

УВЕРЕННОЕ И СЛУЧАЙНОЕ РАДИООБНАРУЖЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

Е. И. ФИАЛКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Введение. Постановка задачи

Обычно при рассмотрении зависимости числа зафиксированных метеоров от параметров локатора пользуются соотношениями, справедливыми в случае приема сигналов, отраженных от неустойчивых ионизированных следов [1].

Вместе с тем может оказаться, что система фиксирует лишь следы устойчивого типа. Зависимость результата наблюдений (численности) от параметров радиолокатора в этом случае может существенно отличаться от аналогичных зависимостей, характерных для приема неустойчивых эхо.

Для правильной интерпретации результатов наблюдений, а также для уверенного расчета параметров аппаратуры, необходимо, прежде всего, определить, какие следы станция способна фиксировать (только устойчивые, неустойчивые и устойчивые и т. п.). Необходимо установить зависимость между числом зарегистрированных метеоров и параметрами радиолокатора, метеора и атмосферы.

Следует отметить, что эта зависимость может быть различной не только в случаях приема устойчивых и неустойчивых следов, но и при уверенном и случайном обнаружении метеоров данного типа.

Для выяснения перечисленных вопросов необходимо учесть все метеорные сигналы, принимаемые локатором, что связано с большими затруднениями. Прежде всего устойчивые следы могут давать длительные отражения, и вследствие этого многие из них будут носить ненормальный характер [1].

Но даже при учете одних лишь нормальных отражений, поступающих из плоскости эхо (то есть плоскости, перпендикулярной направлению на радиант и содержащей точку расположения локатора), аналитическое решение задачи крайне затруднено.

Искомые зависимости могут быть получены в явном виде для частного случая, представляющего большой интерес, а именно для приема из области характеристической высоты (то есть высоты, на которой имеет место наиболее интенсивная ионизация в метеорном следе) [1].

Задачей настоящей работы является выяснение зависимости численности обнаруженных устойчивых метеоров, принадлежащих пото-

ку, от параметров радиолокатора и характеристик метеоров и атмосферы для случая приема нормально-отраженных сигналов, поступающих из области характеристической высоты.

Основные соотношения

Длительно существующие метеоры, дающие эхо-сигнал, превышающий пороговый уровень, уверенно обнаруживаются радиолокатором. Ионизированные следы, существующие весьма кратковременно, могут оказаться незамеченными локатором; обнаружение таких следов является случайным событием.

Для уверенного обнаружения следа необходимо, чтобы время, в течение которого эхо-сигналы превышают пороговый уровень, было большим, чем минимально-необходимое время T_{\min} [2]; в частном случае T_{\min} равно периоду посылки зондирующих импульсов T_i .

Следы устойчивого типа (с линейной плотностью электронов $\alpha \gg 2,4 \cdot 10^{12}$ электронов/см [1]) дают резкое нарастание и резкий спад отражения, вследствие чего при любом превышении сигнала над уровнем шума длительность регистрации метеора (T) будет практически одинаковой.

Возможно несколько случаев обнаружения слабого метеора. Может оказаться, что отражение, достигшее порогового уровня ϵ_n , имеет длительность $T < T_{\min}$ (рис. 1); обнаружение метеора, дающего такое отражение, будет случайным; отражение с длительностью $T \approx T_{\min}$

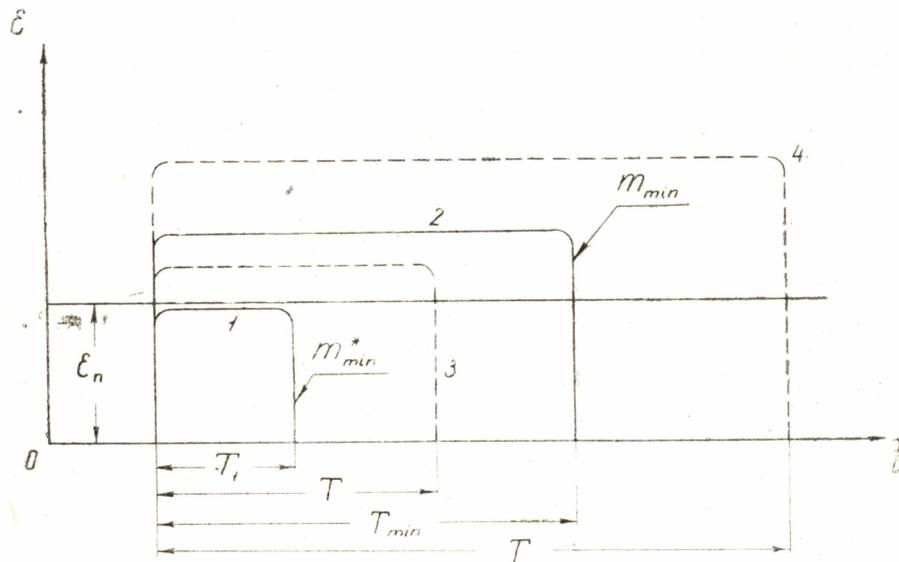


Рис. 1. Случай, когда регистрируются как случайно, так и уверенно обнаруживаемые следы. t — время; ϵ — мощность эхо-сигналов; ϵ_n — уровень порогового сигнала; 1, 2, 3 и 4— огибающие амплитуд эхо-сигналов; T — длительность отражения; T_{\min} — минимально-необходимое время превышения эхо-сигналами порогового уровня, при котором обнаружение становится уверенным. 1— отражение, достигшее порогового уровня. 2— отражение, длительность которого равна T_{\min} . Отражение 3 обнаруживается случайно; отражение 4— уверенно.

m_{\min} — масса метеорного тела, создающего ионизированный след, длительность отражения от которого равна T_{\min} ;

m_{\min}^* — масса метеорного тела, создающего ионизированный след, отражение от которого достигает порогового уровня ϵ_n .

