

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ УЧЕТА ФИЗИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИСТИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАДИОМЕТЕОРОВ

Введение

При исследовании метеоров, не доступных для прямого изучения, приходится использовать косвенные методы наблюдений (фотографические и радиолокационные). Данные методы дают результаты, искаженные селекцией. Из метеорных тел наблюдениям доступны только те, орбиты которых пересекают траекторию движения Земли. Но и для них различия в условиях встречи с Землей обуславливают резкое отличие наблюдаемых свойств от истинных. Отличие видимой картины от истинной определяется 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 метеоров, порождаемых метеорными телами 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 метеоров с данной скоростью – физический фактор селекции.

Большинство из зарегистрированных наземными методами метеоров относятся к радиометеорам, т.е. обнаруженных радиолокационным методом. При радионаблюдениях от скорости метеорного тела зависит амплитуда отраженного от порожденного им следа сигнала. Следовательно, наиболее важным для радиометеоров является физический фактор замечаемости.

Сравнительный анализ физических факторов замечаемости, рассчитываемых по разным методикам

Учет физического фактора P_{ϕ} селективности проводят весовым методом, суть которого сводится к приписыванию каждому зарегистрированному метеору веса, обратно пропорционального вероятности его наблюдения P_{ϕ}^{-1} .

Методика расчета физического фактора замечаемости приведена в [1]. Усовершенствованный алгоритм расчета физического фактора замечаемости с учетом влияния на оценки P_{ϕ} метеорных следов насыщенного и ненасыщенного типов приведен в [2]. Следует отметить, что при расчете физического фактора замечаемости необходимо задаться рядом параметров и моделей, которые до настоящего времени достоверно не определены. Это, в первую очередь, начальный радиус метеорного следа как функция скорости метеорного тела и высоты отражающей точки, зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты, коэффициента ионизации от скорости, значений высот и формы кривых ионизации и др.

В [3] предложены методы оценки P_{ϕ} , основанные на статистическом анализе результатов наблюдений, которые не требуют привлечения каких-либо физических моделей процессов образования метеорного следа и отражения радиоволн от него. Физический фактор замечаемости по [3] можно аппроксимировать выражением

$$P_{\phi}(v_{\infty}) = 4.2155 \cdot 10^{-15} v_{\infty}^{13.42} \exp(-0.42v_{\infty}). \quad (1)$$

В [4] использовано данное выражение для построения исправленных распределений параметров радиометеоров.

Стоит отметить, что большинство авторов, которые занимались учетом физического фактора замечаемости, при получении истинных распределений параметров метеоров учитывали P_ϕ как функцию только внеатмосферной скорости v_∞ и не учитывали его зависимость от зенитного расстояния z радианта, считая, что среднее значение $\cos(z)$ равно 0.666. Метод порядковых статистик [3] также не позволяет получить физический фактор как функцию v_∞ и $\cos(z)$.

