

## К ВОПРОСУ О РОЛИ СКОРОСТИ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ МЕТЕОРОВ

Е. И. ФИАЛКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Визуальные наблюдения метеоров дают результаты, чрезвычайно искаженные селекцией [1].

Отличие видимой картины от истинной определяется, прежде всего, физическим фактором: в зависимости от условий встречи метеорных тел с Землей (которые определяют их геоцентрическую скорость), „метеорные тела порождают более яркие или более слабые метеоры, создают большую или меньшую ионизацию атмосферы“ [1].

Важная роль физического фактора в сложном комплексе явлений, связанных с образованием метеора, убедительно показана Б. Ю. Левиним [1].

Рассмотрение роли физического фактора при радиолокационных наблюдениях метеоров представляет, несомненно, значительный интерес.

Известно, что визуальный метод обладает повышенной чувствительностью к быстрым метеорам.

Поэтому возникает естественный вопрос—присуща ли и радиолокационному методу селективность по скорости метеорных тел; если селективность имеет место, то каков ее характер—такой же, как в случае визуального метода, или отличный от него.

Для ответа на эти вопросы следовало бы рассмотреть зависимость численности обнаруженных метеоров от скорости метеорных тел.

Однако для приближенного решения вопроса можно ограничиться более простым рассмотрением, основанным на выяснении зависимости мощности эхо-сигнала от скорости метеорного тела. Такой подход позволяет заменить рассмотрение всей совокупности обнаруженных метеоров рассмотрением лишь одного метеора. При этом сравниваются метеорные тела, отличающиеся друг от друга лишь величиной геоцентрической скорости.

Так как количество метеорных тел быстро нарастает по мере уменьшения их массы, представляется целесообразным рассмотреть относительно наиболее слабых метеоров, потому что именно они составляют большинство обнаруженных метеоров. Как известно, слабые метеоры обнаруживаются локатором преимущественно в области наиболее интенсивной ионизации. Поэтому представляет интерес выяснение за-

зависимости мощности эхо-сигнала от скорости метеорного тела для области характеристической высоты.

Зависимость мощности эхо-сигнала, принятого радиолокатором, от скорости метеорного тела анализировалась в ряде работ [2—4].

Однако получить полную картину изменения мощности принятого радиосигнала  $\epsilon$  в функции скорости метеорных тел  $v$  при прочих равных условиях не удалось. В частности, было показано, что при линейной зависимости вероятности ионизации от скорости метеорных тел функция  $(\epsilon v)$  имеет экстремальный характер [3]. Однако осталось неясным, в какой области скоростей находится экстремум.

Особый интерес, как уже указывалось выше, представляет исследование сигналов, приходящих из области наиболее интенсивной ионизации (то есть из области характеристической высоты). Характер зависимости  $\epsilon(v)$  в этом случае не очевиден. В самом деле, с повышением скорости (точнее, с переходом к метеорному телу с большей скоростью, но с той же массой) увеличивается характеристическая высота. Это приводит к увеличению начального радиуса ионизированного следа, в результате чего мощность отраженных сигналов должна уменьшиться.

Вместе с тем, повышение скорости связано с уменьшением времени пролета метеором первой зоны Френеля; если бы при этом коэффициент диффузии и длина первой зоны Френеля оставались неизменными, то эффект диффузии ослабился бы, а мощность сигнала повысилась. Однако, вследствие увеличения характеристической высоты, наклонная дальность возрастает (при неизменном зенитном расстоянии радианта), что приводит к увеличению первой зоны Френеля; коэффициент диффузии также увеличивается; вследствие этого эффект диффузии должен проявляться сильнее, что влечет за собой уменьшение эхо-сигнала.

С другой стороны, при повышении скорости возрастает вероятность ионизации, а следовательно, и линейная плотность электронов, что вызывает увеличение мощности принимаемого сигнала.

Таким образом, при увеличении скорости часть факторов способствует повышению, а часть — понижению мощности эхо-сигнала. Без соответствующего анализа трудно предсказать, какие факторы окажутся преобладающими. Не исключено, что в одном диапазоне скоростей будут превалировать одни факторы, в другом — другие; возможно также, что на некоторых скоростях при определенных условиях одни факторы окажутся скомпенсированными другими.

В излагаемой работе рассматривается зависимость  $\epsilon(v)$  для случая приема эхо-сигналов, приходящих из области характеристической высоты в условиях нормального отражения радиоволн от ионизированных следов [5].

Даже при такой постановке вопроса анализ связан со значительными трудностями, так как до сих пор еще нет точных сведений о зависимости вероятности ионизации от скорости метеорного тела.