превысит пороговый уровень. Но может оказаться, что отражение, достигшее порогового уровня, имеет длительность $\geq T_{\min}$ (рис. 2); в этом случае обнаружение метеора будет достоверным событием.

В первом случае слабые метеоры обнаруживаются случайно (а сильные—уверенно); во втором—любой зафиксированный метеор обнаруживается уверенно.

Количество уверенно обнаруженных метеоров, проходящих за время Δt через элемент плоскости эхо (площадь которого Δs), равно

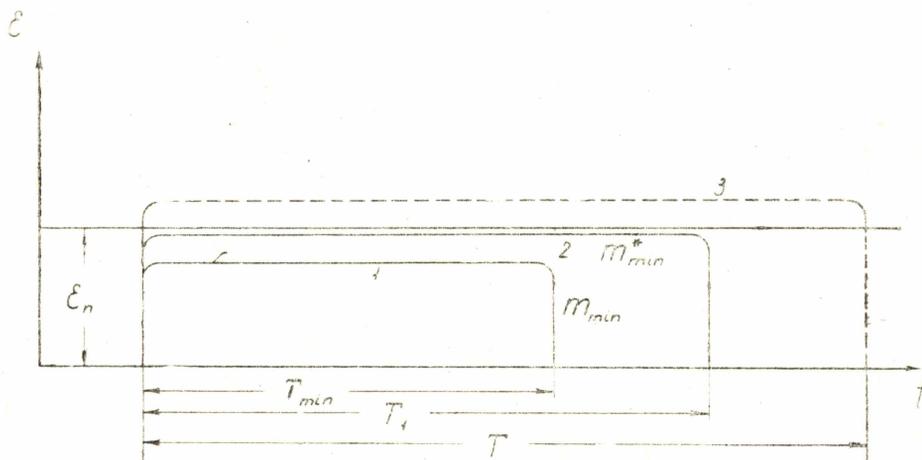


Рис. 2. Случай, когда регистрируются уверенно обнаруживаемые метеоры. Обозначения те же, что и на рис. 1. Любое отражение, превысившее пороговый уровень (например, 3), имеет длительность $T > T_{\min}$ и обнаруживается уверенно.

$$N_{yb} = \Delta s \Delta t \int_{m_{\min}}^{\infty} p(m) dm, \quad (1)$$

где m_{\min} — минимальная масса метеорного тела, дающего отражение длительностью $T = T_{\min}$ (и сигнал, превышающий пороговый уровень $\epsilon \geq \epsilon_n$, см. рис. 1); $p(m)$ — дифференциальный закон распределения метеорных тел по массам, представляемый обычно в виде [1]

$$p(m) = \frac{b}{m^s}, \quad (2)$$

где b и s — константы, не зависящие от m .

Количество случайно обнаруженных метеоров, проходящих через элемент плоскости эхо (Δs), как нетрудно показать, будет равно:

$$N_{cl} = \Delta s \cdot \Delta t \cdot \int_{m_{\min}^*}^{m_{\min}} p(m) q(m) dm, \quad (3)$$

где m_{\min}^* — минимальная масса метеорного тела, соответствующая пороговому сигналу (рис. 1); $q(m)$ — вероятность обнаружения ионизированного следа, образуемого метеорным телом с массой m .

Заметим, что в случае, когда массе m_{\min}^* соответствует отражение с длительностью $T \geq T_{\min}$ (рис. 2), $N_{cl} = 0$, а

$$N_{yb} = \Delta s \cdot \Delta t \int_{m_{\min}^*}^{\infty} p(m) dm. \quad (4)$$

Для нахождения $N_{y\theta}$ и N_{cl} воспользуемся известными выражениями для мощности эхо-сигнала ε и длительности отражения [1]

$$\varepsilon = \frac{P_i G^2 \lambda^3}{32\pi^4 R^3} g^2, \quad (5)$$

где P_i — излучаемая мощность в импульсе; G — коэффициент направленного действия антенны; λ — длина волны; R — наклонная дальность от локатора до следа (по нормали); g — коэффициент отражения, равный

$$g = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} e^{-1/4} \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^{1/4} \alpha^{1/4}, \quad (6)$$

e , m_e — заряд и масса электрона; c — скорость света; e — основание натуральных логарифмов; α — линейная плотность электронов, равная

$$\alpha = \frac{m\beta \cos \chi}{\mu H} \cdot \frac{p}{p_m} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{p}{p_m}\right)^2; \quad (7)$$

β — вероятность ионизации; χ — зенитное расстояние радианта; μ — масса атома метеорного тела; H и p — высота однородной атмосферы и давление (H , p и α соответствуют участку ионизированного следа, нормально рассеивающему радиоволны); p_m — давление на характеристической высоте (то есть высоте, на которой $\alpha = \alpha_{\max}$).

Для отражений, приходящих из слоя, лежащего в области характеристической высоты ($p \approx p_m$), как следует из (7),

$$\alpha \approx \alpha_{\max} = \frac{4}{9} \frac{m\beta \cos \chi}{\mu H}, \quad (8)$$

и (5) с учетом (6) и (8) примет вид

$$\varepsilon = K_1 \sqrt{m}, \quad (9)$$

где

$$K_1 = A_1 \frac{P_i G^2 \lambda^3}{R^3} \sqrt{\frac{\beta \cos \chi}{\mu H}}, \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{1}{96\pi^3} e^{-1/2} \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^{1/2} \approx 1,08 \cdot 10^{-10}. \quad (11)$$

Отражению, достигшему порогового уровня ε_n , как видно из (9), соответствует масса метеорного тела, равная

$$m_{\min}^* = \left(\frac{\varepsilon_n}{K_1}\right)^2. \quad (12)$$

Длительность отражения от устойчивого следа выражается формулой [1]

$$T = 1,124 \cdot 10^{-12} \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D} \cdot \alpha, \quad (13)$$

где D — коэффициент диффузии.