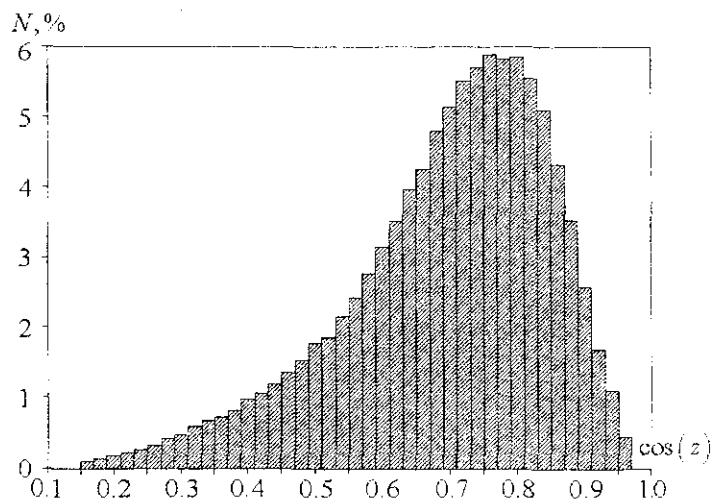


Рис. 1

Значение косинуса зенитного расстояния радианта может изменяться от 0 до 1, что хорошо иллюстрирует график (рис. 1) распределения $\cos(z)$, полученный при обработке каталога ХНУРЭ, насчитывающего около 155000 орбит радиометеоров. Данный каталог представляет собой результаты круглосуточных наблюдений радиометеоров системой МАРС [3] в течение 6 лет – с 1972 по 1978 год. На рис. 1 по оси ординат – количество орбит в процентах от всего объема выборки. Минимальное значение $\cos(z)$ равно приблизительно 0.174, а максимальное – около 0.995. Основной вклад в распределение вносят значения косинуса зенитного расстояния радианта, находящиеся в диапазоне $0.6 \div 0.9$. Среднее значение $\cos(z)$ равно 0.72. Как видим, предположение, что среднее значение косинуса зенитного расстояния радианта равно 0.666 для обрабатываемого каталога радиометеоров несколько неверно, кроме того – зенитное расстояние радианта изменяется в широких пределах, что неизменно повлияет на вид исправленных распределений параметров радиометеоров.

Для того чтобы сравнить, насколько может изменить вид исправленных распределений параметров орбит радиометеоров учет зависимости физического фактора замечаемости от зенитного расстояния радианта, мы рассчитали значения P_ϕ для трех вариантов:

- «классический» физический фактор по [1] с применением современных вычислительных методов [5];
- физический фактор по [1] с учетом влияния на оценки P_ϕ метеорных следов насыщенного и ненасыщенного типов [2];
- физический фактор по модели (1).

В расчетах по первым двум вариантам были приняты параметры и модели метеорной зоны ионосферы, рекомендованные на Всесоюзном рабочем совещании по проблеме избирательности радионаблюдений метеоров в Обнинске 1982 г. (см. табл. 1). Также в табл. 1 приведены необходимые для расчетов характеристики комплекса МАРС.

На рис. 2 приведены рассчитанные графики зависимости $P_\phi(v_\infty)$ при условии, что зенитное расстояние радианта равно 0.666. На рис. 2 кривая 1 соответствует физическому фактору по (1); кривая 2 – расчет по [2]; кривая 3 – расчет по [5]. Если сравнить графики приведенных функций, то можно отметить, что небольшое отличие значений графика 1 и значений графиков 2 и 3 имеет место при скоростях радиометеоров менее 30 км/с и более 50 км/с, что, на наш взгляд, объясняется принятыми при расчетах кривых 2 и 3 моделями метеорной зоны атмосферы, с одной стороны, и формулой аппроксимации (1) – с другой. На низких скоростях на оценки P_ϕ влияет используемый в расчетах коэффициент ионизации $\beta(v_\infty)$, в случае

быстрых метеоров – начальный радиус метеорного следа $r_0(v_\infty, h)$. В целом кривые довольно близки, благодаря чему мы можем сделать вывод: следует ожидать незначительных несоответствий в исправленных распределениях радиометеоров, обусловленных различием в рассчитанных по разным методикам значениях физического фактора.

Таблица 1

Порог чувствительности комплекса МАРС, эл/м	$\alpha_{\text{эл}}^{\text{min}} = 5 \cdot 10^{10}$
Рабочая частота комплекса МАРС, МГц	$f_0 = 31.1$
Коэффициент ионизации	$\beta = 3.0893 \cdot 10^{-6} (v - 8.13)^3$
Коэффициент амбиполярной диффузии, м ² /с	$D = \exp(0.108h - 7.842)$
Начальный радиус метеорного следа, м	$r_0 = 0.109 v^{0.65} \exp\left(\frac{h-95}{H}\right)$
Плотность атмосферы, кг/м ³	$\rho = 1.405 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{95-h}{H}\right)$
Приведенная высота атмосферы, км	$H = 46.82 - 0.95h + 0.0055h^2$