Мощность сигнала, принятого из области характеристической высоты, при отсутствии резонансных эффектов будет равна [3, 5]

$$\epsilon(t) = A \frac{P_i G^2 \lambda^3}{R^3} \left( \frac{\beta m \cos \chi}{\mu H} \right)^2 \xi^2 e^{-2(kr_0)} e^{-\frac{32 \pi^2 D t}{\lambda^2}}, \quad (1)$$

где

$$A = \frac{0,7}{81 \pi^2} \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 \approx 7 \cdot 10^{-29};$$

$e$ ,  $m_e$  — заряд и масса электрона;  $c$  — скорость света;  $P_i$  — мощность в излучаемом импульсе;  $G$  — коэффициент направленного действия антенны;  $\lambda$  — длина волны;  $R$  — наклонная дальность от локатора до следа (по нормали);  $\beta$  — вероятность ионизации;  $m$  — масса метеорного тела;  $\chi$  — зенитное расстояние радианта метеора;  $\mu$  — масса метеорного атома;  $H$  и  $D$  — высота однородной атмосферы и коэффициент диффузии, соответствующие характеристической высоте;  $\xi$  — коэффициент, характеризующий уменьшение интенсивности отражения радиоволн от ионизированного следа, обусловленное эффектом диффузии и конечным временем пролета метеором первой зоны Френеля, равный

$$\xi = \frac{1 - e^{-1,5\Delta^{0,5}}}{1,5\Delta^{0,5}}; \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{16\pi^2 DR^{\frac{1}{2}}}{v\lambda^{\frac{3}{2}}}; \quad (3)$$

$v$  — скорость метеорного тела;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число;  $r_0$  — начальный радиус ионизированного метеорного следа;  $t$  — время, прошедшее с момента пролета метеорным телом середины первой зоны Френеля, то есть точки, лежащей на пересечении траектории метеорного тела с нормалью, опущенной из места расположения локатора на траекторию.

Формула (1) справедлива при отражении радиоволн от неустойчивых метеорных следов, то есть при линейной плотности  $a \ll 10^{12}$  электронов/см.

Переходя от мощности к напряжению, получим

$$u(t) = B \frac{\xi}{R^{\frac{3}{2}} H} e^{-(kr_0)^2} e^{-\frac{16\pi^2 D t}{\lambda^2}}, \quad (4)$$

где  $B$  — коэффициент, не зависящий от скорости метеорного тела.

Формула (4) дает представление об изменении огибающей амплитуд принимаемых импульсов.

Наибольшая амплитуда, как следует из (4), равна

$$u_m = B \frac{\xi}{R^{\frac{3}{2}} H} e^{-(kr_0)^2}. \quad (5)$$

Для выяснения зависимости  $u_m(v)$  необходимо представить каждый из сомножителей в функции  $v$ .

Наклонная дальность может быть представлена в виде

$$R = \frac{h_m}{\sin \phi}, \quad (6)$$

где  $\phi$  — угол места отражающего участка метеорного следа (в частном случае  $\phi = \chi$ ).

В формуле (6) не учитывается кривизна земной поверхности.

Зависимость  $h_m(v)$  найдена Кайзером и Эвансом [5, 6]; ими также получена зависимость  $H(v)$ .

Изменение коэффициента диффузии в области метеорной зоны  $D(h)$  найдено Гринхау и Ньюфельдом [7]; зная  $D(h)$  и  $h_m(v)$ , легко построить  $D(v)$ .

Связь между начальным радиусом ионизированного следа и средней длиной свободного пробега ионов  $l_i$  исследована Маннингом [8], показавшим, что  $r_0 \approx 14 l_i$ , причем  $l_i \approx \frac{1}{5} l_a$  (где  $l_a$ —средняя длина свободного пробега нейтральных атомов).

Воспользовавшись графиком  $D(v)$  и  $h_m(v)$ , находим  $\Delta(v, \psi, \lambda)$  или  $\Delta(v, \chi, \lambda)$ , а затем  $\xi(v, \chi, \lambda)$ .

Далее по  $r_0(v)$  строим  $e^{-\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 r_0^2}$  в функции  $v$ . Вероятность ионизации представим в виде  $\beta \sim v^n$ , где  $n$ —константа [5].

После предварительных построений находим  $u_m(v)$  при  $\lambda=4, 6, 8, 10$  м для трех значений  $\psi$  (или  $\chi$ ): 20, 45, 70°.

