

Ю. И. ВОЛОЩУК, канд. техн. наук,
 Б. Л. КАЩЕЕВ, д-р техн. наук,
 В. Н. ЛЕБЕДИНЕЦ, д-р физ.-мат. наук

ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН ОТ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ. I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАЧАЛЬНОГО РАДИУСА МЕТЕОРНОГО СЛЕДА ОТ СКОРОСТИ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ И ВЫСОТЫ ОТРАЖАЮЩЕЙ «ТОЧКИ»

Метеорные следы, как и другие цели, рассеивающие радиоволны, можно характеризовать эффективной рассеивающей поверхностью $S_{эфф}$. Особенностью $S_{эфф}$ для метеорных следов является то, что эта величина зависит от электронной плотности внутри следа, т. е. изменяется во времени. Расчеты показали, что для ненасыщенных метеорных следов $S_{эфф}$ зависит не только от плотности электронов, расстояния до следа, но также и от начального радиуса, длины волны, коэффициента амбиполярной диффузии. Отметим, что

$$S_{эфф} \sim e^{-2 \left(\frac{2\pi r_0}{\lambda} \right)^2}, \quad (1)$$

где r_0 — начальный радиус метеорного следа;

λ — рабочая длина волны радиолокационной станции.

Из (1) следует, что величина r_0/λ существенно влияет на значение эффективной поверхности.

Теория начального радиуса метеорного следа рассматривалась многими исследователями [1—5 и др.]. Обычно принимают степенную зависимость начального радиуса от скорости метеорной частицы и плотности атмосферы ρ :

$$r_0 = c\rho^{-a} v^b. \quad (2)$$

Здесь c , a , b — некоторые постоянные.

Подавляющее большинство метеоров появляются в довольно узком высотном диапазоне (90—110 км [3]). В этом случае атмосферу Земли можно считать изотермической и принять, что изменение плотности атмосферы с высотой происходит по закону [5]:

$$\rho = \rho' e^{-t}, \quad (3)$$

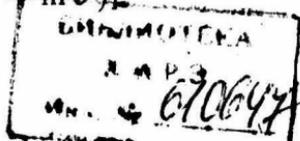
$$\text{где } t = \frac{h - h'}{H};$$

ρ' — плотность атмосферы на высоте h' ;

H — высота однородной атмосферы.

С учетом (3) формулу (2) можно записать в виде

$$r_0 = r_{0_1} \exp [at + b(\ln v + \ln v')]. \quad (4)$$



Здесь r_{01} — величина начального радиуса на высоте h' при скорости v' .

Большинство теоретических исследований о начальном радиусе дают значение $a=1$. В отношении величин r_{01} и b нет единого мнения. В табл. 1 приведены значения r_{01} и b , полученные теоретически разными исследователями.

Таблица 1

Источник	v , км/с	h , км	r_0 , см	b
Маннинг [1]	40	95	20—30	0
Эпик [2]	40	95	100	2/3
Ф. И. Перегудов [6]	400	95	40—50	0
Ю. А. Лоцилов [4]	36	94	40	0
Б. Л. Кашеев и др. [3, 5]	40	95	100	1

Экспериментальное исследование r_0 проводилось неоднократно, но, к сожалению, результаты экспериментов не вносят ясности в вопрос о зависимости r_0 от v . Более того, по результатам экспериментов коэффициент a у разных исследователей также получается разным. В табл. 2 приведены результаты экспериментов по определению r_0 .

Таблица 2

Источник	v , км/с	h , км; D , м ² /с	r_{0cp} , см	a	b
Гринхау, Холл [7]			120	0,35	0
Б. Л. Кашеев и др. [3, 5]	32	(6,4)	80	1	1
И. В. Байраченко [8]	41	(8,2)	100	—	0,79
Р. И. Мойся [9]	36	(8,1)	100	1	1
Баггли [10]	54	95	72	$0,45 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,16$

Общим недостатком работ по измерению r_0 является то, что высота отражающих «точек» непосредственно не измерялась, а находилась по величине коэффициента амбиполярной диффузии D . Кроме того, экспериментальное определение r_0 проводилось всеми исследователями одним и тем же методом: путем сравнения амплитуд метеорных радиосигналов при одновременном наблюдении на двух или трех частотах.

