

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕННЫХ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ НА ОЦЕНКУ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ

Введение

В настоящее время большую научную ценность и актуальность представляет задача изучения распределений элементов орбит спорадических метеорных частиц, поскольку последние являются практически единственным источником информации о происхождении и эволюции метеорного вещества в межпланетном пространстве. При этом определяющее значение приобретает проблема учета различных видов селекций, искажающих результаты наблюдений и затрудняющих их правильную интерпретацию. При изучении распределений возникает задача учета астрономической селекции или иначе – астрономического фактора P_a , физический смысл которого состоит в том, число что частиц, регистрируемых с поверхности Земли, зависит от их элементов орбит, а, значит, условий попадания на Землю. Геометрический фактор P_z описывает зависимость замечаемости от координат радианта метеоров. Физический фактор P_ϕ – зависимость от геоцентрической скорости метеора v , с которой метеороид влетает в атмосферу Земли.

В статье предлагается новый метод учета физического фактора. Представленные ранее в литературе алгоритмы позволяют сделать оценку P_ϕ для случая обнаружения радиометеоров (определения плотности потока зарегистрированных метеороидов). При оценке истинных распределений элементов орбит зарегистрированных метеоров уже недостаточно обнаружить отраженный от метеорного следа сигнал. Необходимо, кроме этого, получить оценки скорости метеороида, что возможно, если метеорный след является насыщенным. Это означает, что длина следа (которая определяет величину физического фактора) зависит от интервала высот, на котором эффективная электронная плотность превышает $\alpha_{эф}^{\min}$ (минимального значения электронной плотности, при котором могут быть обнаружены следы данной РЛС в направлении максимального излучения), но меньше порога $\alpha_{эф}^{\max}$, при превышении которого след становится насыщенным и, следовательно, отраженный от него сигнал не несет информации о скорости метеороида.

Методика расчета физического фактора замечаемости

Физический фактор замечаемости определяется выражением [1]

$$P_\phi = \frac{1}{l_0} \int_0^\infty l(\alpha_{эф}^{\min}) n(M_0) dM_0, \quad (1)$$

где l_0 – некоторая средняя длина метеорных следов; $l(\alpha_{эф}^{\min})$ – длина участка метеорного следа, на котором эффективная электронная плотность больше $\alpha_{эф}^{\min}$; $n(M_0)$ – дифференциальное распределение масс метеорных тел.

Эффективная линейная электронная плотность $\alpha_{эф}$ вдоль метеорного следа рассчитывается по формуле [1]

$$\alpha_{эф} = \alpha(\delta, M_0, v, z, \lambda) \frac{1 - \exp\left(-8\sqrt{2}\pi^2 D \sqrt{R \cdot v^{-2} \cdot \lambda^{-3}}\right)}{8\sqrt{2}\pi^2 D \sqrt{R \cdot v^{-2} \cdot \lambda^{-3}}} \exp\left[-\left(\frac{2\pi r_0}{\lambda}\right)^2\right] \quad (2)$$

где a – линейная электронная плотность вдоль следа; R – наклонная дальность от РЛС до точки зеркального отражения на следе; D – коэффициент амбиполярной диффузии; r_0 – начальный радиус метеорного следа; λ – рабочая длина волны РЛС.

Для расчета линейной электронной плотности воспользуемся физической теорией метеорных явлений, разработанной В.Н. Лебединцом [1]:

$$\alpha = \beta(v) \sqrt[3]{v^2 M_0^2 \delta^{-2}} \frac{\rho \Lambda A}{2 \mu m_H Q} \left(1 - \frac{1}{6} \frac{\rho \Lambda A H \sqrt[3]{v^2}}{Q M_0 \cos(z) \sqrt[3]{M_0 \delta^2}} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность атмосферы на высоте h ; Λ – коэффициент теплопередачи; A – коэффициент формы; μ – средний атомный вес метеорного вещества; m_H – масса атома водорода; Q – энергия испарения 1 г метеорного вещества.

В выражениях (2) и (3) все параметры задаются в единицах СИ.