Для сигналов, приходящих из области характеристической высоты, как следует из (8) и (13), имеем

$$T = K_2 \cdot m, \quad (14)$$

где

$$K_2 = A' \cdot \frac{\beta \cos \gamma}{\rho HD} \lambda^2, \quad (15)$$

$$A' = \frac{1,124}{36\pi^2} \cdot 10^{-12} = 3,17 \cdot 10^{-15}.$$

Длительности отражения $T = T_{\min}$ соответствует масса

$$m_{\min} = \frac{T_{\min}}{K_2}. \quad (16)$$

Количество метеоров, зарегистрированных при различных видах обнаружения

Уверенное обнаружение

Количество уверенно обнаруженных метеоров, как следует из (1) и (2), будет равно

$$N_{yв} = \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t}{s-1} \cdot \frac{1}{m_{\min}^{s-1}}. \quad (17)$$

где m_{\min} определяется из (16).

Выражение (17) справедливо в случае, когда отражение с длительностью $T = T_{\min}$ превышает пороговый уровень ε_n . Если же длительность отражения, достигшего уровня ε_n , оказывается большей, чем T_{\min} , то $N_{yв}$ находится из (4);

$$N_{yв} = \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t}{s-1} \cdot \frac{1}{m_{\min}^{*(s-1)}}, \quad (18)$$

где m_{\min}^* определяется формулами (12), (10) и (11).

Случайное обнаружение

Рассмотрим частный случай: $q(m) = \frac{T}{T_{\min}}$.

Выразив вероятность обнаружения $q(m) = \frac{T}{T_{\min}}$ через (14) и подставив (2) в (3), получим

$$N_{сл} = \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t \cdot K_2}{T_{\min}} \int_{m_{\min}^*}^{m_{\min}} \frac{dm}{m^{s-1}}. \quad (19)$$

После интегрирования и простых преобразований представим (19) в виде

$$N_{cl} = \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t}{(s-2)m_{\min} \cdot m_{\min}^{*(s-2)}} \left[1 - \left(\frac{m_{\min}^*}{m_{\min}} \right)^{s-2} \right], \quad (20)$$

где m_{\min} и m_{\min}^* определяются из (16) и (12).

Выражение (20) справедливо при $s \neq 2$.

При $s = 2$, как следует из (19) и (16),

$$N_{cl} = \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t}{m_{\min}} \ln \frac{m_{\min}}{m_{\min}^*}. \quad (21)$$

Общее количество регистраций

Общее количество метеоров, обнаруженных как уверенно, так и случайно, равно

$$N_{\Sigma} = N_{ув} + N_{сл}. \quad (22)$$

В случае же $m_{\min} < m_{\min}^*$, что имеет место, если длительность отражения, достигшего порогового уровня, оказывается большей, чем T_{\min} (рис. 2), $N_{\Sigma} \equiv N_{ув}$.

Представим (22) в виде

$$N_{\Sigma} = N_{ув} \cdot \Psi, \quad (23)$$

где

$$\Psi = 1 + \psi. \quad (24)$$

и

$$\psi = \frac{N_{сл}}{N_{ув}}. \quad (25)$$

Подставляя (17) и (20) в (25) и (24), получим

$$\Psi = 1 + \frac{s-1}{s-2} \left[\left(\frac{m_{\min}}{m_{\min}^*} \right)^{s-2} - 1 \right]. \quad (26)$$

Для $s = 2$, как следует из (24), (17) и (21), имеем

$$\Psi = 1 + \ln \frac{m_{\min}}{m_{\min}^*}. \quad (27)$$

Как видно из (23), (17), (26) и (27), общее число регистраций может существенно отличаться от числа уверенно обнаруженных метеоров.

Если параметры аппаратуры таковы, что $m_{\min} \gg m_{\min}^*$, то при $s > 2$

$$\Psi \approx \frac{s-1}{s-2} \left(\frac{m_{\min}}{m_{\min}^*} \right)^{s-2}, \quad (28)$$

а при $s = 2$

$$\Psi \approx \ln \frac{m_{\min}}{m_{\min}^*}; \quad (29)$$

в случае же $s < 2$, как следует из (26),

$$\Psi \approx 1 + \frac{s-1}{2-s}. \quad (30)$$

Зависимость $\Psi \left(\frac{m_{\min}}{m_{\min}^*}; s \right)$, построенная по формулам (26) и (27), представлена на рис. 3 и 4.

Таким образом, отклонение N_{Σ} от $N_{\text{ув}}$ тем существеннее (при прочих одинаковых условиях), чем больше величина показателя s .

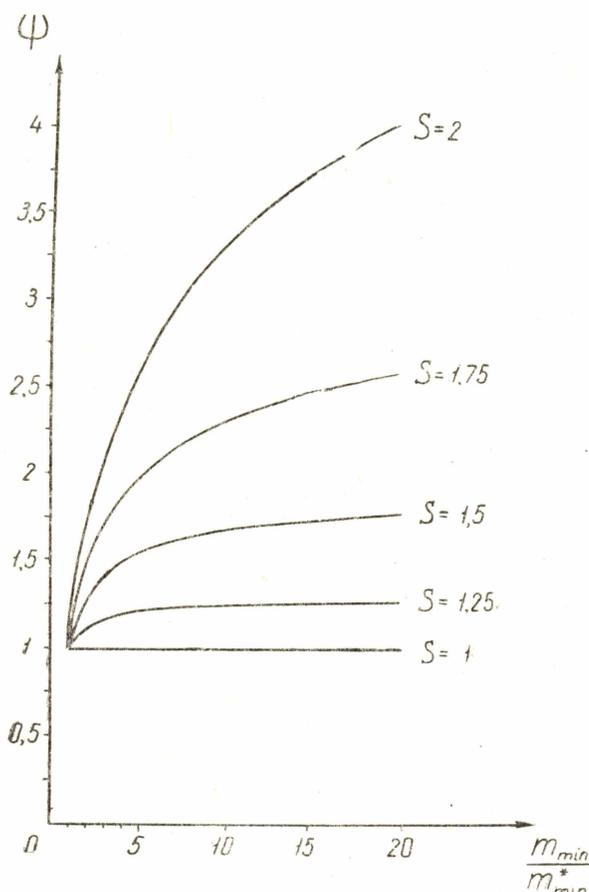


Рис. 3. Соотношение между общим числом зафиксированных метеоров N_{Σ} и числом метеоров, обнаруживаемых уверенно $N_{\text{ув}}$.