Не приводя здесь промежуточных графиков, представим отношение  $\frac{u_m(v)}{u_{m \max}(v)}$ , где  $u_{m \max}$ —наибольшее значение амплитуды в данном диапазоне волн (в нашем случае для  $\lambda=10$  м).

В связи с тем, что величина показателя  $n$ , характеризующего  $\beta(v)$ , еще не уточнена, принимаем за основу данные теоретических работ [9, 10] ( $n \approx 1$ ) и рассматриваем  $n$  в пределах  $0 \lesssim n \lesssim 2$ .

Результаты вычислений представлены на рис. 1 и 2 для  $\chi=45^\circ$ ,  $\lambda=4; 6; 8; 10$  м и  $n=0; 1; 2$ .

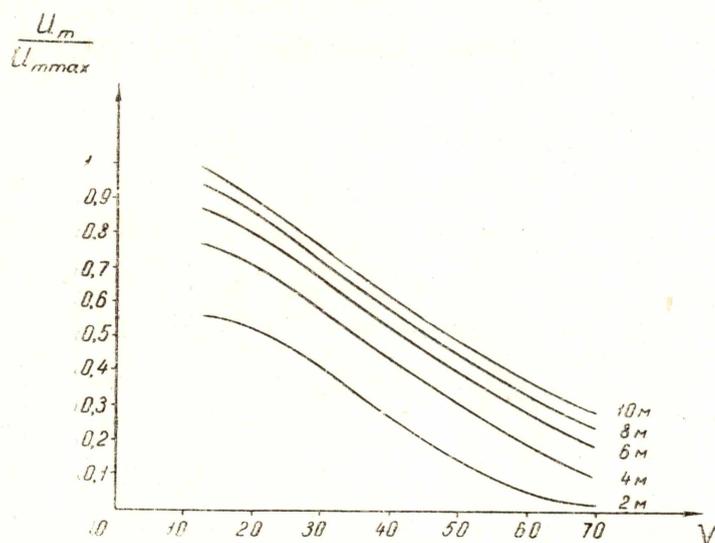


Рис. 1. Зависимость интенсивности метеорного радиоэхо

от скорости метеорного тела  $\frac{u_m}{u_{m \max}}(v)$ .

$u_m$ —наибольшая амплитуда радиоэхо для данных  $\lambda, v$ ;  
 $u_{m \max}$ —то же для  $\lambda=10$  м;  $v$ —скорость метеорного тела  
 в км/сек;  $n=0$ ;  $\chi=45^\circ$ .

Как видно из рис. 1 и 2, изменение амплитуды эхо-сигнала в функции скорости имеет экстремальный характер при  $n \approx 1 \div 2$ , то есть

существует оптимальная скорость  $v_{\text{опт}}$ , которой при данных  $n$  и  $\lambda$  соответствует наивысшая чувствительность локатора (к слабым метеорам). Оптимальные скорости увеличиваются с увеличением  $n$  и  $\lambda$ , но остаются в области регистрируемых геоцентрических скоростей метеорных тел.

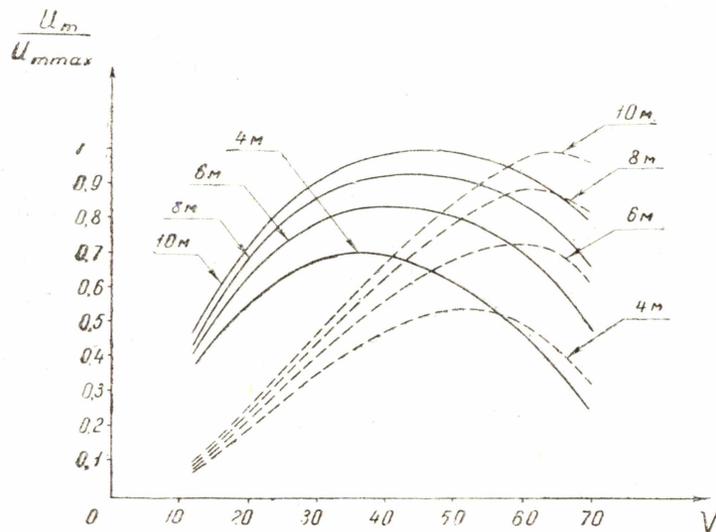


Рис. 2.  $\frac{u_m}{u_{m\max}}$  ( $v$ ).  $n=1$  — сплошные кривые;  $n=2$  — пунктир; (остальные данные те же, что и на рис. 1).

Изменение угла  $\phi$  следа (или  $\chi$  радианта) в пределах  $20-70^\circ$  сказывается на характере зависимости  $u_m(v)$  незначительно, что иллюстрируется рис. 2 и 3, на которых представлена функция  $\frac{u_m}{u_{m\max}}(v, \lambda)$  для  $\chi=20, 45, 75^\circ$  при  $n=1$ .

