых метеорных масс следует ис-

1) Влияние времени пролета метеором 1-й зоны Френеля на величину  $m_{\min}$  рассмотрено Ф. И. Перегудовым [9] после написания настоящей работы.

2) Здесь не рассматривается зависимость  $\gamma$  от  $v$ ,  $\lambda$  и т. п.

пользовать диапазон  $\lambda > 12$  м, так как при  $\lambda > 12$  м увеличивается минимальная масса  $m_{\min}^*$  и, кроме того, увеличиваются габариты системы. Известно, что в области метеорного диапазона волн ( $\lambda \approx 4 \div 12$  м) мощность порогового сигнала, определяемого в основном уровнем космических помех, может быть представлена в виде  $\epsilon \sim \lambda^l$ , где [11, 12]  $l \approx 2,3 \div 2,8$ ; при  $\lambda \geq 12$  м  $l$  увеличивается вследствие проявления атмосферных помех.

Коэффициент  $\xi$  не остается постоянным с изменением длины волны. При увеличении  $\lambda \xi$  увеличивается [3]; подробный анализ  $m_{\min}^*$  (?) будет произведен дополнительно. Таким образом,

$$m_{\min}^* \sim \lambda^{\frac{l-3}{2}} \cdot e^{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (a^2 - 4DT_{\min})} \cdot \frac{1}{V \xi} \quad (16)$$

Как видно из (16), увеличение длины волны приводит к уменьшению минимальной массы. Можно показать, что в случае высокооперативных систем  $m_{\min}^*$  изменяется несколько резче, чем обратно пропорционально длине волны (в области метеорного диапазона волн). В случае же низкооперативных систем уменьшение  $\lambda$  приводит к резкому увеличению  $m_{\min}^*$ ; это увеличение тем существеннее, чем больше скорость исследуемых метеоров.

Формула (16) справедлива для случая  $G_m = \text{const}$  при изменении  $\lambda$  (что имеет место, например, при сравнении систем с одинаковыми типами антенн и, в частности, при использовании полуволнового вибратора). Как следует из (16), в случае низкооперативных систем для исследования слабых метеоров следует использовать сравнительно большие длины волн ( $\lambda \approx 10 \div 12$  м). В случае высокооперативных систем следует также использовать „длинноволновую“ часть метеорного диапазона  $\lambda = 8 \div 12$  м. При выборе длины волны следует учитывать необходимость использования остронаправленной антенны. Поэтому, если по каким-либо причинам габариты антенны оказываются ограниченными, то целесообразнее использовать более короткие волны (например,  $\lambda \approx 4$  м).

Заметим также, что для исследования метеоров в области малых  $m$  можно применить системы с  $\lambda > 12$  м, которые могут использоваться лишь во время пониженного уровня помех (атмосферных).

### О возможностях радиолокационного метода исследования слабых метеоров

Оценим минимальную массу метеорного тела, создающего ионизированный след, который может быть зафиксирован радиометодом.

В случае волны, близкой к оптимальной (и  $T_{\min}$  достаточно малом), можно воспользоваться формулой (13)

$$m_{\min \min} \approx (1 \div 2) \cdot 10^9 \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{пор}}}{P_i}} \cdot \frac{1}{G_m \cdot \lambda^{3/2}}$$

Как показывает расчет, при реальных значениях коэффициента направленности антенны ( $G \approx 1 \div 100$ ), длительности импульса ( $\tau \approx 10 \div 100$  мксек) и импульсной мощности ( $P_i \approx 100 \div 200$  квт), при  $\lambda$ , близкой к  $\lambda_{\text{опт}}$ , радиолокаторы могут обнаруживать метеорные следы с  $a_m \approx 10^8 \div 10^{11}$  эл/см, что при  $v \approx 50 \div 60$  км/сек соответствует массам метеорных тел  $m_{\min \min} \approx 10^{-8} \div 10^{-5}$  г и яркостям  $M \approx 8 \div 15$



звездных величин. Проведенные вычисления  $m_{\min \min}$  выполнены в предположении, что при движении метеорного тела имеет место его интенсивное испарение.

Известно, что малые тела затормаживаются, не „доходя“ до точки кипения [6].

Как видно из графика, приведенного в [6], критический размер (радиус) метеорного тела лежит в пределах  $r = 10^{-4} \div 10^{-3}$  см при  $v \approx 60$  км/сек. Для железных частиц (плотность  $\rho \approx 7,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ) это будет соответствовать критическому значению массы

$$m_{кр} = \pi r^3 \rho = \pi \cdot 7,6 \cdot (10^{-4} \div 10^{-3})^3 \approx 2,5 \cdot (10^{-8} \div 10^{-11}) \text{ г.}$$

Из сопоставления полученных выше значений  $m_{\min \min}$  с  $m_{кр}$  видно, что наименьшие метеорные тела, обнаруживаемые радиолокатором, претерпевают интенсивное испарение.

Следует иметь в виду, что вычисленные выше значения  $m_{\min \min} \approx 10^{-8} \div 10^{-5}$  г соответствуют наиболее благоприятному случаю (облучение следа происходит в момент завершения формирования 1-й зоны Френеля, в пределах которой происходит наиболее интенсивная ионизация; направление максимального излучения совпадает с направлением на участок следа, содержащий 1-ю зону Френеля). В реальных условиях „накрытие“ следа в момент его формирования будет происходить весьма редко, а следовательно, весьма редко будут обнаруживаться следы, порожденные метеорными телами с такими малыми массами.