m_{\min} — масса метеорного тела, соответствующая длительности отражения $T = T_{\min}$;

m_{\min}^* — масса метеорного тела, соответствующая пороговому эхо-сигналу ($\varepsilon = \varepsilon_n$);

s — показатель, характеризующий распределение метеорных тел по массам.

На рис. дана зависимость $\Psi \left(\frac{m_{\min}}{m_{\min}^*} \right)$ при $s = 1 \div 2$.

Зная параметры радиолокатора (P_i , G , λ , ε_n и T_{\min}), удаленность метеора от точки наблюдения (R), скорость метеоров v (определяющую значение коэффициента диффузии D на характеристической высоте) и распределение метеорных тел по массам (s), можем оценить

во сколько раз общее число регистраций превышает количество уверенных обнаружений (см. (26), (27), (16), (15), (12), (10) и (11)):

$$\Psi = 1 + \frac{s-1}{s-2} \left\{ \left[3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left(\frac{P_i G \lambda^2}{\epsilon_n R^3} \right)^2 \right]^{s-2} - 1 \right\}$$

(при $s \neq 2$) (31)

$$\Psi = 1 + \ln \left[3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left(\frac{P_i G \lambda^2}{\epsilon_n R^3} \right)^2 \right]$$

(при $s = 2$). (32)

Как видно из изложенного (в данной работе и в [3]) естественно ожидать, что результаты анализа систем могут быть резко различны-

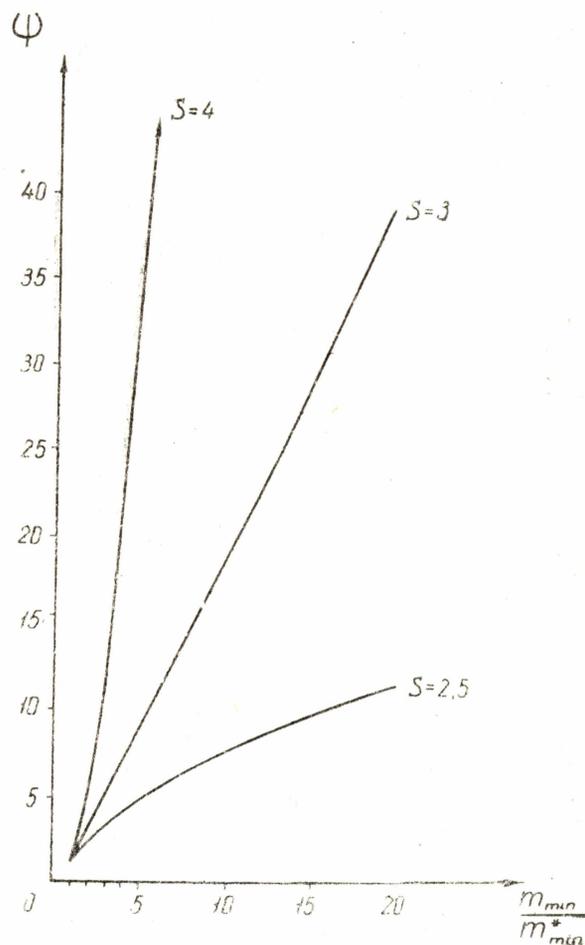


Рис. 4. То же, что на рис. 3 (для $s=2.5-4$).

ми в зависимости от того, какие следы (только устойчивые или следы разных типов) фиксирует система; обнаруживаются ли сигналы только уверенно или имеет место также и случайное обнаружение и т. п.

Поэтому необходимо получить критерии, позволяющие определить условия обнаружения устойчивых следов.

Условия уверенного и случайного обнаружения устойчивых следов

Зависимость мощности сигнала от линейной плотности электронов (в устойчивом следе) может быть получена из (5) и (6):

$$\varepsilon = A_2 \frac{P_i G^2 \lambda^3}{R^3} \alpha^{1/2}, \quad (33)$$

где

$$A_2 = \frac{1}{64\pi^3 e^{1/2}} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^{1/2} \approx 1,6 \cdot 10^{-10}.$$

Пороговому сигналу ε_n будет соответствовать след устойчивого типа, если

$$\alpha(\varepsilon_n) \gtrsim n \cdot 2,4 \cdot 10^{12} \text{ эл/см}. \quad (34)$$

При $\alpha \gtrsim 10^{13} \text{ эл/см}$ ионизированный след обладает характерными особенностями устойчивых следов [1]. Положив $n \approx 4 \div 5$, получим

$$\frac{P_i G^2 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3}{\varepsilon_n} \gtrsim 2 \cdot 10^3. \quad (35)$$

При выполнении условия (35) система не регистрирует ни следов неустойчивого типа ($\alpha \ll 2,4 \cdot 10^{12}$), ни следов промежуточного типа ($\alpha \approx 10^{12}$), но может регистрировать устойчивые следы ($\alpha \gg 2,4 \cdot 10^{12}$).

