УДК 551.510

Д.Ю.ГОРЕЛОВ, Ю.И. ВОЛОЩУК, д-р техн.наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ

Введение

Наблюдения метеоров любым из наземных методов являются косвенными, то есть информацию о физических и динамических параметрах метеорных тел (метеороидов) получают путем обработки сигналов (оптических, телевизионных, радиолокационных и др.), являющихся результатом взаимодействия метеороидов с атмосферой Земли. Очевидно, что при этом доступны наблюдениям только те метеоры, метеороиды которых движутся по орбитам, пересекающимся с орбитой Земли. Но и для них различия в условиях встречи с Землей обуславливают резкое отличие наблюдаемых свойств метеоров.

Отличие видимых распределений динамических параметров метеороидов в атмосфере Земли от истинных распределений в околоземном и, тем более, в межпланетном пространстве определяется, по крайней мере, тремя факторами: во-первых, движение и притяжение Земли определяют вероятность встречи метеорных тел с Землей от параметров орбит, по которым они движутся, – астрономический фактор селекции. Во-вторых, характер наблюдений определяет вероятность регистрации метеорных тел с различными координатами радианта – геометрический фактор селекции. В-третьих, различная геоцентрическая скорость, с которой метеорные тела влетают в земную атмосферу, определяет вероятность регистрации наземными методами наблюдения метеорного тела с данной скоростью – физический фактор селекции.

Из всех факторов селективности, перечисленных выше, наиболее важным при радиолокационных наблюдениях является физический. Важность физического фактора селективности (замечаемости) радиометеоров определяется тем, что она характеризует не только сам метеорный след в атмосфере Земли, но и сигнал, отраженный от этого следа.

Теория физического фактора замечаемости была впервые разработана исследователями известной во всем мире школы проф. Б.Л. Кащеева еще в 70-х годах прошлого века [1]. Полученные ими оценки физического фактора используются исследователями метеоров до настоящего времени. Однако эти оценки по объективным причинам (первая из них – отсутствие достаточно мощных ЭВМ) сложно адаптировать к конкретной радиолокационной системе (со своей чувствительностью, длиной волны и т.д.). Другая причина – отсутствие в то время целого ряда адекватных моделей как атмосферы на метеорных высотах, так и сигналов, отраженных от ионизированного следа. Это и потребовало разработки алгоритма и программы расчета физического фактора для современных систем с любыми параметрами.

Постановка задачи и метод решения

Зависимость вероятности обнаружения радиометеоров от геоцентрической скорости v породивших их метеороидов является многопараметрической функцией. В качестве параметров здесь выступает несколько неслучайных функций. Во-первых, это зависимость коэффициента ионизации $\beta(v)$ в метеорном следе от скорости метеорного тела, породившего его. Во-вторых, зависимость начального радиуса $r_0(v,H,h)$ ионизированного метеорного следа от скорости метеора и высоты приведенной атмосферы H на данной высоте h. В-третьих, зависимость линейной электронной концентрации электронов α вдоль следа радиометеора от его плотности δ, массы M_0, скорости v, зенитного расстояния радианта z и длины волны РЛС λ. К сожалению, в настоящее время существует по несколько (3 – 5) используемых различными исследователями, причем в различных комбинациях, моделей каждой из перечисленных и введенных ниже зависимостей. Поэтому, одной из задач, которые мы решали,

было выбрать те модели и их комбинации, которые наилучшим образом соответствуют реальности.

Физический фактор замечаемости определяется выражением [1]

$$P_{ф} = \frac{1}{l_0} \int_0^{\infty} l\left(\alpha_{эф}^{\min} \right) \frac{n_0}{M_0^{\,s}} dM_0 , \tag{1}$$

где l_0 – некоторая средняя длина метеорных следов; $l\left(\alpha_{эф}^{\min} \right)$ – длина участка метеорного следа, на котором эффективная электронная плотность больше $\alpha_{эф}^{\min}$ (минимального значения электронной плотности, при котором могут быть обнаружены следы данной РЛС в направлении максимального излучения); n_0 и s – константы в дифференциальном распределении масс метеорных тел.

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

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

где R – наклонная дальность от РЛС до точки зеркального отражения на следе; D – коэффициент амбиполярной диффузии.