Создание в Харьковском институте радиоэлектроники точного фазового высотомера, позволяющего определить высоту отражающих «точек» с погрешностью ± 1 км [17], и получение статически хорошо обеспеченных данных по высотным распределениям метеоров, позволило подойти к проблеме оценки r_0 с другой стороны. Сравнивая теоретические и экспериментальные распределения высот, путем математического моделирования можно определить наиболее вероятное значение коэффициентов, харак-

теризующих зависимость $r_0 = f(h, v)$ в предположении, что основной вклад в ослабление отраженного сигнала вносит влияние начального радиуса.

Простой метод расчета функции плотности вероятности высот отражающих «точек» $P(h)$ предложен в [11]. По ионизационным кривым $\alpha(h, M, v, z)$ находятся кривые

$\alpha_{эфф}(h, M, v, z, \lambda)$, где

$$\alpha_{эфф}(h, M, v, z, \lambda) = \alpha(h, M, v, z) \varphi^2(\Delta) f^2(r_0). \quad (5)$$

Здесь α — линейная электронная концентрация в следе;

$\alpha_{эфф}$ — эффективная электронная концентрация;

M — масса частиц;

z — зенитное расстояние радианта.

Распределение высот метеоров с данными v и z , регистрируемых аппаратурой с минимальной регистрируемой линейной электронной концентрацией $\alpha_{эфф}^{мин}$, при учете случайного положения зеркальной точки на следе следующее:

$$P(h, v, z, \lambda, \alpha_{эфф}^{мин}) = \int_{M_1}^{M_2} P(M) dM; \quad (6)$$

$P(M)$ — распределение массы метеорных частиц;

M_1, M_2 — корни уравнения

$$\alpha_{эфф}(h, M, v, z, \lambda) = \alpha_{эфф}^{мин}. \quad (7)$$

Теоретические распределения, получаемые по этим формулам, значительно уже экспериментальных, поэтому ими нельзя воспользоваться для моделирования начального радиуса.

Для этой цели приемлем метод расчета $P(h)$, основанный на использовании совместных распределений случайных параметров метеорных следов. Опуская промежуточные результаты, запишем окончательную формулу, по которой и производился расчет $P(h)$:

$$P(h) = \frac{\int_{z_1}^{z_2} \int_{A_1}^{A_2} \int_{\xi=1}^{\infty} \xi^{-s} I f(z) f(A) \operatorname{cosec} z [h_1(\xi) - h_2(\xi)] d\xi dA dz}{\int_{z_1}^{z_2} \int_{A_1}^{A_2} \int_{\xi=1}^{\infty} \xi^{-s} I f(z) f(A) \operatorname{cosec} z [h_1(\xi) - h_2(\xi)]^2 d\xi dA dz}. \quad (8)$$

Здесь $\xi = \frac{\alpha_{эффm}}{\alpha_{эфф}^{мин}}$, где $\alpha_{эффm}$ — максимальная электронная концентрация;

h_1, h_2 — высота начала и конца наблюдения следа;

$$\xi(h_1) = \xi(h_2) = 1;$$

$l(\xi, z, A)$ — длина отрезка эхо-линии, ограниченного соответствующим контуром равной чувствительности антенны;

$f(A), f(z)$ — наблюдаемые распределения радиантов метеоров по азимуту и зенитному углу;

$(z_1, z_2), (A_1, A_2)$ — границы интегрирования;

s — показатель степени в законе распределения частиц по массе.

В качестве эталонных распределений высот для сравнения с теоретическими были использованы результаты измерений, проведенных 1—8 февраля 1970 г. на фазовом высотомере. Отбор ненасыщенных следов проводился по виду амплитудно-временных картин. Одновременно определялся коэффициент амбиполярной диффузии.