Обнаружение является уверенным, если сигнал порогового уровня ($\varepsilon = \varepsilon_n$) имеет длительность $T \geq T_{\min}$, то есть, если $m_{\min}^* \gg m_{\min}$. Это условие, как следует из (12) и (16), можно представить в виде

$$\left(\frac{\varepsilon_n}{K_1} \right)^2 \geq \frac{T_{\min}}{K_2}. \quad (36)$$

Подставляя в (36) K_1 (10) и K_2 (15), получим

$$\frac{P_i G^2 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3}{\varepsilon_n} \leq \frac{520 \lambda}{\sqrt{D T_{\min}}}. \quad (37)$$

При выполнении условия (37) обнаружение носит уверенный характер.

Случайное обнаружение метеорных следов имеет место, если отражения, достигшие порогового уровня ($\varepsilon = \varepsilon_n$), имеют длительность $T < T_{\min}$, то есть, если $m_{\min}^* < m_{\min}$. Используя (12) и (16), получим

$$\left(\frac{\varepsilon_n}{K} \right)^2 < \frac{T_{\min}}{K_2}, \quad (38)$$

и* после подстановки в (38) выражений (10) и (15) неравенство (38) примет вид

$$\frac{P_i G^2 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3}{\varepsilon_n} \geq \frac{520 \lambda}{\sqrt{D T_{\min}}}. \quad (39)$$

Таким образом, радиолокатор фиксирует следы устойчивого типа, причем обнаружение носит как случайный, так и уверенный характер, если выполняются условия (35) и (39), то есть, если

$$2 \cdot 10^3 \gtrsim \frac{P_i G^2}{\varepsilon_n} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 > \frac{520 \lambda}{V D T_{\min}}. \quad (40)$$

Совершенно очевидно, что условие (40) имеет физический смысл, если

$$\frac{520 \lambda}{V D T_{\min}} > 2 \cdot 10^3, \quad (41)$$

что можно представить в виде

$$T_{\min} \gg 7 \cdot 10^{-2} \frac{\lambda^2}{D}. \quad (42)$$

Обычно для метеорных наблюдений используется диапазон волн $\lambda \approx 4-10$ м; коэффициент диффузии $D \lesssim 20$ м²/сек (для скоростей метеоров около 60 км/сек и ниже); следовательно, правая часть неравенства (42) практически всегда превосходит величину 0,056 сек.

Иными словами, случайное обнаружение устойчивых следов при $\lambda \gtrsim 4$ м и $v \lesssim 60$ км/сек возможно лишь при $T_{\min} \gtrsim 0,056$ сек. Системы же, обладающие оперативностью, характеризуемой $T_{\min} \lesssim 0,056$ сек, работают в режиме уверенного обнаружения устойчивых следов (если, естественно, выполняется условие (35)).

Совершенно очевидно, что высокооперативные локаторы, способные регистрировать следы с длительностью, превышающей период повторения импульсов, будут работать в режиме уверенного обнаружения импульсов, так как частоты повторения известных локаторов составляют десятки и сотни имп/сек, и лишь в локаторах П-2М (модернизация К. В. Костылева) эффективная частота повторения $F = 25$ имп/сек.

Однако практически, для регистрации метеора, необходимо, чтобы длительность отражения T превосходила несколько периодов посылок ($T_{\min} = n_1 \cdot T_i$). Поэтому случайное обнаружение устойчивых следов практически возможно; в случае же высокооперативных локаторов оно не имеет места.

В диапазоне волн $\lambda < 4$ м естественно ожидать, что большинство зафиксированных метеоров будет обнаруживаться случайно.

Выяснив характерные особенности высоко- и низкочувствительных локаторов, перейдем к анализу зависимости числа обнаруженных метеоров от параметров радиолокатора.

Зависимость числа уверенно обнаруженных метеоров устойчивого типа от параметров радиолокатора

Как уже указывалось, возможны два режима работы, дающих уверенное обнаружение. В первом случае все фиксируемые метеоры обнаруживаются уверенно; это имеет место, когда отражение, достигшее порогового уровня, имеет длительность $T \gg T_{\min} (m_{\min}^* \gg m_{\min})$, рис. 2). Во втором случае фиксируются как случайно, так и уверенно обнаруживаемые следы, причем отражение, достигшее порогового уровня, имеет длительность $T \leq T_{\min} (m_{\min}^* \leq m_{\min})$, рис. 1). Рассмотрим 2 случая:

1. Уверенное обнаружение (случай $m_{\min}^* \geq m_{\min}$).

Такой режим имеет место при выполнении условия (37).

При этом, естественно, $N_{\Sigma} \equiv N_{\text{уб}}$.

Подставляя в (18) выражение для m_{\min}^* (12) с учетом (10) и (11), получим:

$$N_{\text{уб}} = B_1 \left(\frac{P_i G^2 \lambda^3}{R^3 \varepsilon_n} \right)^{2(s-1)}, \quad (43)$$

где

$$B_1 = (1,08 \cdot 10^{-10})^{2(s-1)} \cdot \frac{b \cdot \Delta s \Delta t (\beta \cos \lambda)^{s-1}}{s-1 (\mu H)}. \quad (44)$$

В диапазоне волн $\lambda \approx 3-10$ м пороговый сигнал $\varepsilon_n \sim \lambda^{2,3}$ [4], и зависимость $N_{\text{уб}}(\lambda)$ можно представить в виде:

$$N_{\text{уб}} \sim \lambda^{1,4(s-1)}. \quad (45)$$

2. Случай $m_{\min}^* \leq m_{\min}$.

Этот режим имеет место при выполнении условия (39). Количество уверенно обнаруженных метеоров определяется формулой (17).

Подставляя в (17) развернутое выражение m_{\min} (см. (16) и (15)), получим

$$N_{\text{уб}} = B_2 \cdot \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}}, \quad (46)$$

где

$$B_2 = (3,17 \cdot 10^{-15})^{s-1} \cdot \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t (\beta \cos \lambda)^{s-1}}{s-1 (\mu HD)}. \quad (47)$$

Как видно из (46) и (47), в последнем случае количество уверенно обнаруженных метеоров устойчивого типа не зависит ни от мощности передатчика, ни от коэффициента направленного действия антенной системы, ни от наклонной дальности, что на первый взгляд могло бы показаться неестественным.