В СССР сложились две большие школы по изучению распределения метеорного вещества в атмосфере и Солнечной системе. Представители каждой из школ разработали свою теоретическую модель линейной электронной плотности вдоль метеорного следа. Кратко остановимся на этих моделях.

Электронная плотность α по Лебединцу [1] определяется выражением

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

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.

Электронная плотность по Костылеву [2] определяется следующим образом. Во-первых, находим давление атмосферы $P_{\max}$ в точке максимума электронной плотности:

$$P_{\max} = 1.131 \cdot 10^3 \left(v \right)^{-2.15} \left(M_0 \delta^2 \right)^{0.28} \left(\cos(z) \right)^{\gamma} , \tag{4}$$

где

$$\gamma = 0.3094 + 0.037 \ln\left(M_0 \delta^2 \right) + 0.112 \ln(v) . \tag{5}$$

Линейная электронная плотность в следе

$$\alpha = 27.7264 \frac{\beta(v) \left(\cos(z) \right)^{0.88}}{\mu_m H \cdot 10^5} \left(e^{\Delta t} - e^{-\Delta t} \right) \left(1 - e^{2.75 - \Delta t} \right)^2 \varsigma , \tag{6.1}$$

$$\varsigma = \exp\left(-0.7685\left(\cos(z)\right)^{\gamma-1} v^{-2.15}\left(M_0\,\delta^2\right)^{-0.05} e^{-0.01\Delta t(v-40)} \right). \qquad (6.2)$$

В выражении (6) μ_m – средняя масса молекулы испарившегося вещества; $\Delta t = \frac{h_{\max} - h}{H} + 1.697$ – нормированная высота с началом отсчета на высоте, соответствующей концу ионизированного следа. Высота максимума ионизации $h_{\max}$ определяется по таблицам [3, 4] с учетом (5).

В выражениях (5) и (6) параметры μ_m и M_0 задаются в граммах; v – в километрах в секунду; δ – в граммах на сантиметр кубический; высоты H, $h_{\max}$ и h – в километрах.

Для того чтобы оказалось возможным произвести расчеты по физическому фактору замечаемости, необходимо принять определенную модель метеорной зоны ионосферы (70÷110 км). Под данной моделью следует понимать принятую для расчетов совокупность зависимостей приведенной высоты однородной атмосферы, коэффициента амбиполярной диффузии, начального радиуса и коэффициента ионизации.

После многолетних дискуссий диапазон возможных моделей коэффициента ионизации и начального радиуса метеорного следа значительно сузился. В качестве "крайних видов" таких зависимостей могут быть приняты модели Baggaley [4] и Тохтасьева [7] для $\beta(v)$, а также модели Костылева [2] и Baggaley [4] для $r_0(v,H,h)$. В табл. 1 представлены некоторые зависимости коэффициента ионизации и начального радиуса.

Таблица 1

Источник	Выражение	Источник	Выражение
[3]	$\beta = 3.0893\cdot10^{-6}(v-8.13)^3$	[2]	$r_0 = 0.024\, v e^{\frac{h-95}{H}}$
[4]	$\beta = 5.4955\cdot10^{-7} v^{3.42}$	[7]	$r_0 = 0.109 v^{0.65} \mathrm{e}^{\frac{h-95}{H}}$
[6]	$\beta = 8.6\cdot10^{-2}(0.0215v)^n$, $n = 2.7 + 4.07\exp(-0.035v)$	[4]	$r_0 = 0.074 v^{0.57} \mathrm{e}^{0.45\frac{h-95}{H}}$
[8]	$\beta = 8.4\cdot10^{-7}(v-8.8)^{3.5}$	[9]	$r_0 = 0.052 v^{0.8} \mathrm{e}^{0.66\frac{h-95}{H}}$

На рис. 1 приведены графики зависимостей $\beta(v)$, представленных в табл. 1. Зависимость 1 – рекомендована Всесоюзным рабочим совещанием по проблеме избирательности радионаблюдений метеоров (г. Обнинск, 1982). Зависимость 2 – математическое моделирование распределений наблюдаемых метеоров на комплексе МАРС. Зависимость 3 получена Тохтасьевым путем усреднения экспериментальных зависимостей Быдина и Бухтева [8]. Зависимость 4 принята Baggaley в работе по обработке результатов радионаблюдений метеоров на комплексе AMOR [4]. На рис. 2 приведены графики зависимостей начального радиуса, представленные в табл. 1. Функция высоты