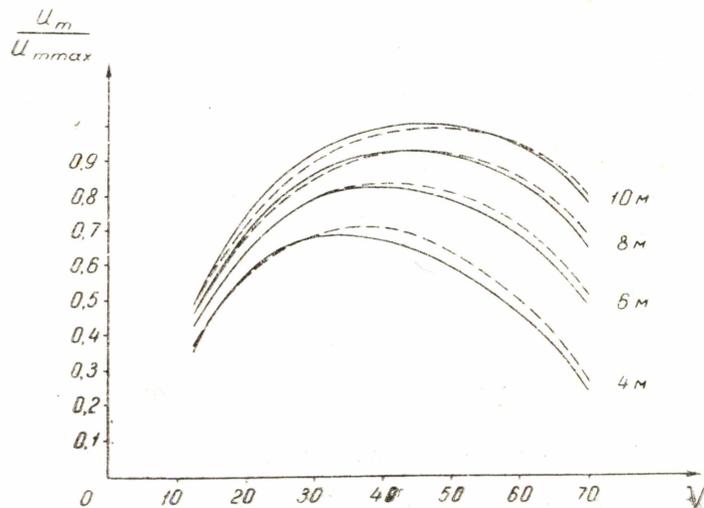


Рис. 3.  $\frac{u_m}{u_{m\max}}$ .  $n=1$ ;  $\chi=20^\circ$  — сплошные кривые;  $n=1$ ;  $\chi=70^\circ$  — пунктир; (остальные данные те же, что и на рис. 1).

Величина оптимальной скорости при данном  $n$  незначительно изменяется в пределах  $\chi=20-70^\circ$  (рис. 4).

Характер изменения  $v_{\text{опт}}(\lambda)$  зависит от значения показателя  $n$  (рис. 4).

Из проведенного рассмотрения следует, что радиолокационный метод обладает пониженной чувствительностью к медленным и весьма быстрым метеорам и повышенной чувствительностью к метеорам со средними и высокими скоростями. Так, при  $n \approx 1$  в диапазоне волн, наиболее часто используемых для метеорных наблюдений ( $\lambda = 4 \div 10$  м),  $v_{\text{опт}} \approx 35 \div 45$  км/сек; при  $n \approx 1,5$   $v_{\text{опт}} \approx 45 \div 55$  км/сек (рис. 2, 3, 4).

Однако при  $n \approx 1$  селективность радиолокационного метода выражена слабо, что не расходится с полученным ранее результатом [4].

По мере увеличения  $n$  чувствительность по отношению к быстрым метеорам, как и следует ожидать, возрастает. Отметим, что даже при  $n=2$  на  $\lambda=4$  м заметно выражена селективность относительно медленных и быстрых метеоров.

К сожалению, в настоящее время еще нельзя с уверенностью утверждать, что истинной является картина, соответствующая  $n \approx 1$ ; однако нет также веских оснований для утверждения о повышенной чувствительности локатора к весьма быстрым метеорам (как, например, при  $n > 2$ ). Заметим, что некоторые исследователи считают, что радиолокатор обладает пониженной чувствительностью к быстрым метеорам [11, 12].

По всей вероятности вне зоны  $v=30-60$  км/сек чувствительность радиолокационного метода заметно понижается (что соответствует показателю  $n \approx 1 \div 1,5$ ).

Из сказанного видно, насколько важно получить объективные данные о характере зависимости  $\beta(v)$ .

Выше рассматривалась зависимость начальной интенсивности сигнала от скорости метеорного тела, то есть предполагалось, что локатор обладает весьма высокой оперативностью, позволяющей зафиксировать след сразу после его формирования.

Если же после образования следа должно пройти время  $T_{\text{min}}$ , необходимое для обнаружения метеоров, то следует рассматривать не начальную интенсивность эхо-сигнала, соответствующую  $t=0$  (см. формулу (4)), а интенсивность отражения в момент  $t=T_{\text{min}}$ . То есть, в формуле (4) необходимо учесть еще один множитель  $e^{-\frac{16 \pi^2 D T_{\text{min}}}{\lambda^2}}$ .

Рассмотрение низкооперативной системы здесь не приводится.