Однако независимость $N_{\text{уб}}$ от P_i , ε_n , G и R вполне обоснована: условие $m_{\min}^* \leq m_{\min}$ означает, что масса m_{\min} метеорного тела, создающего отражение длительностью T_{\min} , больше массы m_{\min}^* , соответствующей пороговому сигналу (рис. 1), а так как величина массы m_{\min} определяется не амплитудными, а временными соотношениями, то естественно, что в этом случае отсутствует явная зависимость $N_{\text{уб}}$ от P_i , ε_n , G и R .

Однако это не означает, что такой результат будет иметь место при любых значениях P_i и т. п. Наоборот, полученный результат справедлив лишь при выполнении условия (39), в котором и фигурирует мощность P_i , коэффициент направленного действия G и т. п.

Таким образом, если локатор фиксирует лишь уверенно обнаруживаемые следы, $N_{\text{уб}}$ существенно зависит от параметров локатора P_i , G , ε_n , λ (и распределения метеорных тел по массам), причем в диапазоне волн, обычно используемых для радиолокационных наблюдений метеоров при $s \approx 2$ $N_{\text{уб}} \sim \lambda^{1,4}$. Если же локатор фиксирует как уверенно, так и случайно обнаруживаемые следы, то $N_{\text{уб}}$ зависит от параметров локатора λ и T_{\min} (и показателя s , характеризующего распределение метеорных тел по массам); при $s \approx 2$ $N_{\text{уб}} \sim \lambda^2$.

Зависимость общего числа зафиксированных метеоров устойчивого типа от параметров локатора

В случае $m_{\min}^* \geq m_{\min}$ все фиксируемые метеоры обнаруживаются уверенно, т. е. $N_{\Sigma} \equiv N_{\text{уб}}$.

Если же $m_{\min}^* \ll m_{\min}$, то имеет место как уверенное, так и случайное обнаружение, и $N_{\Sigma} = N_{\text{уб}} \cdot \Psi$ (см. (23)—(25)).

Подставляя в (23) выражение для $N_{\text{уб}}$ (46) и Ψ (31) и (32), получим:

1) при $s \neq 2$

$$N_{\Sigma} = B_2 \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}} \left\{ 1 + \frac{s-1}{s-2} \left[\left(3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left[\frac{P_i G^2 \lambda^2}{\epsilon_n R^3} \right]^2 \right)^{s-2} - 1 \right] \right\} \quad (48)$$

(B_2) — см. (47));

2) при $s = 2$

$$N_{\Sigma} = B_2 \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}} \left\{ 1 + \ln \left(3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left[\frac{P_i G^2 \lambda^2}{\epsilon_n R^3} \right]^2 \right) \right\}. \quad (49)$$

Как видим, зависимость N_{Σ} от параметров локатора весьма сложна.

Рассмотрим частный случай $m_{\min}^* \ll m_{\min}$, имеющий место, как следует из (12), (16), (10) и (15), при выполнении условия

$$\frac{P_i G^2}{\epsilon_n} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 \gg \frac{520 \lambda}{V D T_{\min}}. \quad (50)$$

Если показатель $s > 2$, то формула, определяющая коэффициент Ψ ((26) и (31)), упрощается (см. (28)) и выражение (48) принимает вид

$$N_{\Sigma} \approx B_3 \left[\frac{P_i G^2}{\epsilon_n R^3} \right]^{2(s-2)} \frac{\lambda^{6s-10}}{T_{\min}}, \quad (51)$$

где

$$B_3 = [3,17 \cdot 10^{-15}]^{s-1} \cdot [3,66 \cdot 10^{-6}]^{s-2} \frac{b \cdot \Delta s \cdot \Delta t}{s-2} \left(\frac{\beta \cos Z}{\mu H} \right)^{s-1} \cdot \frac{1}{D}. \quad (52)$$

(см. (47), (48)).

При $s = 2$ выражение для коэффициента Ψ ((27) и (32)) также упрощается (29) и формула (49) примет вид

$$N_{\Sigma} = B_2 \frac{\lambda^2}{T_{\min}} \ln \left(3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left[\frac{P_i G^2 \lambda^2}{\epsilon_n R^3} \right]^2 \right) \quad (53)$$

B_2 — см. (47).

При $s < 2$ коэффициент Ψ ((26) и (31)) преобразуется в (30), и общая численность зафиксированных метеоров (48) станет равной

$$N_{\Sigma} \approx B_2 \cdot \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}} \left(1 + \frac{s-1}{2-s} \right). \quad (54)$$

Как видно из (51) и (54), в случае $s \geq 2$ N_{Σ} зависит от параметров локатора P_i , G , ϵ_n , λ и T_{\min} , в то время как при $s < 2$ — только от λ и T_{\min} .

Зависимость $N_{\Sigma}(\lambda)$ в диапазоне волн, обычно используемых в метеорной радиолокации ($\lambda \approx 4 \div 10$ м; $\epsilon_n \sim \lambda^{2,3}$), может быть представлена в виде:

1) $s > 2$ (см. (51)):

$$N_{\Sigma} = B_4 \cdot \frac{\lambda^{1,4(s-0,7)}}{T_{\min}} \quad (55)$$

где

$$B_4 = B_3 \left[\frac{P_i G_2}{a_1 R^3} \right]^{2(s-2)} \quad (56)$$

$$\left(B_3 - \text{см. [52];} \quad a_1 = \frac{\epsilon_n}{\lambda^{2,3}} \right).$$

2) $s = 2$ (см. (53)):

$$N_{\Sigma} = B_2 \cdot \frac{\lambda^2}{T_{\min}} \left\{ 2 \ln \left(\frac{\lambda^2}{\epsilon_n} \right) + a_2 \right\}, \quad (57)$$

где

$$a_2 = \ln \left(3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left[\frac{P_i G^2}{R^3} \right]^2 \right) \quad (58)$$

(B_2 - см. (47)). При $\lambda \approx 4 \div 10$ м.

$$N_{\Sigma} = B_2 \frac{\lambda^2}{T_{\min}} \left\{ a_3 - 0,6 \cdot \ln \lambda \right\}, \quad (59)$$

где

$$a_3 = \ln \left(3,66 \cdot 10^{-6} D T_{\min} \left[\frac{P_i G^2}{a_1 R^3} \right]^2 \right). \quad (60)$$

Напомним, что формулы (51)–(60) справедливы для случая $m_{\min}^* \ll m_{\min}$.