При оценке истинных распределений элементов орбит зарегистрированных метеороидов необходимо, как указывалось выше, получить оценку скорости метеороида и сдвигов отраженных сигналов один относительно другого, как минимум, в трех приемных пунктах, отстоящих один от другого на расстояние 1 – 15 км. Если скорость метеороида определяется дифракционным методом (как в большинстве систем радиолокационных наблюдений метеороидов), амплитудно-временная характеристика отраженного сигнала должна быть такой, чтобы можно было четко выявить 3 – 5 (чем больше, тем точнее можно оценить скорость и сдвиги) экстремумов АВХ. Далее, как следует из теории, на которой базируется дифракционный метод, это возможно, если метеорный след является ненасыщенным. Это означает, что в данном случае длина следа определяется интервалом высот, на котором эффективная электронная плотность превышает $\alpha_{эф}^{\min}$, но меньше порога $\alpha_{эф}^{\max}$, при превышении которого след становится насыщенным и, следовательно, отраженный от него сигнал имеет АВХ без флуктуаций, вызванных дифракцией, то есть по ней нельзя найти скорость метеороида. Это приводит к тому, что полезная в данном случае длина метеорного следа уменьшается (см. рис. 1), а это неизбежно изменяет кривую физического фактора и, как следствие, весовые множители при дальнейшей статистической обработке. Все было бы хорошо, если бы четкая граница, разделяющая ненасыщенные и насыщенные метеорные следы, во-первых, существовала и, во-вторых, каким-то образом (теоретически или экспериментально) эта граница была установлена. К сожалению, по этому вопросу в мировой науке нет единого мнения.

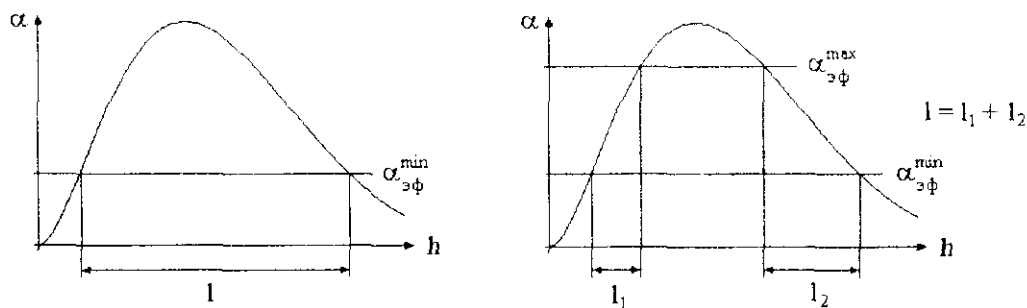


Рис. 1

Кайзер и Клосс [2] на основании задачи взаимодействия радиоволн с ионизированным метеорным следом дают следующую классификацию метеорных следов: насыщенные – при линейной электронной концентрации $\alpha > 2.4 \cdot 10^{14}$ эл/м; ненасыщенные – $\alpha < 2.4 \cdot 10^{14}$ эл/м; следы переходного типа – $\alpha \approx 2.4 \cdot 10^{14}$ эл/м.

Лебединец [3] для эффективной линейной электронной плотности вдоль ненасыщенного ионизированного следа приводит выражение (3), а для насыщенного следа зависимость вида

$$\alpha_{эф} = 4.55 \cdot 10^{10} \cdot \sqrt[4]{\alpha(\delta, M_0, v, z, \lambda)}. \quad (4)$$

Моделирование эффективных электронных плотностей (3) и (4) показало, что исследуемые зависимости пересекаются в двух точках следа – превышение порога насыщенности в начале следа и снижение ниже порога чувствительности в конце следа. Электронная плотность в этих точках пересечения близка к 10^{14} эл/м во всем диапазоне изменения зенитного расстояния радианта, плотности, начальной массы и скорости метеорной частицы. Длина волны λ при расчетах была принята равной 9.646 м, что соответствует длине волны комплекса МАРС БНИП ХНУРЭ.

Соснова и Лебединец [4] при расчете коэффициентов отражения радиоволн от метеорных следов получили, что строго к ненасыщенным следам могут быть отнесены лишь следы с электронной плотностью $\alpha \leq 10^{13}$ эл/м, следы промежуточного типа ограничиваются сверху значением $\alpha \leq 10^{15}$ эл/м.

Белькович [5] приводит значение переходной электронной плотности (значения плотности меньше этой величины соответствуют ненасыщенным следам) $\alpha \approx 6 \cdot 10^{13}$ эл/м.

При расчете физического фактора замечаемости мы разбили все метеорные следы на два типа: насыщенные и ненасыщенные, а пороговое значение насыщенных следов приняли равным $\alpha_{эф}^{max} = 5 \cdot 10^{13}$ эл/м.

Алгоритм вычисления физического фактора

В табл. 1 приведены используемые для расчетов модели.

