

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ РАДИОМЕТЕОРОВ

Д.Ю. ГОРЕЛОВ, Ю.И. ВОЛОЩУК

Геометрический фактор замечаемости определяет вероятность регистрации наземными методами наблюдения метеорного тела с данными координатами и временем наблюдения, влетающего в атмосферу Земли. В данной статье приведен алгоритм расчета геометрического фактора как функции диаграммы направленности антенной системы РЛС и гелиоцентрических координат радиометеоров.

The geometrical factor of selectivity determines probability of registration by ground methods of supervising a meteoric body with the given coordinates and time of supervision flying in the Earth's atmosphere. The paper presents an algorithm of calculating the geometrical factor as the functions of the pattern of a radar antenna system and heliocentric coordinates of radiometeors.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения метеоров любым из наземных методов являются косвенными, т. е. 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.

Отличие видимых распределений параметров метеороидов в атмосфере Земли от истинных распределений в околоземном и, тем более, в межпланетном пространстве определяется тремя факторами: астрономическим, геометрическим и физическим. Астрономический фактор — вероятность встречи метеорных тел с Землей от параметров орбит, по которым они движутся. Геометрический фактор характеризует замечаемость метеоров с различными координатами радиантов, при вычислении которой учитывается геометрия отражения радиоволн от метеорных следов и диаграмма направленности антенной системы. Физический фактор характеризует замечаемость метеоров с различными скоростями, при вычислении которой учитывается зависимость коэффициента ионизации, высоты испарения и распределения ионизации вдоль следа метеора от скорости, зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты, а также зависимость начального радиуса следа от скорости и высоты.

При обработке полученных распределений параметров радиометеоров важную роль играет учет геометрического фактора замечаемости как функции, характеризующей метеорный след в атмосфере Земли, сигнал, отраженный от этого следа, а также зависящей от особенностей радиолокационной станции, на которой производятся радионаблюдения метеоров.

Теория геометрического фактора замечаемости была впервые разработана в [1]. Полученные оценки геометрического фактора используются исследователями метеоров до настоящего времени. Однако эти оценки устарели по многим причинам: расчеты производились на достаточно слабых ЭВМ; необходима адаптация вычислений к антенной системе конкретной РЛС; отсутствие общепризнанных моделей атмосферы в метеорной зоне и сигналов, отраженных от ионизированного следа.

Данная статья посвящена разработке алгоритма расчета геометрического фактора для современных РЛС с любыми параметрами.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ

Согласно условию зеркальности отражения радиоволн от ионизированного следа при заданном положении радианта метеорного потока на небесной сфере (азимута A и зенитного расстояния радианта z), следы метеоров потока могут отражать обратно к РЛС только радиоволны, излучаемые в эхо-плоскости — перпендикулярной направлению на радиант. Пересечение линии $K(\varphi, A)$ (нормированное произведение КНД передающей и приемной антенных систем) с эхо-плоскостью при условии $K(\varphi, A) = K_{\min}$ дает две точки, положение которых характеризуется координатами (φ, A) и горизонтальной дальностью $d = (A_1, \varphi_1, d_1)$ и (A_2, φ_2, d_2) . При наблюдении данного метеорного потока могут быть зарегистрированы только те метеоры, траектории которых пересекают участок горизонтальной поверхности, проведенной на высоте h_0 , который имеет форму трапеции со средней линией, соединяющей точки (A_1, φ_1, d_1) и (A_2, φ_2, d_2) , и высотой $l_0 \operatorname{cosec}(z)$ (где l_0 — средняя длина видимых участков следов метеорного потока).

Площадь трапеции или собирающая поверхность РЛС для данного положения радианта потока на небесной сфере [1]:

$$S(A, z) = \frac{l_0}{\sin(z)} \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - d_1 d_2 \cos(A_2 - A_1)}, \quad (1)$$

где z — зенитное расстояние радианта потока по отношению к линии отвеса в точке появления метеора.