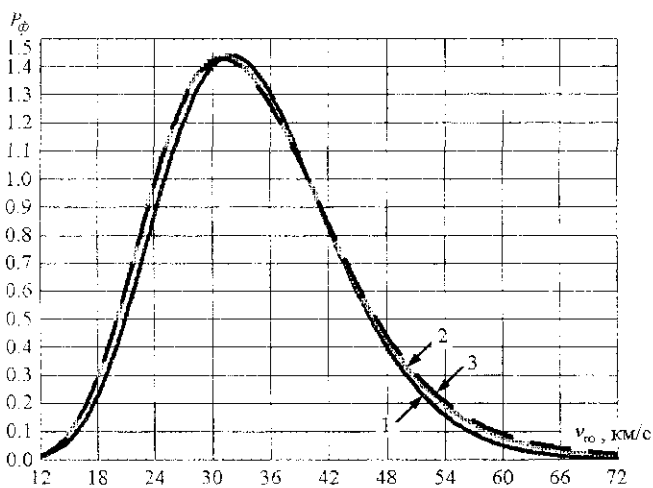


Рис.2

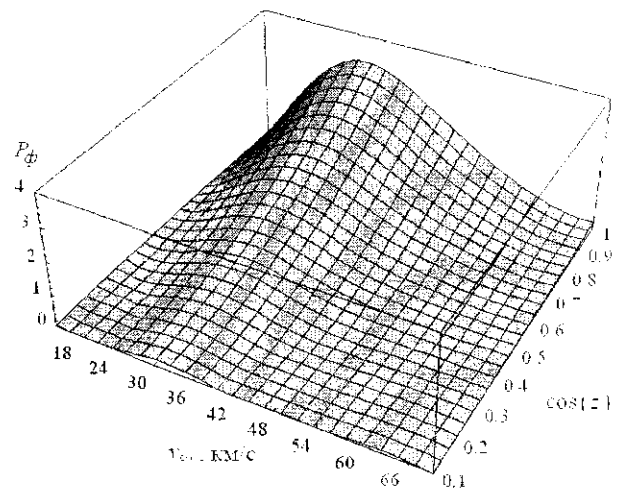


Рис.3

Следующим шагом в наших исследованиях стал расчет физического фактора замечаемости с учетом насыщенных метеорных следов как функции внеатмосферной скорости при заданном значении зенитного расстояния радианта (от 0.1 до 1.0 с шагом 0.05). В расчетах использовались параметры и модели метеорной зоны ионосферы, представленные в табл. 1. Таким образом, мы получили массив значений P_ϕ как функции указанных выше параметров радиометеоров. На рис. 3 приведен график рассчитанной зависимости $P_\phi(v_\infty, \cos(z))$. При расчетах физический фактор был пронормирован таким образом, что при $v_\infty = 40$ км/с и зенитном расстоянии радианта $\cos(z) = 0.666$ значение P_ϕ было равным единице.

Как видно из графика, приведенного на рис. 3, одномодальная зависимость физического фактора от внеатмосферной скорости сохраняется. С увеличением значения косинуса зенитного расстояния радианта наблюдается смещение максимума физического фактора в область быстрых метеоров. Кроме того, чем больше текущее значение $\cos(z)$ отличается от 0.666, тем более заметен и рост разности в значениях физического фактора для соответствующих зенитных расстояний радианта. Более наглядно данный процесс представлен на рис. 4. Здесь приве-

дены сечения функции $P_\phi(v_\infty, \cos(z))$ для нескольких значений зенитных расстояний радианта: $\cos(z) = 0.5$ – график 1, $\cos(z) = 0.666$ – график 2, $\cos(z) = 0.72$ (среднее значение по данным каталога ХНУРЭ) – график 3, $\cos(z) = 0.85$ – график 4 соответственно.

