

*ВОЛОЩУК Ю. И.*, канд. техн. наук,  
*КАЩЕЕВ Б. Л.*, д-р техн. наук

**ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН ОТ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ.  
II. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АМПЛИТУД  
РАДИОМЕТЕОРОВ**

Масса метеорной частицы — один из основных параметров при решении любых задач метеорной астрономии — определяется косвенным путем, какие бы из наземных методов измерений

ни использовались. Для ее определения необходимо ввести ряд предположений о физических процессах образования следа. В случае радиолокации метеоров нужно, кроме того, принять некоторую модель процессов рассеяния радиоволн ионизированным метеорным следом. Именно поэтому расчет масс индивидуальных метеорных частиц при радиолокационных исследованиях еще менее доверителен, чем при использовании других методов. Однако радиолокация позволяет определять параметры закона распределения масс метеорных тел лучше любых других методов. Это объясняется, во-первых, большей статистической обеспеченностью радиоизмерений и, во-вторых, возможностью регистрации сигналов в широком диапазоне амплитуд.

В настоящее время не существует единой методики интерпретации результатов измерений распределений амплитуд отраженных сигналов для получения закона распределения масс метеорных частиц. Интерпретации результатов измерений численности радиометеоров на разных уровнях, полученных на высокочувствительной аппаратуре, посвящена настоящая работа.

Всякую интерпретацию можно рассматривать как процесс обработки данных эксперимента с целью получения информации об интересующем объекте. При измерениях численности метеоров задача в основном заключается в чисто количественной интерпретации, поскольку качественная модель явления считается известной. В этом случае модель экспериментального материала можно представить в виде

$$\bar{U} = \bar{f}(\bar{\theta}) + \bar{n}. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{f}$  — детерминированные компоненты модели, которые считаются известными с точностью до неизвестных параметров  $\theta_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ), и задача сводится к определению оптимальной процедуры оценки параметров  $\theta_j$  по заданному экспериментальному материалу  $U$ ;  $\bar{n}$  — вектор, характеризующий расхождение действительного и идеализированного полей в точках наблюдения. При отсутствии априорных данных о типе распределения случайной величины  $\bar{n}$  обычно принимают, что  $\bar{n}$  распределены нормально, являются стационарными, независимыми с нулевым средним [1].

Всякую интерпретацию можно представить состоящей из двух этапов — построения функции «отклика»  $\lambda(\bar{\theta})$  в пространстве искомого состояния объекта и определения тех значений  $\bar{\theta}$ , при которых  $\lambda(\bar{\theta})$  имеет минимум. В практике радиолокации метеоров широко используется критерий наименьших квадратов. При этом функция «отклика» имеет вид

$$\lambda(\bar{\theta}) = \sum_i [U_i - f_i(\bar{\theta})]^2. \quad (2)$$

Результатами измерений численности являются распределения амплитуд сигналов, отраженных от метеорных следов, которые характеризуются параметром  $K_1$  [2]. Интерпретация заключается в переходе от распределения амплитуд к распределению масс метеорных частиц, которое полностью определяется параметром  $s$ . В таком случае (1) можно записать

$$K_1 = \bar{f}(s, \bar{x}) + \bar{n}. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{x}$  — совокупность параметров детерминированной компоненты, которые влияют на амплитуду отраженного сигнала. Сюда входят: начальный радиус метеорного следа  $r_0$ , коэффициент ионизации  $\beta$  и его зависимость от скорости частицы, дальность до следа, характеристики атмосферы на высоте образования следа, различные параметры аппаратуры и т. д.

Выражение (3) представляет собой основную модель интерпретации измерений численности. Чтобы можно было воспользоваться этой моделью, необходимо на основании априорных сведений из физической теории метеоров построить такую детерминированную компоненту модели, которая зависела бы только от параметра  $s$ . То значение  $s$ , которое минимизирует функцию «отклика» (2), и будет определять распределение масс метеорных частиц. Оценка случайной компоненты  $\bar{n}$  позволит найти погрешность интерпретации.