В различных частях поля зрения РЛС предельные значения эффективной электронной плотности регистрируемых метеорных следов неодинаковы. Введем понятие эффективной собирающей поверхности РЛС для данного положения радианта потока:

$$S_{эфф}(A, z, v_\infty) = l_0 \frac{P_\Phi(v_\infty, z, \varphi_m, A_m)}{\sin(z)} \times \int_{(A_1, \varphi_1, d_1)}^{(A_2, \varphi_2, d_2)} \frac{ds}{P_\Phi[v_\infty, z, K(\varphi, A)]}, \quad (2)$$

где $P_\Phi(v_\infty, z, \varphi_m, A_m)$ — физический фактор для метеоров с данными внеатмосферной скоростью v_∞ и зенитным расстоянием радианта z , наблюдаемых в направлении максимального излучения [2]. Интеграл берется вдоль линии, соединяющей точки (A_1, φ_1, d_1) и (A_2, φ_2, d_2) .

Геометрический фактор замечаемости определяется выражением [1]:

$$P_r(\delta) = \int_0^{24^h} F(s) S_{эфф}(A, z, v_\infty) \cos(z) dt, \quad (3)$$

где s — звездное время; $F(s)$ — параметр, характеризующий прерывистость радионаблюдений метеоров; $F(s) = 1$ во время наблюдений и $F(s) = 0$ в перерывах; t — часовой угол радианта потока.

Зависимость (3) довольно сложная и предполагает использование численного интегрирования для расчета сперва оценок физического фактора, а затем и оценок геометрического фактора. Поэтому на практике процедура расчета геометрического фактора выглядит следующим образом.

1. По экспериментально снятым диаграммам направленности антенной системы РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскостях строится зависимость $\Phi(\varphi, A, R)$:

$$\Phi(\varphi, A, R) = K^2(\varphi, A) \cdot \left(\frac{R_m}{R} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где R_m — средняя дальность метеоров, регистрируемых в направлении максимума диаграммы направленности; R — средняя дальность метеоров, регистрируемая в направлении (φ, A) .

Задавая различные значения функции $\Phi(\varphi, A, R)$ (от 0 до 1), по выражению (4) находим совокупность точек (φ_i, A_i, R_i) , по которым можно построить контуры равной чувствительности на сферической поверхности, проведенной на сред-

ней высоте метеорных следов h_0 . Для удобства последующих расчетов эти контуры проецируются на горизонтальную плоскость, проведенную на высоте h_0 над точкой расположения РЛС (рис. 1). По оси ординат откладывается составляющая горизонтальной дальности, параллельная плоскости симметрии диаграммы направленности антенной системы РЛС; по оси абсцисс — поперечная составляющая горизонтальной дальности.

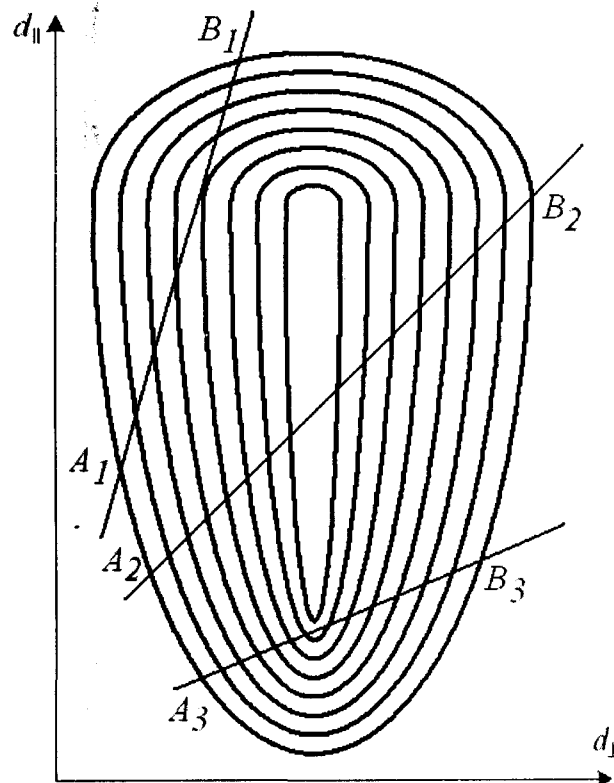


Рис. 1. Линии равной чувствительности

В случае регистрации метеора его траектория на плоскости равных значений $\Phi(\varphi, A)$ отображается в виде отрезка — средней линии трапеции, получаемой в результате пересечения траектории метеорного потока и участка горизонтальной поверхности, проведенной на высоте h_0 (линии A_1B_1 , A_2B_2 и A_3B_3 на рис. 1). Положение радианта потока на небесной сфере полностью определяется положением траектории метеора на плоскости $\Phi(\varphi, A)$.