Как видим, значения физического фактора при одинаковых скоростях увеличиваются с ростом значения $\cos(z)$ практически на всем диапазоне изменения v_∞ . В области малых скоростей незначительное отличие значений P_ϕ при разных зенитных расстояниях радианта объясняется, на наш взгляд, сильной зависимостью эффективной электронной плотности вдоль метеорного следа, а значит и оценок P_ϕ [5], от коэффициента ионизации $\beta(v_\infty)$ и слабой зависимостью от остальных параметров.

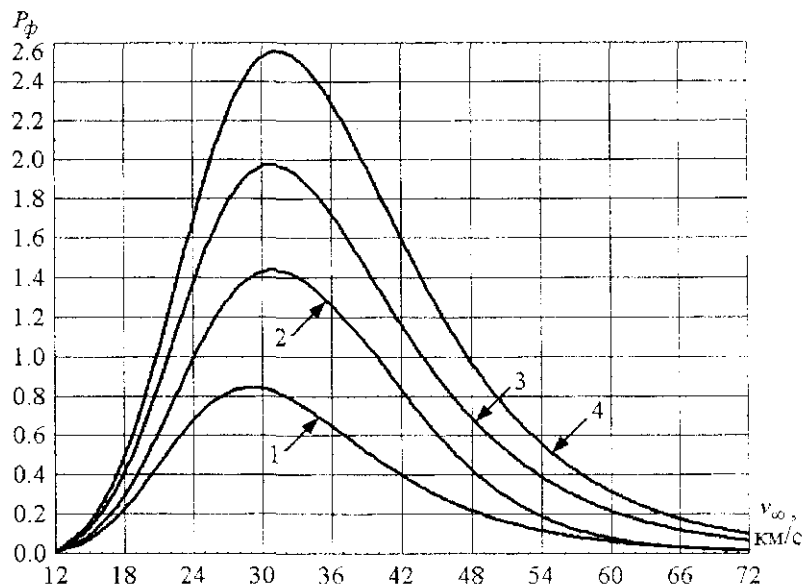


Рис.4

Из анализа графиков, приведенных на рис. 4, можно сделать вывод: учет зависимости физического фактора замечаемости от зенитного расстояния радианта существенным образом должен влиять на исправленные распределения параметров радиометеоров.

Учет зависимости физического фактора от зенитного расстояния радианта при построении исправленных за физический фактор замечаемости распределений параметров орбит радиометеоров

Приписывая каждому зарегистрированному метеору вес, равный P_ϕ^{-1} , можно перейти от распределений зарегистрированных радиометеоров к исправленным за физический фактор распределениям метеорных тел, пересекающих орбиту Земли.

Рассчитанные по предложенной в данной статье уточненной методике исправленные распределения параметров метеоров каталога ХНУРЭ (v_g – геоцентрическая скорость, v_h – гелиоцентрическая скорость, e – эксцентриситет, q – перигелийное расстояние, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, $\lambda' - \lambda_a$ – гелиоцентрическая долгота радианта, β' – гелиоцентрическая широта радианта) приведены на рис. 5 (графики 1). Для сравнения на рис. 5 (графики 2) приведены распределения параметров метеоров исследуемого каталога, но исправленные за физический фактор по (1), т.к. именно данная реализация P_ϕ использована в [4]. На графиках рис. 5 по оси ординат – количество орбит в процентах от общего объема выборки N , по оси абсцисс – параметр, по которому строится распределение. В табл. 2 приведены статистические характеристики исследуемых параметров орбит радиометеоров.

Проведем сравнительный анализ полученных распределений параметров радиометеоров, исправленных за физический фактор замечаемости. Отметим, что для построения истинных распределений необходим учет четырех факторов – аппаратного, физического, геометрического и астрономического, причем учет каждого из них существенно изменяет вид исходных распределений. Поэтому в данной статье не приводится астрономическая интерпретация рассчитанных зависимостей.