Как справедливо отмечено в [3], из-за самого характера метеорных явлений как явлений случайных их моделирование не имеет смысла делать аналитически точным, и сам метод моделирования метеорных явлений должен как можно более соответствовать природному явлению, т. е. в самой сущности своей и он должен быть статистическим. Таким методом может служить метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [4].

Для использования метода статистических испытаний при моделировании зависимости (3) на ЭВМ необходимо иметь подпрограмму получения псевдослучайных чисел, а также иметь возможность генерировать случайные числа с заданным законом распределения.

Закон распределения метеорных тел по массам обычно представляют в виде

$$W(M) = (s - 1) M_0^{1-s} M^{-s}, \quad (4)$$

где  $M_0$  — произвольно выбранная минимальная масса.

Для получения случайных чисел, подчиняющихся этому закону распределения в диапазоне масс  $M_0 - M_m$ , обозначим  $\beta = M/M_0$  и  $1 \leq \beta \leq \beta_m$ . Тогда плотность распределения случайной величины  $\beta$  [3]

$$W(\beta) = \frac{s - 1}{1 - \beta_m^{1-s}} \beta^{-s}. \quad (5)$$

Можно показать, что псевдослучайные числа  $\xi$  связаны со случайными числами  $\beta$ , подчиняющимися закону (5), выражением

$$\ln \beta = - \frac{\ln [1 - \xi (1 - \beta_m^{1-s})]}{s - 1}. \quad (6)$$

Это выражение позволяет, используя подпрограмму псевдослучайных чисел, генерировать случайные значения масс  $M = M_0 \beta$  в пределах  $M_0 \leq M \leq M_m$ , имеющих закон распределения вида (4).

В общих чертах порядок моделирования можно представить следующим образом.

1. Заданы скорость метеорной частицы  $v$  и параметр  $s$ .

2. Используя формулы (5) и (6), найти случайное значение массы метеорной частицы.

3. По заданным  $v$  и  $M$  выбрать соответствующую ионизационную кривую (набор ионизационных кривых  $\alpha(h, M, v, z)$  из [5] заложен в виде таблиц в память машины).

4. По формуле

$$\alpha_{эфф} = \alpha(h, M, v, z) f(r_0) \varphi(\Delta) \quad (7)$$

с использованием модели начального радиуса, полученной в [6], и зависимости коэффициента амбиполярной диффузии  $D$  от высоты [7]

$$\ln D = 0,11h - 7,84 \quad (8)$$

определить эффективную линейную электронную концентрацию вдоль следа.

5. Зная реальную эффективную чувствительность используемой аппаратуры, найти высоту начала и конца наблюдения метеорного следа.

6. Найти значение эффективной электронной концентрации в зеркальной точке в предположении, что положение ее на следе случайно.

7. По формуле

$$A = \frac{\alpha_{эфф}}{\sqrt{32} \pi \frac{m_e c^2}{e^2} \left( \frac{R^3}{R_{вх} P_t G_t G_r \lambda^3} \right)^{1/2}} \quad (9)$$

посчитать амплитуду принятого сигнала.

В формуле (9) введены обозначения:

$A$  — амплитуда принятого сигнала;

$P_t$  — мощность передатчика в импульсе;

$\lambda$  — длина волны;

$R$  — наклонная дальность;

$R_{вх}$  — входное сопротивление приемника;

$m_e, e$  — масса и заряд электрона;

$c$  — скорость света;

$G_t, G_r$  — коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн соответственно.

Многократно используя эту процедуру расчета, можно исходное распределение масс метеорных частиц трансформировать в распределение амплитуд отраженных сигналов.