В качестве исходных при моделировании были взяты ионизационные кривые из работы [12]. При переходе от ρ к h использовались

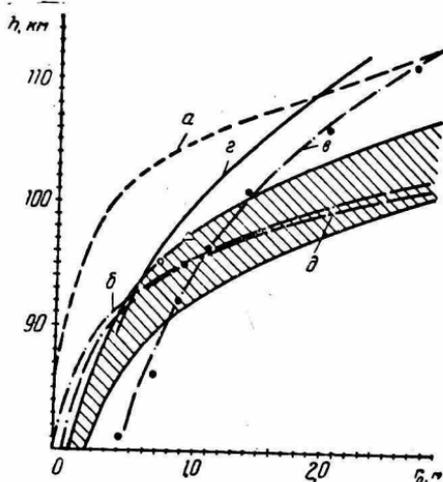


Рис. 2. Некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований начального радиуса:

a — теоретическая кривая Маннинга [1]; b — теоретическая кривая Эпика [2]; v — экспериментальные точки Гринхау и Холла [7]; z — результаты Баггли [10]; d — теоретическая кривая Кашеева Б. Л., Лебединцева В. Н. [5]; \circ — экспериментальная точка Кашеева Б. Л., Лебединцева В. Н. [15];

\triangle — экспериментальная точка Байраченко И. В. [8] (заштрихована область значений r_0 для скорости от 30 до 70 км/с, полученная из описанной модели).

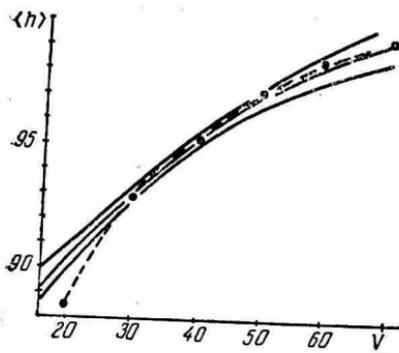


Рис. 1. Экспериментальная и теоретическая зависимость $\langle h \rangle$ от скорости метеорной частицы.

таблицы [13]; s принято равным 2.

Запишем формулу (2) иначе:

$$r_0 = \frac{\rho_0^a}{v^b} \rho^{-a} v^b. \quad (9)$$

В соответствии с результатами [5] ρ_0 — плотность атмосферы на высоте 95 км и $v_0 = 40$ км/с, следовательно, для частиц со скоростью 40 км/с начальный радиус зависит только от высоты отражающей «точки».

Для этого случая получено значение $a = 0,66 \pm 0,12$ (с вероятностью 0,95).

Используя это значение коэффициента a , для других значений скорости были посчитаны $\langle h \rangle$ в функции величины коэффициента b . Методом наименьших квадратов получено значение $b = 0,80 \pm 0,16$ (с вероятностью 0,95).

На рис. 1 показана экспериментальная (сплошная линия) зависимость $\langle h \rangle$ от v . Здесь же нанесен 95-процентный коридор

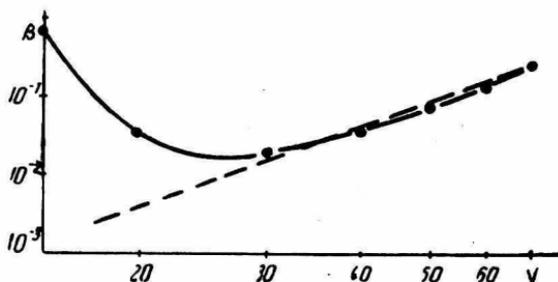


Рис. 3. Зависимость коэффициента ионизации от скорости метеорной частицы (сплошная линия — результат моделирования, пунктирная — [5]).

ошибок. Пунктиром проведена теоретическая зависимость $\langle h \rangle$ (v), построенная для модели начального радиуса:

$$r_0 = 6,77 \cdot 10^{-8} \rho^{-0,66} v_0^{0,80} . \quad (10)$$

Проверка по локальному статическому критерию [14] показывает, что кривые согласуются, начиная с $v = 30$ км/с, при уровне значимости 0,05.