3) $s < 2$ (см. (54)):

$$N_{\Sigma} = B_5 \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}}, \quad (61)$$

где

$$B_5 = \left(1 + \frac{s-1}{2-s} \right) B_2.$$

Полученные результаты для $\lambda \approx 4 \div 10$ м можно представить следующим образом.

Если все регистрируемые метеоры обнаруживаются уверенно, то $N_{\Sigma} \equiv N_{\text{ув}} \sim \lambda^{1,4(s-1)}$

Если фиксируются как уверенно, так и случайно обнаруженные метеоры, то $N_{\text{ув}} \sim \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{(s-1)}}$.

В частном случае $m_{\min}^* \ll m_{\min}$:

$$N_{\Sigma} \sim \frac{\lambda^{1,4(s-0,57)}}{T_{\min}} \quad \text{при } s > 2;$$

$$N_{\Sigma} \sim \frac{\lambda^2}{T_{\min}} (a_3 - 0,6 \ln \lambda) \quad \text{при } s = 2;$$

$$N_{\Sigma} \sim \frac{\lambda^{2(s-1)}}{T_{\min}^{s-1}} \quad \text{при } s < 2.$$

Проведенный анализ позволяет сделать ряд выводов относительно обнаружения устойчивых следов.

Частотная зависимость часового числа зафиксированных метеоров устойчивого типа существенно определяется величиной показателя s , характеризующего закон распределения метеорных тел по массам.

В случае, если система обеспечивает „беспропускное“ обнаружение устойчивых следов, численность регистраций при небольших s относительно слабо зависит от длины волны. Например, при $s < 2$, $N_{\Sigma} \equiv N_{\text{ув}} \sim \lambda^n$, где $n < 1,4$. Вместе с тем при больших s зависимость $N_{\Sigma}(\lambda)$ может оказаться сильной. Например, при $s \approx 3,5$ $n \approx 3,5$.

В случае, если система способна регистрировать случайно обнаруживаемые следы, зависимость числа уверенно обнаруженных метеоров от длины волны оказывается несколько более резкой, чем в предыдущем случае; при $s \approx 2$ $N_{\text{ув}} \sim \lambda^2$.

Если масса метеорного тела, которой соответствует отражение на пороговом уровне, намного меньше массы, дающей отражение, длительность которого $T = T_{\text{min}}$, то при $s \gg 2$ обнаружение будет носить в основном, случайный характер. Если же $s < 2$, то значительная (а при $s < 1,5$ — большая) часть метеоров обнаруживается уверенно (рис. 2).

Зависимость числа обнаруженных метеоров N_{Σ} от длины волны оказывается несколько более сильной, чем в случае беспропускного обнаружения.

Если обнаружение носит как уверенный, так и случайный характер, то зависимость $N_{\Sigma}(\lambda)$ мало отличается от зависимости $N_{\text{ув}}(\lambda)$ (а в области $s < 2$ они имеют одинаковый характер). Если представить $N_{\Sigma}(\lambda)$ в виде $N_{\Sigma}(\lambda) \sim \lambda^n$, то при $s < 2$ $n < 2$; при $s = 2$ $n \approx 2$; при $s \approx 3,5$ $n \approx 4$. Таким образом при больших значениях показателя s зависимость $N_{\Sigma}(\lambda)$ может быть весьма сильной.

В случае, когда система способна регистрировать случайно обнаруживаемые следы, как N_{Σ} , так и $N_{\text{ув}}$ существенно зависят от оперативности системы: $N_{\text{ув}}$ и N_{Σ} (при $s < 2$) $\sim \frac{1}{T_{\text{min}}^{s-1}}$; при $s \gg 2$ $N_{\Sigma} \sim \frac{1}{T_{\text{min}}}$.

Как видно из приведенных соотношений, характер функции $N_{\Sigma}(\lambda)$ слабо зависит от оперативности системы (T_{min}).

В свою очередь, изменение N_{Σ} вследствие повышения или понижения оперативности системы практически не связано с длиной волны.

Сравнение $N_{\Sigma}(\lambda)$ при регистрации устойчивых и неустойчивых следов

Как видно из сравнения результатов анализа, проведенного в настоящей работе и в работе [3], при регистрации неустойчивых и устойчивых следов зависимости $N_{\Sigma}(\lambda, T_{\text{min}})$ имеют совершенно различный характер.

Прежде всего, в случае высокочувствительной системы, способной регистрировать неустойчивые следы, характер зависимости $N_{\Sigma}(\lambda)$ существенно определяется оперативностью системы: при малых T_{min} N_{Σ} мало изменяется при переходе от одних волн к другим (в пределах $\lambda \approx 4 \div 10$ м); при больших T_{min} изменение λ приводит к очень резкому изменению N_{Σ} .

В случае же низкочувствительной системы зависимость N_{Σ} от λ и T_{min} оказывается гораздо более слабой, чем в случае высокочувствительных систем при малых λ и при больших T_{min} , но более сильной, чем при больших λ и малых T_{min} .