1. Задаемся значением скорости v , моделями коэффициента ионизации $\beta(v)$, высоты приведенной атмосферы H , коэффициента амбиполярной диффузии D и начального радиуса r_0 , по выражениям (2) и (3) вычисляем трехмерный вектор, где каждому значению высоты (от 70 до 120 км) и каждому значению массы метеорного тела (от 0.1 мкг до 10 г) соответствует значение эффективной электронной плотности.

2. На основе вычисленного в п. 1 вектора эффективной электронной плотности определяем вектор длин следов, образованных метеорными телами. Значение порога чувствительности системы $\alpha_{эф}^{min}$ равно $5 \cdot 10^{10}$, 10^{11} , $5 \cdot 10^{11}$, 10^{12} и $5 \cdot 10^{12}$ эл/м.

3. Повторяем п. 2 для случая расчета P_ϕ по двум порогам. Значение $\alpha_{эф}^{max}$ задается равным $5 \cdot 10^{13}$ эл/м.

4. По выражению (1) определяем два вектора произведений длин следов и значений дифференциального распределения по массам (2).

5. Используя метод численного интегрирования Ньютона–Котеса, находим значение интеграла (1) для данного значения скорости v .

6. Определяем значение физического фактора замечаемости для всего диапазона значений скоростей метеорных тел.

7. Нормируем значения физического фактора таким образом, чтобы значение P_ϕ при скорости $v = 40$ км/с было равным единице.

Таблица 1

Коэффициент ионизации	$\beta = 3.0893 \cdot 10^{-6} (v - 8.13)^3$
Коэффициент диффузии, м ² /с	$D = \exp(0.108h - 7.842)$
Начальный радиус, м	$0.109 v^{0.65} e^{\frac{h-95}{H}}$
Плотность атмосферы, кг/м ³	$\rho = 1.405 \cdot 10^{-6} e^{\frac{h-95}{H}}$
Приведенная высота, км	$H = 46.82 - 0.95h + 0.0055h^2$

На рис. 2 приведены рассчитанные зависимости физического фактора замечаемости комплекса МАРС для алгоритма с определением длины следа по одному порогу. Здесь обозначено:

график 1 – $\alpha_{эф}^{\min} = 5 \cdot 10^{10}$ эл/м;

график 2 – $\alpha_{эф}^{\min} = 10^{11}$ эл/м;

график 3 – $\alpha_{эф}^{\min} = 5 \cdot 10^{11}$ эл/м;

график 4 – $\alpha_{эф}^{\min} = 10^{12}$ эл/м;

график 5 – $\alpha_{эф}^{\min} = 5 \cdot 10^{12}$ эл/м;

Полученные зависимости физического фактора для двух алгоритмов определения следа оказались довольно близкими друг к другу. Такой результат был ожидаемым. Действительно, влияние двух порогов должно сказаться только для относительно крупных метеороидов, однако, распределение по массам метеороидов $n(M_0) = \frac{k}{M_0^s}$ таково, что с увеличением массы метеорных тел их относительное количество с ростом массы очень быстро убывает. Таким образом, в интегральный физический фактор замечаемости, каким является (1), наибольший вклад вносят метеороиды с массами $10^{-6} - 10^{-4}$ г, которым в основном соответствуют ненасыщенные следы.

Чтобы убедиться в том, что влияние эффекта двух порогов имеет место и им нельзя пренебречь, рассчитаем функцию отношения физических факторов замечаемости для двух и одного порога:

$$F_{\phi} = \frac{P_{\phi}|_{2 \text{ порога}}}{P_{\phi}|_{1 \text{ порог}}}. \quad (5)$$

Зависимости, рассчитанные по (5), – приведены на рис. 3.

Как видно из зависимостей, представленных на рис. 3, вероятность обнаружения радиометеоров в случае учета двух порогов обнаружения меньше соответствующей вероятности для одного порога во всем диапазоне скоростей метеоров.

Увеличение порога чувствительности РЛС приводит к уменьшению значения физического фактора замечаемости. Данный эффект можно объяснить, во-первых, уменьшением длины следа, определяемого разностью двух участков следа, соответствующих