В качестве примера результатов моделирования на рис. 1 приведено полученное распределение амплитуд метеорных сигналов для  $v=70$  км/с,  $v=40$  км/с и  $s=2$ . Здесь  $\eta$  — относительная амплитуда сигнала. Кривая *a* соответствует зависимости

$$s = K_1 + 1. \quad (10)$$

Кривая *б* получена при условии влияния начального радиуса. Зависимость *в* учитывает влияние  $r_0$  и случайного положения

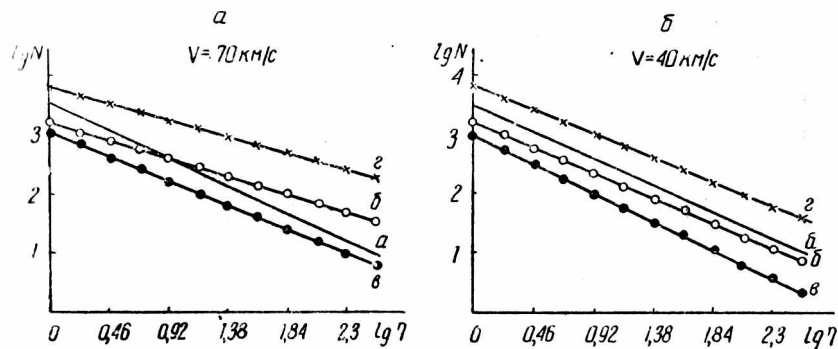


Рис. 1. Распределение амплитуд отраженных сигналов, полученные моделированием для  $v=70$  км/с,  $v=40$  км/с и  $s=2$ :

*a* —  $s=K_1+1$ ; *б* — учтено влияние начального радиуса; *в* — распределение амплитуд при условии влияния  $r_0$  и случайного положения зеркальной «точки»; *г* — учтены влияние  $r_0$ , случайного положения зеркальной «точки» и укорочение наблюдаемой части метеорного следа.

зеркальной «точки» на следе. Наконец, кривая *г* учитывает еще и укорочение наблюдаемого метеорного следа при переходе к малым массам.

Из рисунка видно, что влияние  $r_0$  и диффузии на амплитуду отраженного сигнала приводит к тому, что величина  $K_1$  (тангенс угла наклона кривой) уменьшается по сравнению с (10). Учет случайного положения отражающей «точки», как и следовало ожидать, приводит к увеличению  $K_1$ , и, наконец, укорочение следа приводит к уменьшению  $K_1$ . Интересно, что эффекты укорочения и случайного положения отражающей «точки» практически уравновешивают друг друга.

Сравнивая эти зависимости для двух значений скорости, можно прийти к заключению, что с увеличением  $v$  распределения амплитуд сигналов искажаются заметнее по сравнению с (10).

По таким распределениям по методу наименьших квадратов с весами были посчитаны значения  $K_1$ . На рис. 2 приведен гра-

фик функции  $s=f(K_1/v)$ . Поскольку средние значения скорости метеорных частиц имеют явно выраженный суточный ход,  $s$  даже при равных  $K_1$  будет иметь различную величину в разное время суток. На рис. 3 приведена зависимость  $s$  в функции

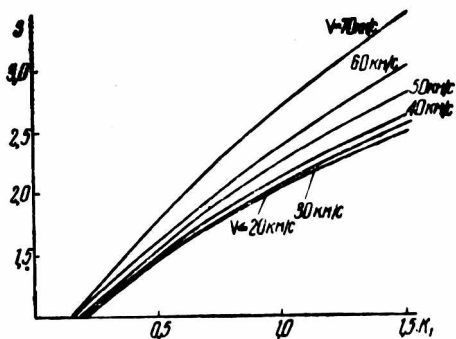


Рис. 2. График функции  $s=f(K_1/v)$ .

местного времени для разных  $K_1$  и для разных месяцев. Эти графики были получены интегрированием зависимости  $s=f(K_1/v)$  по скорости. Среднемесячные распределения скоростей метеоров получены по измерениям 1972 г. В каждый месяц проведено не менее 10 суток измерений. Периоды действия известных метеорных потоков исключались.