Геоцентрическая скорость. Распределение по модели [2] имеет 2 максимума в интервалах скоростей 20–25 км/с $N_{\max} \approx 0.7\%$ и 55–65 км/с $N_{\max} \approx 6.2\%$. В интервале скоростей 25–45 км/с наблюдаются незначительные вторичные максимумы. В распределении, изображенном на графике 1, также наблюдаются 2 максимума: первый из них (20–40 км/с) шире, чем для графика 2, и приблизительно в 2 раза больше – $N_{\max} \approx 1.5\%$. Второй максимум $N_{\max} \approx 5.1\%$ смещен в сторону меньших (50–60 км/с) скоростей. Отметим, что ввод зависимости физического фактора от зенитного расстояния радианта привел к заметному увеличению (примерно с 18 % до 38 %) вклада в общее распределение радиометеоров со скоростями 20 ÷ 50 км/с и соответственно уменьшению вклада более быстрых метеоров – с 78 % до 56 %.

Таблица 2

	Предлагаемая методика							
	v_g	v_h	e	q	i	ω	$\lambda' - \lambda_a$	β'
Среднее значение	47.3209	31.6369	0.5606	0.5701	109.6186	182.2543	195.0098	11.1900
Медианное значение	52.5200	32.1900	0.5920	0.5809	133.4900	185.3850	215.0359	11.0400
СКО	14.4569	5.6346	0.2547	0.2836	57.5813	106.4357	129.4561	32.3737
Коэффициент асимметрии	-0.7169	-0.6409	-0.2458	-0.1565	-0.7078	-0.0419	-0.1818	-0.1302
Коэффициент эксцесса	-0.6726	0.2896	-1.0484	-1.1631	-0.9964	-1.2855	-1.5229	-0.4566
	По модели физического фактора (1)							
	v_g	v_h	e	q	i	ω	$\lambda' - \lambda_a$	β'
Среднее значение	53.5602	32.7004	0.5211	0.6729	131.3509	185.5159	210.4848	18.4113
Медианное значение	57.3500	33.2800	0.5325	0.7203	146.3800	198.2500	297.7787	20.8300
СКО	12.8594	5.1939	0.2437	0.2560	46.0288	102.3353	142.3245	27.4575
Коэффициент асимметрии	-1.1540	-0.6318	-0.1067	-0.5818	-1.5618	-0.2199	-0.3975	-0.2700
Коэффициент эксцесса	1.6158	0.2168	-1.0397	-0.6906	1.4319	-1.1929	-1.6165	-0.2428

Гелиоцентрическая скорость. Обе модели дают примерно одинаковые распределения, что хорошо иллюстрируют данные из табл. 2. Отметим более острый максимум у графика 2, который приблизительно на полпроцента больше максимума графика 1.

Эксцентриситет орбит. Распределение по методике (1) имеет «трапециидальную форму» – рост при $e < 0.3$, практически неизменное значение в диапазоне $0.3 < e < 0.85$ и спад при $e > 0.85$. Использование предложенной методики расчета P_{ϕ} приводит к изменению вида распределения – увеличивается вклад орбит с большими эксцентриситетами (медианное значение 0.5325 против 0.5920 для модели (1)), также в диапазоне $0.6 < e < 0.9$ наблюдается максимум распределения.

Перигелийное расстояние. Распределение по методике (1) дает равномерный рост значения процента орбит N во всем диапазоне изменения перигелийного расстояния $q < 0.95$ и острый максимум $N_{\max} \approx 6.5\%$ при $q = 0.98$. Распределение перигелийных расстояний, изображенное на графике 1, несколько иное – для орбит метеоров, близких к круговым, также наблюдается рост процента орбит N , равномерное распределение в диапазоне $0.1 < q < 0.95$ – увеличение вклада орбит с $q < 0.5$. Как и для графика 2, при $q = 0.98$ имеем максимум распределения, однако приблизительно в 2 раза меньший.