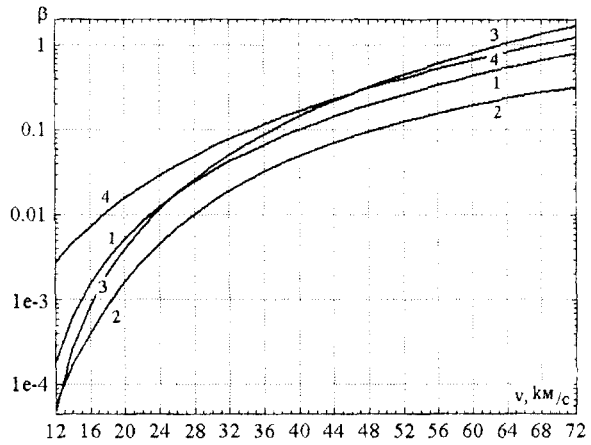

Рис. 1

приведенной атмосферы H в расчетах была взята из [3]. Зависимость 1 – рекомендована Всесоюзным рабочим совещанием по проблеме избирательности радионаблюдений метеоров (г. Обнинск, 1982). Зависимость 2 принята Baggaley в работе по обработке результатов радионаблюдений метеоров на комплексе AMOR. Зависимость 3 – получена Лебединцом при математическом моделировании начального радиуса метеорного следа от скорости и высоты "отражающей точки". Зависимость 4 – принята Костылевым при моделировании метеорного распространения радиоволн.