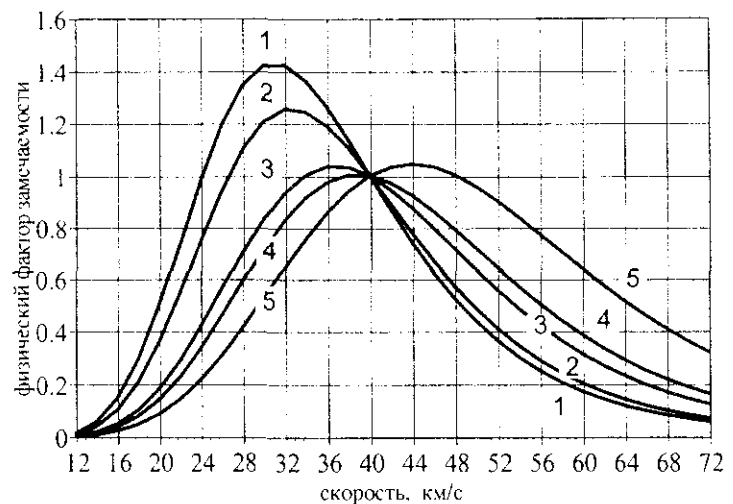


Рис. 2

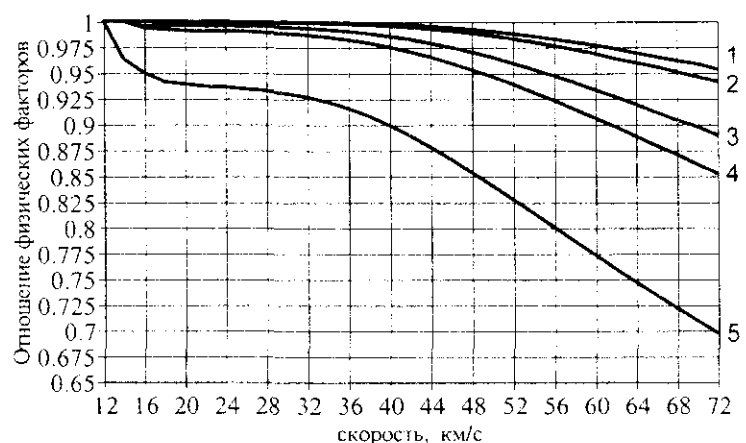


Рис. 3

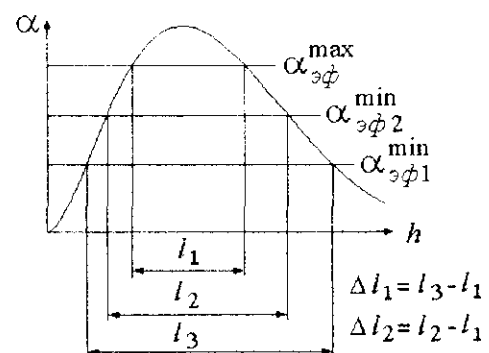


Рис. 4

электронной концентрации больше $\alpha_{эф}^{\min}$ и меньше $\alpha_{эф}^{\max}$ (см. рис. 4); во-вторых, уменьшением общего числа регистрируемых метеорных следов за счет уменьшения числа ненасыщенных следов. Последнее утверждение в большей степени относится к метеорным следам с максимальной электронной плотностью $\alpha_{эф}^{\max} \leq 10^{12}$ эл/м и РЛС с порогом чувствительности $\alpha_{эф}^{\min} > 10^{12}$ эл/м. Стоит также указать на уменьшение значения зависимости F_{ϕ} при увеличении скорости метеорных тел. Эта зависимость, по-видимому, объясняется тем, что при равных условиях большему значению скорости соответствует меньшее значение массы метеора для порождения следа с заданной электронной плотностью. Соответственно при одинаковых массах быстрые метеоры могут порождать следы с электронной плотностью, превышающей $\alpha_{эф}^{\max}$ (происходит уменьшение длины следа), когда медленные метеоры порождают ненасыщенные следы.

Выводы

Учет влияния насыщенных следов при определении физического фактора замечаемости и последующей коррекции распределений элементов орбит метеоров, может заметно изменить соответствующие распределения высокоскоростных метеороидов. Это особенно важно при обработке данных, полученных на системах с порогом чувствительности превышающим $5 \cdot 10^{11}$ эл/м. Данный предел характерен для комплекса МАРС. Также стоит отметить важность использования разработанной нами методики для коррекции данных при изучении популяции метеороидов со скоростями, близкими к гиперболическому пределу.

Список литературы: 1. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 2. Kaiser T.R., Closs R.L. Theory of radio reflection from meteor trails. Phil. Mag., 1952, ser. 7, 43, N336, p. 1-32. 3. Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 246 с. 4. Лебединец В.Н., Соснова А.К. Расчет метеорных радиозо от следов переходного типа. Труды ИПГ. 1969. Вып. 15. С. 228–244. 5. Белькович О.И. Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань: Изд-во КГУ, 1971. 104 с

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.10.2005