На рис. 2 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований r_0 . Здесь же нанесена область изменения r_0 по модели (10) для скорости частиц в диапазоне 30—70 км/с. Из рисунка видно, что экспериментальные точки [8, 15] попадают в диапазон изменений r_0 , полученный на модели. Проверка по локальному статическому критерию показывает, что теоретические кривые [2, 5] согласуются с результатами моделирования при уровне значимости 0,05. Однако можно заметить, что полученная модель дает меньшее значение r_0 для высот ниже 90 км.

В заключение заметим, что моделирование зависимости r_0 от v показывает на увеличение b с уменьшением скорости. Интересно, что эту тенденцию можно проследить и по результатам измерений, приведенных в табл. 2. Если предположить, что это совпадение носит случайный характер и получившееся увеличе-

ние b с уменьшением v вызвано неточным знанием зависимости коэффициента ионизации от скорости при малых v , то, используя модель (10), методом математического моделирования можно найти такую зависимость β от v , при которой не было бы расхождения теоретических и экспериментальных значений $\langle h \rangle$ во всем диапазоне изменения v . Эта зависимость представлена на рис. 3. Пунктиром проведена зависимость $\beta = \beta(v)$ [5]. Наблюдается значительное возрастание β на низких скоростях. Возможно, это следствие того, что при малых v помимо ударной проявляются некоторые другие механизмы ионизации [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Manning L. A. The initial radius of meteoric ionization trails. — *J. Geophys. Res.*, 1958, 63, p. 181—200.
2. Opik E. J. Problems in the physics of meteors. — *Amer. J. Phys.*, 1958, 26, p. 70—138.
3. Кащеев Б. Л., Лебединец В. Н. — Радиолокационные исследования метеорных явлений. М., Изд. АН СССР, 1961, 124 с.
4. Лошилов Ю. А. О начальном радиусе метеорного следа. — *Тр. Астрон. обсерв. Казан. ун-та*, 1961, 33, с. 70—82.
5. Кащеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф. — Метеорные явления в атмосфере Земли. М., «Наука», 260 с.
6. Перегудов Ф. И. Эффективная рассеивающая поверхность ослабленного метеорного следа. — *Астрон. журн.*, 1957, 34, 4, с. 621—630.
7. Grinhow J. S., Hall J. E. The importance of initial trails radius on the apparent height and number distributions of meteor echoes. — *Mon. Not. Astr. Roy. Soc.*, 1960, 120, p. 183—201.
8. Байраченко И. В. Измерения начальных радиусов ионизированных метеорных следов из параллельных наблюдений радиометеоров на двух длинах волн. — *«Геомагнетизм и аэронамия»*, 1965, 5, 3, с. 460—468.
9. Мойся Р. И. Радиолокационные исследования метеоров на нескольких частотах. Определение начального радиуса ионизированного метеорного следа. Автореф. канд. дис., Киев, 1967. 20 с.
10. Baggaley W. J. The determination at the initial radii of meteor trails. — *Mon. Roy., Astr. Soc.*, 1970, 147, p. 231—243.
11. Отражение радиоволн от метеорных следов. III. Замечаемость радиометеоров. — *«Геомагнетизм и аэронамия»*, 1971, 11, с. 6—18. Авт.: В. Н. Лебединец, В. Н. Корпусов, А. К. Соснова и др.
12. Лебединец В. Н., Шушкова В. Б. Испарение и торможение мелких метеорных тел. — *«Астрономический вестник»*, 1968, 2, 1, с. 37—43.
13. COSPAR. International reference atmosphere (CIRA), 1965, 50 p.
14. Клепиков Н. П., Соколов С. Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимального правдоподобия. М., «Наука», 1964, 289 с.
15. Kashcheyev B. L., Lebedinets V. N. The initial radius of ionised meteor trails. — *«Smithson. Contr. Astrophys.»*, 1963, 7, p. 19—24.
16. Тохтасьев В. С. О дополнительных механизмах ионизации в метеорных следах. — Сб. «Метеорное распределение радиоволн». Вып. 7. Казань, 1970, с. 51—65.
17. Жуков В. В. Исследование высотных зависимостей метеорных явлений. Автореф. канд. дис., Харьков, 1972. 21 с.