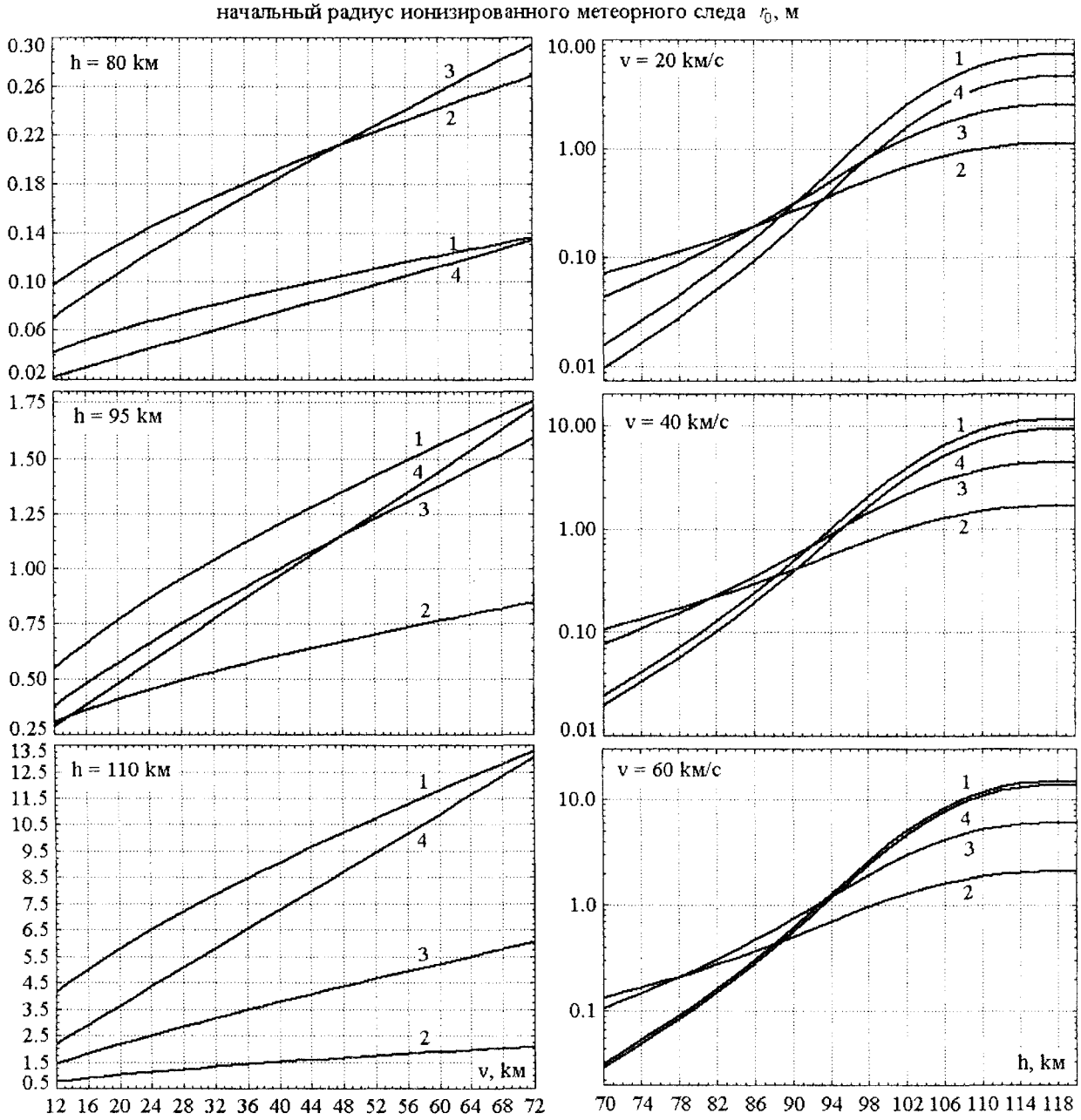

Рис. 2

Имеющиеся в литературе зависимости высоты приведенной атмосферы и коэффициента амбиполярной диффузии от высоты расходятся не так сильно, как выше указанные модели начального радиуса. В табл. 2 приведены основные модели H и D, а на рис. 3 – рассчитанные графики представленных моделей.

Таблица 2

Источник	Выражение
[3]	$H = -40.1801 + 1.8942h - 0.025h^2 + 0.0001065h^3$
[4]	$H = 46.8273 - 0.95h + 0.0055h^2$
[7]	$H = 58.3880 - 1.1630h + 0.0064h^2$
[4]	$D = \exp(0.108h - 7.842)$
[5]	$D = 2.1519 \cdot 10^{-7} \exp(0.1835h)$
[7]	$D = \exp(-9.1840 + 0.0555h + 0.0007h^2)$
[9]	$D = 3.7 \exp(-14.1975 + 0.1543h)$