### Сравнение систем

Иногда необходимо сравнить две системы с точки зрения их возможностей при обнаружении (или использовании для различных измерений) метеоров.

Как следует из (11), отношение минимальных масс метеорных тел, доступных двум локаторам, будет равно

$$\frac{m_{\min 1}^*}{m_{\min 2}^*} = \sqrt{\frac{K_{n1}}{K_{n2}}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пор}1}}{\varepsilon_{\text{пор}2}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{i2}}{P_{i1}}} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{G_{m2}}{G_{m1}} \left(\frac{h_{m1}}{h_{m2}}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} \cdot e^{4\pi^2 \left[ \frac{a_1^2 + 4D_1 T_{\min 1}}{\lambda_1^2} - \frac{a_2^2 + 4D_2 T_{\min 2}}{\lambda_2^2} \right]}, \quad (17)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют 1-му и 2-му радиолокаторам. Отношение (17) получено в предположении, что оба радиолокатора обнаруживают метеоры с одинаковыми  $\chi$ , причем в обоих случаях отражения происходят от участков, расположенных на характеристических высотах (т. е.  $\alpha \approx \alpha_m$ ). В общем случае нахождение точного значения  $\frac{m_{\min 1}^*}{m_{\min 2}^*}$  весьма затруднено. Это объясняется, в частности, зависимостью  $D$  и  $H$  от характеристической высоты  $h_m$ , которая, в свою очередь, зависит от  $m_{\min}^*$  [10]. В некоторых частных случаях нахождение  $\frac{m_{\min 1}^*}{m_{\min 2}^*}$  упрощается. В качестве примера сравним 2 системы, обладающие одинаковыми длинами волн и одинаковыми оперативностями.

Этот случай имеет место при переходе от работы с использованием полуволнового вибратора к использованию направленной антенны, при изменении величины порогового сигнала, при регулировке мощности передатчика и т. п. (причем изменение  $P_i$ ,  $\varepsilon$  и  $G$  происходит не в очень широких пределах, так что можно пренебречь изменениями как  $h_m$ , так и  $D$  и  $a$ ). В этом случае отношение минимальных масс определяется в первом приближении лишь параметрами радиолокаторов ( $\varepsilon_{\text{пор}}$ ,  $P_i$ ,  $G_m$ ):

$$\frac{m_{\text{min1}}^*}{m_{\text{min2}}^*} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пор1}}}{\varepsilon_{\text{пор2}}} \cdot \frac{P_{i2}}{P_{i1}} \cdot \frac{G_{m2}}{G_{m1}}}$$

### Выводы

1. Минимальная масса метеорного тела, создающего метеор, который может быть зарегистрирован с помощью радиолокатора, зависит как от параметров радиолокатора, так и от параметров метеора и некоторых характеристик атмосферы.

2. Весьма существенное значение имеет оперативность системы, характеризующая тем минимальным временем  $T_{\text{min}}$ , в течение которого амплитуды отраженных сигналов должны превышать некоторый уровень (превосходящий пороговый сигнал в определенное число раз или равный пороговому сигналу). Величина  $T_{\text{min}}$  определяется видом измерения (измеряемым параметром), методом измерения, требуемой точностью измерения.

3. Величины предельно-минимальных масс в зависимости от параметров аппаратуры заключены в пределах  $m_{\text{min min}} \approx 10^{-5} \div 10^{-8} \text{ г}$ , что соответствует  $\alpha_{m \text{ min}} \approx 10^{11} \div 10^8 \text{ эл/см}$ , и при  $v \approx 50 \div 60 \text{ км/сек}$  яркостям метеоров  $M_{\text{min}} \approx 8 - 15$  звездных величин. При уверенном обнаружении, а тем более при измерениях, минимальные массы значительно превышают  $m_{\text{min min}}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. T. R. Kaiser, MNRAS, 1954, v. 114, N 1, 39.
2. T. R. Kaiser, MNRAS, 1954, v. 114, N 1, 52.
3. T. R. Kaiser, I. Adv. Phys., 1953, v. 2, N 8, 495.
4. S. Evans, MNRAS, 1954, v. 114, N 1, 63.
5. Финалко Е. И., Астр. журн., 1957, 34, вып. 3, 421.
6. Левин Б. Ю., Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе, Изд. АН СССР, 1956.
7. Немирова Э. К., Бюлл. Комиссии по кометам и метеорам Астросовета АН СССР, № 2, 46, 1958.
8. E. R. Billam, J. C. Browne, «Meteors», Ed. by T. R. Kaiser, 1955, 73.
9. Перегудов Ф. И. Астр. журн., 35, вып. 6, 888, 1958.
10. Финалко Е. И., Астр. журн., 35, вып. 6, 881, 1958.
11. H. V. Cottony, J. R. Jöhler, Proc. I.R.E., 1953, v. 40; N 9; 1053.
12. Шкловский И. С., Астр. журн., т. 29, вып. 4, 418, 1952.