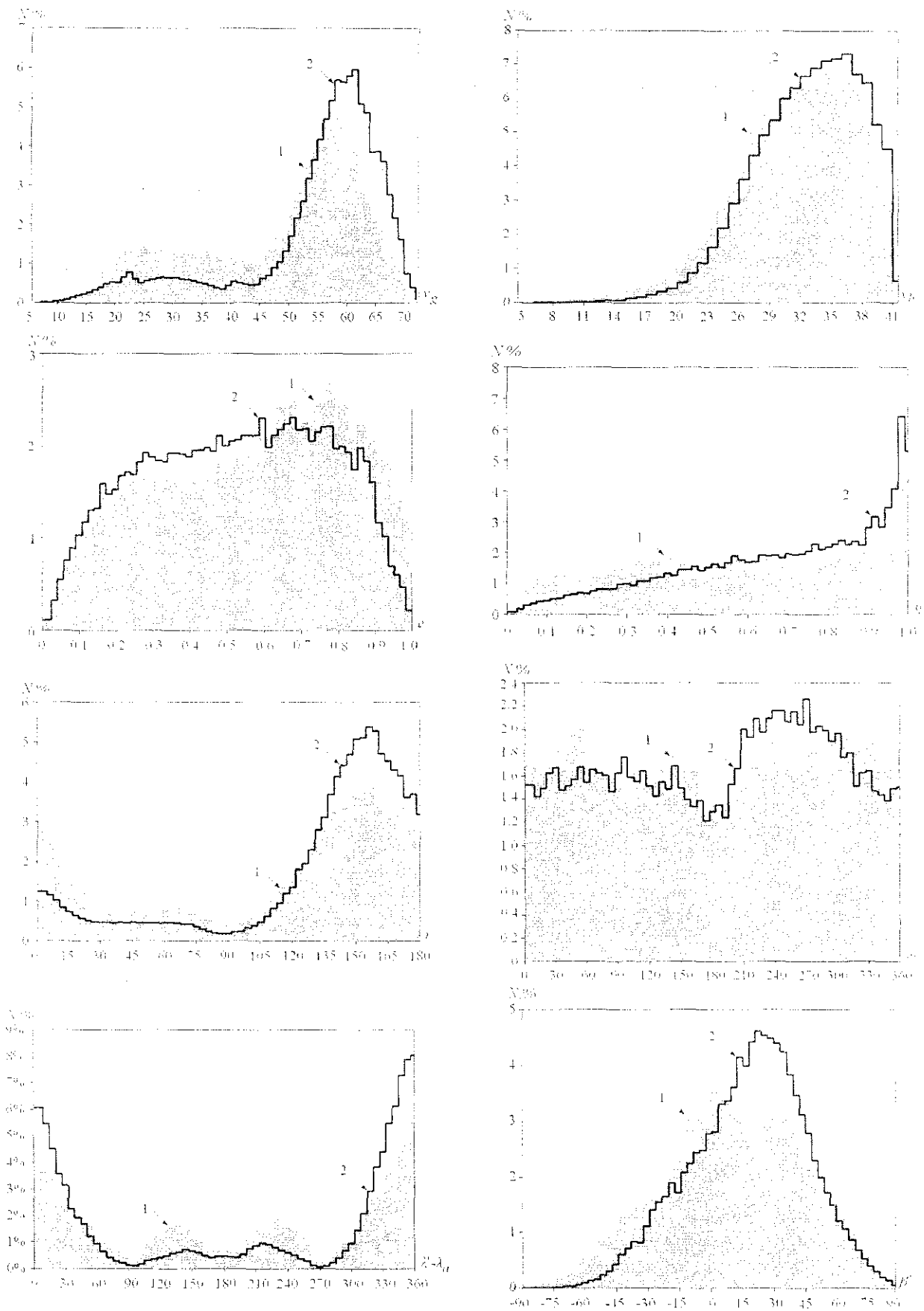


Рис. 5

Наклон орбит. Распределения метеороидов по наклонениям сходны по виду зависимости, однако довольно сильно различаются количественно. Для обоих распределений характерны 2 максимума – при значениях наклонения $i < 15^{\circ}$ и $140^{\circ} < i < 165^{\circ}$. Минимум обоих распределе-