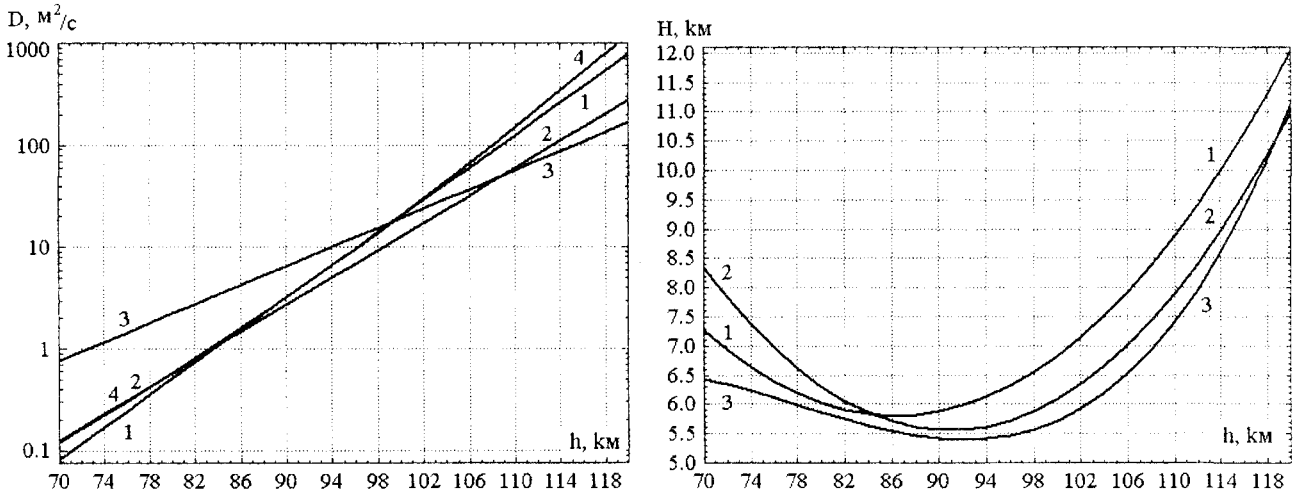

Рис. 3

Сравнительный анализ моделей линейной электронной плотности

Согласно (1) для получения оценок физического фактора тех моделей, которые мы рассмотрели выше, недостаточно. Принципиальную роль здесь играет ионизационная кривая метеорного следа α. Как отмечено выше, две модели этой важнейшей характеристики были практически одновременно и независимо получены в Харькове [1] – формула (3) и Казани [2] – формула (6).

Получим таблицу высот максимумов ионизации, собственно значений максимальной электронной плотности в функции массы и скорости метеорного тела. В расчетах плотность метеорных тел δ была принята равной 3400 кг/м^3; коэффициент теплопередачи Λ равным единице; коэффициент формы A равным 1.2; средний атомный вес метеорного вещества μ равным 55.85; средняя масса молекулы испарившегося вещества μ_m равной $9.3 \cdot 10^{-26}$ кг; энергия испарения 1 г метеорного вещества Q равной 8 Дж/кг; зенитное расстояние z равным $\frac{2}{3}$. Плотность атмосферы определялась выражением $\rho = 1.405 \cdot 10^{-6} e^{\frac{95-h}{H}}$ кг/м^3 (здесь высоты h и H в километрах). Длина волны РЛС была принята 9.646 м, что соответствует рабочей длине волны комплекса МАРС.

Далее все расчеты линейной электронной плотности будут выполняться для этих же значений входных параметров.

Рассчитаем зависимости средней длины метеорных следов от скорости в диапазоне масс метеорных тел был принят $10^{-9} \div 10^{-4}$ кг для моделей электронной плотности по Лебединцу (3) и по Костылеву (6).

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

$v = 15$ км/с								
M_0, кг			10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
h_{max}, км	Модель	(3)	93.8	89.4	85.1	80.7	75.5	69.1
		(6)	87.6	83.5	79.5	75.5	71.4	67.4
α_{max}, $\times 10^{12}$ эл/м		(3)	0.00054	0.0054	0.055	0.53	4.8	40
		(6)	0.0019	0.02	0.21	2.1	22	200
$v = 30$ км/с								
M_0, кг			10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
h_{max}, км	Модель	(3)	104.8	98.1	92.9	88.5	84.1	79.6
		(6)	96.9	92.9	88.8	84.8	80.8	76.7
α_{max}, $\times 10^{12}$ эл/м		(3)	0.013	0.16	1.7	17	180	1700
		(6)	0.035	0.36	3.6	35	340	3300
$v = 50$ км/с								
M_0, кг			10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
h_{max}, км	Модель	(3)	115.5	107.1	100.3	94.7	89.9	85.9
		(6)	103.8	99.7	95.7	91.7	87.6	83.6
α_{max}, $\times 10^{12}$ эл/м		(3)	0.017	0.8	10	120	1200	12000
		(6)	0.28	3	32	320	3200	30000
$v = 70$ км/с								
M_0, кг			10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
h_{max}, км	Модель	(3)	121.3	115.0	106.7	99.2	94.0	89.5
		(6)	108.3	104.3	100.2	96.2	92.2	88.1
α_{max}, $\times 10^{12}$ эл/м		(3)	0.08	0.85	27	340	3800	39000
		(6)	0.8	9.1	98	1000	10000	100000

Как видно из табл. 3, обе модели довольно хорошо сходятся. Однако наблюдается несколько существенных различий: высота максимума ионизации для модели Костылева в среднем на 4 км выше, чем для модели Лебединца для всех значений масс и скоростей метеорных тел. Кроме того, электронная плотность для модели (6) больше электронной плотности для модели (3) в $2 \div 10$ раз. Данное различие, на наш взгляд, объясняется принятой в модели (6) более сильной зависимостью линейной электронной плотности от эффекта торможения метеорной частицы.