Анализ графиков рис. 3

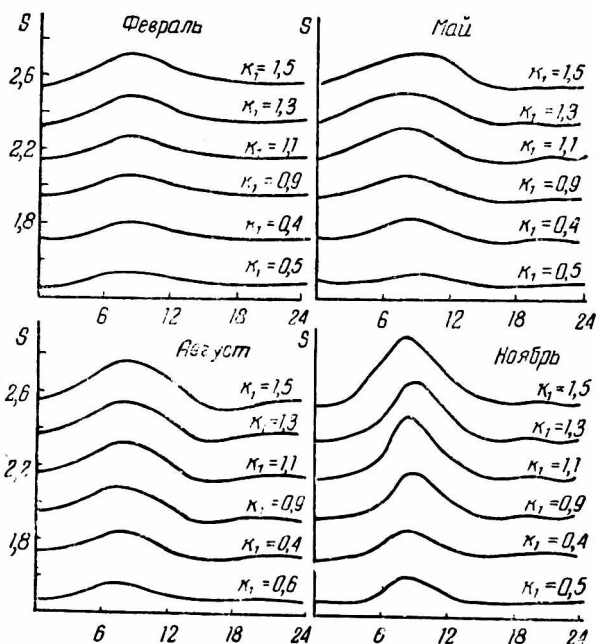


Рис. 3. Зависимость параметра  $s$  от местного времени и  $K_1$  для разных месяцев.

показывает, что максимальное значение поправки принимает в промежуток времени от 6 до 12 часов местного времени в осен-

ние и зимние месяцы. Она достигает почти 20% по сравнению с (10).

В это время при регистрации метеоров радиолокатором с антенной, направленной на восток, наблюдается максимальная численность, вызванная концентрацией видимых радиантов к апексу Земли. Наблюдение апексной области радиантов сопровождается увеличением параметра  $s$  [8, 9]. Таким образом, объяснить суточный ход параметра  $s$  распределения метеорных тел по массам только селективностью радиолокационного метода к метеорам, порождаемым частицами с разными скоростями, нельзя. Вероятно, причиной, вызывающей суточные вариации параметра  $s$  распределения метеорных тел по массам, является неоднородность характеристик потока метеорных тел, порождающих метеоры, регистрируемые в разное время суток.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гольцман Ф. М. Статистические модели интерпретации. М., «Наука», 1971. 327 с.
2. Белькович О. И. Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань, 1971. 103 с.
3. Костылев К. В. Математическое моделирование метеорных явлений и метеорного распространения радиоволн. Автореф. докт. дис. Казань, 1971. 30 с.
4. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Л., Физматгиз, 1962. 331 с. Авт.: Н. П. Бусленко, Д. И. Голенко, В. Г. Срагович и др.
5. Лебединец В. Н., Шушкова В. Б. Испарение и торможение мелких метеорных тел. — «Астрономический вестник», 1968, 2. 1, с. 37—43.
6. Волощук Ю. И., Кашеев Б. Л., Лебединец В. Н. Отражение радиоволн от метеорных следов. I. Математическое моделирование зависимости начального радиуса метеорного следа от скорости метеорных тел и высоты отражающей «точки». — Сб. «Радиотехника», Вып. 28. Харьков, 1974, с. 26—34.
7. Жуков В. В. Исследование высотных зависимостей метеорных явлений. Автореф. канд. дис., Харьков, 1972, 21 с.
8. Волощук Ю. И. Исследование статистических характеристик радиометеоров (по измерениям численности). Автореф. канд. дис., Харьков, 1973. 19 с.
9. Белькович О. И., Бескин Л. Н., Пупышев Ю. А. Распределение численности метеоров. — Сб. «Метеорное распространение радиоволн». Вып. 2. Казань, 1964, с. 56—58.