Выводы

В случае низкочувствительной системы, обнаруживающей лишь следы устойчивого типа, зависимость численности зафиксированных метеоров от параметров аппаратуры определяется режимом работы лоатора и характером распределения метеорных тел по массам.

1) 1-й режим—беспропускное обнаружение метеорных отражений, превысивших пороговый уровень.

1. Количество обнаруженных метеоров ($N_{\Sigma} \equiv N_{y\delta}$) очень резко зависит от параметров радиолокатора P_i , G , ε_n , λ , а также от наклонной дальности R ; эта зависимость тем резче, чем больше параметр s , характеризующий распределение метеорных тел по массам.

Например, при $s=2$

$$N_{\Sigma} \sim \frac{P_i^2 G^4 \lambda^6}{R^6 \varepsilon_n^2}.$$

2. В диапазоне волн, обычно используемых для радиолокации метеоров ($\lambda \approx 4-10 м$) количество зафиксированных отражений $\sim \lambda^{1,4(s-1)}$.

3. Изменение оперативности системы (при условии, что T_{\min} остается малым) не влияет на численность обнаруженных метеоров.

4. При нестабильности параметров радиолокатора и изменении G и R (вследствие изменения зенитного расстояния радианта потока χ) N_{Σ} изменяется весьма резко,—и тем резче, чем больше s .

5. Требования к стабильности параметров радиолокатора P_i , ε_n , λ и G весьма жесткие.

2) 2-й режим—регистрируются лишь те сигналы, длительность которых превышает некоторое минимальное значение T_{\min} (но система могла бы обнаруживать и сигналы с $T < T_{\min}$, превысившие пороговый уровень).

1. Количество обнаруженных метеоров ($N_{y\delta}$) зависит от длины волны λ и оперативности системы (T_{\min}), причем эта зависимость тем сильнее, чем больше s ; при $s=2$

$$N_{y\delta} \sim \frac{\lambda^2}{T_{\min}}.$$

2. $N_{y\delta}$ не зависит от P_i , ε_n , G , R .

3. Нестабильность параметров P_i и ε_n и изменение G и R (например, вследствие изменения χ потока) не изменяют численности $N_{y\delta}$ (если при этом не нарушается условие $m_{\min}^* < m_{\min}$). Нестабильность λ и T_{\min} приводит к изменению $N_{y\delta}$.

3) 3-й режим—регистрируются все отражения, превысившие пороговый уровень, причем длительные отражения фиксируются уверенно (без пропусков), а кратковременные—случайно (то есть могут быть пропущены).

1. Общее количество зафиксированных метеоров N_{Σ} , обнаруженных как уверенно, так и случайно, зависит от параметров лоатора P_i , ε_n , G , λ , T_{\min} , а также от R . Эта зависимость весьма сложна и определяется характером закона распределения метеорных тел по массам.

2. Относительное количество случайно обнаруженных метеоров существенно определяется параметром метеорного потока s : чем больше s , тем ощутительнее доля случайно обнаруженных метеоров.

3. Если относительное количество случайно обнаруженных метеоров значительно (что имеет место при $m_{\min}^* \ll m_{\min}$), характер зависимости N_{Σ} от параметров системы качественно различен при различных значениях s :

а) при $s > 2$ N_{Σ} весьма резко зависит от P_i , G , ε_n , λ , T_{\min} , а также от R ;

б) при $s=2$ зависимость N_{Σ} от λ и T_{\min} сильная, а от P_i , G , ϵ_n и R —слабее, чем в случае $s>2$;

в) при $s<2$ N_{Σ} зависит от λ и T_{\min} (но слабее, чем в случае $s=2$) и практически не зависит от P_i , G , ϵ_n и R .

4. Таким образом, изменение параметров аппаратуры P_i , G , ϵ_n , а также изменение R вследствие непостоянства зенитного расстояния радианта потока χ вызывает резкое изменение численности при наблюдении потоков с большими s , но практически не приводит к изменению N_{Σ} при наблюдении потоков с малыми s . Нестабильность λ и T_{\min} влияет на N_{Σ} как при больших, так и при малых s .

5. Требования к стабильности параметров аппаратуры повышаются по мере увеличения s , причем требования к стабильности λ и T_{\min} остаются жесткими при всех значениях s .

Требования же к стабильности P_i , ϵ_n , G высоки в случае потоков с $s>2$, слабее при $s\approx 2$ и низкие при наблюдении потоков с $s<2$ (но, естественно, при условии, что не нарушается неравенство $m_{\min}^* < m_{\min}$).

4) О поправках.

1. При радиолокации устойчивых следов необходимо внесение поправок из-за нестабильности мощности передатчика и мощности порогового сигнала: а) при беспропуском обнаружении метеоров и б) при регистрации отражений, превысивших пороговый уровень, при наблюдении потоков (и спорадических метеоров) с $s\geq 2$.

2. Внесение поправок, вызванных нестабильностью P_i и ϵ_n , несущественно в случае регистрации отражений с длительностью $T \gg T_{\min}$, а также при регистрации всех отражений, превысивших пороговый уровень, если $s<2$.

Напомним, что все сформулированные выводы справедливы лишь относительно низкочувствительных систем, регистрирующих следы устойчивого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. R. Kaiser. Radio-echo studies of meteor ionization, J. Adv. Phys., 2, № 8, 495, 1953.

2. Е. И. Фиалко. О влиянии длины волны на эффективность радиолокационного метода исследования метеоров, Изв. Сибирского физико-технического института, вып. 37, стр. 229, 1959.

3. Е. И. Фиалко. Уверенное и случайное обнаружение неустойчивых метеорных следов, Радиотехника, т. 16, № 6, стр. 25, 1961.

4. H. V. Cottony, J. R. Jonler, Cosmic radio noise intensities in the VHF band, Proc. I. R. E., 40, № 9, 1053, 1952.