Теперь можно, выбрав какие-то конкретные модели из тех, что были рассмотрены выше, численным интегрированием в соответствии с (1) рассчитать физический фактор замечаемости. Сделаем это для системы МАРС, но сначала сформулируем алгоритм вычисления физического фактора:

1. Задаемся значением скорости v, моделями β, H, D и r_0, по выражениям (2) и (6) вычисляем трехмерный вектор, где каждому значению высоты (от 70 до 110 км) и каждому

значению массы метеорного тела (от 0.1 мкг до 10 г) соответствует значение эффективной электронной плотности.

2. На основе вычисленного в пункте 1 вектора эффективной электронной плотности определяем вектор длин следов, образованных метеорными телами.

3. По выражению (1) определяем вектор произведений длин следов и значений дифференциального распределения по массам.

4. Используя метод Ньютона – Котеса, определяем численным методом значение интеграла (1) для данного значения скорости v.

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

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

Расчет физического фактора замечаемости комплекса МАРС

Физический фактор замечаемости был рассчитан для 5 порогов эффективной электронной плотности. Коэффициент s в выражении дифференциального распределения по массам был принят равным 2.2. В табл. 4 приведены используемые для расчетов параметры комплекса МАРС и расчетные модели коэффициента ионизации, высоты приведенной атмосферы, коэффициента амбиполярной диффузии и начального радиуса.

Таблица 4

Порог $\alpha_{эф}^{min}$, эл/м	$5\cdot10^{10}, 10^{11}, 5\cdot10^{11}, 10^{12}, 5\cdot10^{12}$
Коэффициент ионизации	$\beta = 3.0893\cdot10^{-6}(v-8.13)^3$
Приведенная высота	$H = 46.8273 - 0.95h + 0.0055h^2$ км
Коэффициент диффузии	$D = \exp(0.108h - 7.842)$ м^2/с
Начальный радиус	$0.109v^{0.65}\exp\left(\frac{h-95}{H}\right)$ м

На рис. 4, а, б приведены рассчитанные и пронормированные для значения скорости $v = 40$ км/с зависимости физического фактора замечаемости комплекса МАРС для определения электронной плотности по Лебединцу (3) и Костылеву (6) соответственно. На рисунках кривая 1 соответствует порогу $5\cdot10^{10}$ эл/м, 2 – 10^{11} эл/м, 3 – $5\cdot10^{11}$ эл/м, 4 – 10^{12} эл/м и 5 – $5\cdot10^{12}$ эл/м. Приведенные на рис. 4 зависимости хорошо согласуются с кривыми из [1]: лучше всего замечаются метеоры со скоростями $20 \div 40$ км/с. При уменьшении порога чувствительности РЛС (увеличении значения $\alpha_{эф}^{min}$) максимум замечаемости радиометеоров смещается в сторону больших скоростей. Плохая замечаемость медленных метеоров связана с малыми значениями коэффициента ионизации при малых скоростях (см. рис. 1). В случае быстрых метеоров возрастают начальные радиусы ионизированных метеорных следов, что приводит к уменьшению амплитуд сигналов, рассеянных метеорными следами. Данный эффект объясняется умножением (аналогично эффективной электронной плотности) мощности рассеянного следом сигнала на множитель ослабления K:

$$K = \left[\frac{1-\exp\left(-8\sqrt{2}\pi^2 D\sqrt{R\cdot v^{-2}\cdot\lambda^{-3}}\right)}{8\sqrt{2}\pi^2 D\sqrt{R\cdot v^{-2}\cdot\lambda^{-3}}}\exp\left(-4\pi^2 r_0{}^2\lambda^{-2}\right)\right]^2. \qquad (7)$$

Увеличение чувствительности РЛС позволяет регистрировать более мелкие метеорные тела, которые испаряются на больших высотах и следы которых имеют большие начальные радиусы, что, в свою очередь, приводит к ухудшению замечаемости быстрых метеоров. Последнее утверждение полностью согласуется с полученными зависимостями. Кроме того, влияние начального радиуса и диффузии приводит к уменьшению длины участка следа, на котором эффективная линейная электронная концентрация превышает пороговое значение. Согласно (1) это приводит к уменьшению фактора замечаемости.