Кроме того,  $\varepsilon_{\text{max}}$  будет соответствовать не характеристической высоте  $h_m$ , а некоторой оптимальной высоте: в условиях интенсивной диффузии  $h_{\text{опт}} < h_m$ , а при повышенной рекомбинации  $h_{\text{опт}} > h_m$ . Учет отличия  $h_{\text{опт}}$  от  $h_m$  и введение связанных с этим поправок в  $v_{\text{опт}}(n, \lambda)$  и в  $u_m(v, \lambda, n)$  будет произведен дополнительно.

Следует также отметить, что зависимость  $\varepsilon(v)$  для областей, лежащих как выше, так и ниже  $h_m$ , будет иной, чем зависимость  $\varepsilon(v)$ ,

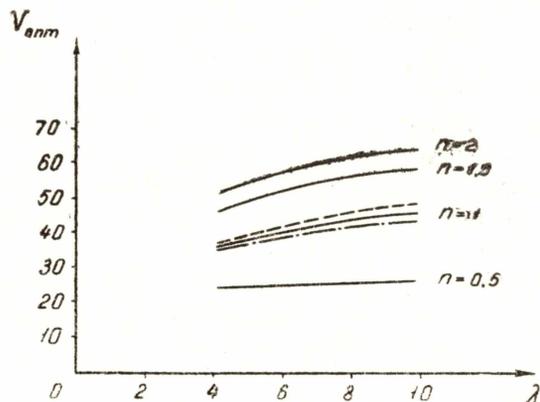


Рис. 4. Зависимость оптимальной скорости  $v_{\text{опт}}$  от длины волны  $\lambda$ .

$v_{\text{опт}}$  — в км/сек;  $\lambda$  — в м. Сплошные кривые построены для  $\chi=45^\circ$  ( $n=0,5; 1; 1,5; 2$ ). Пунктирная кривая соответствует значениям  $n=1$  и  $\chi=70^\circ$ ; штрихпунктирная —  $n=1$  и  $\chi=20^\circ$ .

полученная для приема из области характеристической высоты. Поэтому представление о селективности радиолокационного метода, изложенное выше, может нуждаться в коррективах.

### Выводы

1. При значении показателя  $n \approx 1 \div 2$  зависимость интенсивности эхо-сигнала от скорости метеорного тела имеет экстремальный характер. При этом оптимальная скорость  $v_{\text{опт}}$  лежит в диапазоне обычно регистрируемых скоростей.

2. При линейной зависимости вероятности ионизации от скорости ( $n \approx 1$ ) радиолокационный метод наиболее чувствителен к метеорам со средними скоростями. Однако селективность при этом выражена слабо.

3. При  $n \approx 1,5$  радиолокационный метод обладает повышенной чувствительностью к быстрым метеорам (со скоростями  $v \approx 50 \div 60$  км/сек). Относительно медленных метеоров чувствительность заметно снижается.

4. Для уточнения роли физического фактора необходимо, прежде всего, выяснить характер зависимости  $\beta(v)$  и рассмотреть изменение численности зафиксированных метеоров в функции скорости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе. Изд. АН СССР, 1956.
2. Перегудов Ф. И. О влиянии скоростей метеоров на часовое число в условиях радионаблюдений, А. Ж., т. 35, № 6, стр. 888, 1958.
3. Фиалко Е. И. Мощность сигнала, отраженного от метеорного следа в условиях интенсивной диффузии, Известия ТПИ, т. 100, стр. 40, 1962.
4. Фиалко Е. И. Приближенная оценка вероятности метеорной ионизации, А. Ж., 1959, 3с, вып. 3, 491.
5. Kaiser T. R. Radio-echo studies of meteor ionization, J. Adv. Phys., v. 2, № 8, p. 495, 1953.
6. Evans E. Scale heights and pressures in the upper atmosphere from radio-echo observation of meteors, M. N. R. A. S., v. 114, № 1, p. 63, 1954.
7. Greenhow J. S., Neufeld E. L. The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere, Journ. Atm. Terr. Phys., v. 6, № 2—3, p. 133, 1955.
8. Manning L. A. The initial radius of meteoric ionization trails, Journ. Geoph. Res., v. 63, № 1, p. 181, 1958.
9. Massey H. S., Sida D. W. Collision processes in meteor trails, Phil. Mag., v. 46, № 373, p. 190, 1955.
10. Лошилов Ю. А. Об определении вероятности ионизации в метеорных следах методом радио-визуальных наблюдений, Известия астрономической обсерватории, 5, вып. 1, 35, 1959.
11. Hoffmeister C. Ionization durch Meteore, Sterne, v. 33, № 3—4, s. 62, 1957.
12. Öpik E. J. Meteors and upper atmosphere, Irish Astronomical Journ., v. 3, № 6, p. 166, 1955.