ний соответствует наклонению $i = 90^0$. В распределении по модели (1) наблюдается рост количества метеоров области больших наклонов $i > 120^0$ – в данном диапазоне сосредоточено 75% всех исследуемых орбит против 57% для графика 1, и уменьшение вклада орбит с наклонами менее 90^0 – в данном диапазоне сосредоточено 16% всех орбит против 31% для графика 1.

Аргумент перигелия. Распределения по ω в сравнении с другими зависимостями, приведенными на рис. 5, практически равномерны – разность между максимальным и минимальным значениями N для обоих распределений не превосходит одного процента. В диапазоне аргументов перигелия $\omega < 180^0$ наблюдается небольшое преобладание орбит метеоров для графика 1, для остальных значений ω наблюдаются максимумы – для графика 2 в диапазоне $210^0 < \omega < 300^0$, для графика 1 максимум смещается в сторону больших аргументов перигелия $270^0 < \omega < 360^0$.

Гелиоцентрическая долгота. Для распределений по гелиоцентрической долготе $\lambda' - \lambda_a$, как и в случае наклона орбит, характерно сходство вида графиков и их количественное отличие. Во-первых, наблюдаются максимумы распределений для значений $\lambda' - \lambda_a < 30^0$ и $\lambda' - \lambda_a > 330^0$, в данных диапазонах гелиоцентрической долготы имеем преобладание орбит метеоров для модели (1) – 3% и 11% соответственно. Во-вторых, наблюдаются максимумы распределений для значений $110^0 < \lambda' - \lambda_a < 150^0$ и $210^0 < \lambda' - \lambda_a < 250^0$, в данных диапазонах гелиоцентрической долготы имеем преобладание орбит метеоров для предложенной методики оценки P_ϕ – 6% и 7% соответственно. Отметим также общее смещение количества орбит в распределении для графика 1 в область гелиоцентрических долгот менее 270^0 – медианное значение 215.0359 против 297.7787 для модели (1).

Гелиоцентрическая широта. Распределение по методике (1) имеет четко выраженный максимум в интервале $15^0 < \beta < 40^0$. Использование методики расчета P_ϕ приводит к изменению вида распределения – максимум распределения становится более широким и смещается в область $-10^0 < \beta < 10^0$. Кроме того, для графика 1 в диапазоне гелиоцентрических широт $\beta < 10^0$ наблюдается существенное увеличение (12%) количества орбит метеоров

Выводы

Применение предлагаемой методики учета физического фактора замечаемости как функции зенитного расстояния радианта, а также учет отражения радиоволн от насыщенных и ненасыщенных следов метеорных тел приводят к существенному изменению распределений параметров орбит метеороидов. Полученные результаты планируется в дальнейшем использовать для построения истинных распределений параметров орбит метеорных тел.

Список литературы: 1. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука. 1967. 260 с. 2. Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Учет влияния насыщенных метеорных следов на оценку физического фактора замечаемости // Радиотехника. 2006. Вып. 145. С. 71-75. 3. Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. К.: Наук. думка. 1989. 295 с. 4. Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. Сравнительный анализ некоторых статистических характеристик потоковых и спорадических метеорных тел // Астрономический вестник. 1996. Т. 30, № 6. М.: Наука. 1996. С. 90-110. 5. Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. Исследование физического фактора замечаемости // Радиотехника. 2005. Вып. 143. Харьков: ХНУРЭ.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 14.03.2007