Можно отметить, что использование моделей (4) или (6) не приводит к качественным изменениям оценок физического фактора, хотя некоторые количественные отличия имеют место, особенно при высокой чувствительности РЛС (зависимость 1). Четко проявляется подобие этих кривых, а это свидетельствует о том, что при весовой обработке "видимых" распределений с целью получить "истинные", когда в качестве веса используется величина $1/P_{\phi}$, после нормировки получим весьма близкие распределения и в одном, и в другом случае.

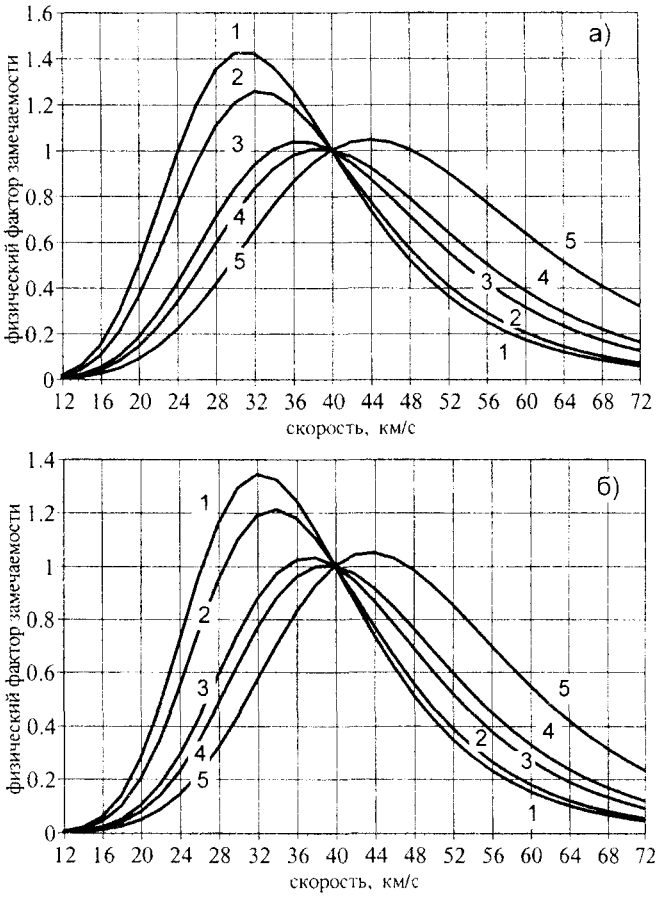

Рис. 4

Выводы

Отсутствие качественных отличий в кривых физического фактора замечаемости для моделей (3) и (6), а также рассчитанные по ним значения линейной электронной плотности (см. табл. 3) позволяют сделать вывод о высокой правдоподобности полученных результатов. Разработанная нами методика расчета физического фактора селективности может быть с успехом использована в дальнейшем при обработке данных, полученных при радиолокационных наблюдениях метеоров.

Список литературы: 1. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука. 1967. 260 с. 2. *Костылев К.В.* Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань: Изд-во КГУ. 1970. 142 с. 3 *ГОСТ 4401–73* Стандартная атмосфера. 4. *Baggaley W.J.* The meteoroid orbital distribution at 1 au determined by AMOR // ACM 2002. p. 225-229. *5. Белькович О.И.* Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань: Изд-во КГУ. 1971. 104 с. 6. *Волощук Ю.И., Хопова И.П.* Моделирование притока метеорного вещества по радиолокационным наблюдениям // Радиотехника. вып. 43. Харьков: Вища школа. 1977. С. 3-7. 7. *Ткачук А.А.* Влияние селективности радионаблюдений на распределение скоростей метеоров. // Метеорные исследования. вып. 7. М.: Радио и связь. 1971. С. 28-36. 8. *Тохтасьев В.С.* Зависимость коэффициента ионизации от скорости // Известия Астрономической энгельгардтовской обсерватории. 1976. вып. 41-42. С. 228-230. 9. *Лебединец В.Н., Соснова А.К.* Расчет метеорных радиоэхо от следов переходного типа // Труды ИПГ. 1969. вып. 15. С.228-244.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 08.11.2005