2. Расчет эффективной собирающей поверхности антенны. Значение $S_{эфф}$ для данного положения радианта равно площади трапеции со средней линией AB и высотой $\Delta h_0 \operatorname{cosec}(z)$, где Δh_0 — средняя разность высот начала и конца видимого участка следа. Поскольку чувствительность вдоль линии AB непостоянна, то уменьшение численности зарегистрированных метеоров при увеличении предельного значения эффективной электронной плотности $\alpha_{эфф}^{\min}$ вдоль линии AB формально можно заменить соответствующим уменьшением собирающей поверхности при сохранении постоянного значения $\alpha_{эфф}^{\min}$. Экспериментальным путем [2]

было показано, что зависимость числа зарегистрированных метеоров от предельного значения $\alpha_{\text{эфф}}^{\min}$ можно аппроксимировать выражением:

$$N = \frac{\alpha_{\text{эфф}}^{\min}}{\alpha_{\text{эфф}}} = \frac{\alpha_{\text{эфф}}(\varphi_m, A_m)}{\alpha_{\text{эфф}}(\varphi, A)} = K(\varphi, A). \quad (5)$$

Поскольку величина $K(\varphi, A)$ меняется вдоль линии AB , то величину эффективной собирающей поверхности антенны можно вычислить интегрированием:

$$S_{\text{эфф}}(A, z) = \Delta h_0 \operatorname{cosec}(z) \int_A^B K(l) dl. \quad (6)$$

3. Расчет геометрического фактора замечаемости. Суточное вращение небесной сферы обуславливает непрерывное изменение значений часового угла t и горизонтальных координат A и z радианта, поэтому собирающая поверхность для метеоров данного потока также изменяется. Переходя от экваториальных координат радианта δ (склонения радианта) и t к горизонтальным координатам A и z , можно вычислить для любых значений δ зависимость $S_{\text{эфф}}(t)$ и величину:

$$P_r(\delta) = \int_{t_1}^{t_2} S_{\text{эфф}}(t) dt. \quad (7)$$

В общем случае P_r является функцией обеих координат радианта и времени наблюдения. Однако при круглосуточных наблюдениях величина интеграла (7) от α (восхождения радианта) не зависит и справедлива для любого дня наблюдений.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ КОМПЛЕКСА МАРС

Метеорная автоматическая радиолокационная система (МАРС) ХНУРЭ позволяет определять скорость и координаты радиантов индивидуальных метеоров импульсно-дифракционным методом. Система состоит из передающего пункта и трех разнесенных приемных пунктов. Направление излучения — на восток (астрономический азимут 270°). Основной приемный пункт совмещен с передающим, вынесенные приемно-ретранслирующие пункты расположены на расстояниях 4.32 км (азимут 214°) и 8.42 км (азимут 290°). Максимумы диаграмм направленности антенн выносных пунктов также направлены на восток. Основные антенны системы МАРС (передающая и приемная) углового типа длиной около 200 м, шириной около 200 м и высотой около 30 м. Излучатели — 20 синфазных биконических вибраторов, расположенных внутри углового рефлектора с углом раскрытия 60° . Такая система формирует диаграмму направленности шириной 5° в горизонтальной плоскости и 30° в вертикальной. Максимум излучения направлен под углом 45° к горизонту. Уро-

вень задних и боковых лепестков диаграммы направленности менее -20 дБ. На рис. 2, а и б приведены графики функции $K(\varphi, \alpha)$ комплекса МАРС в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно.

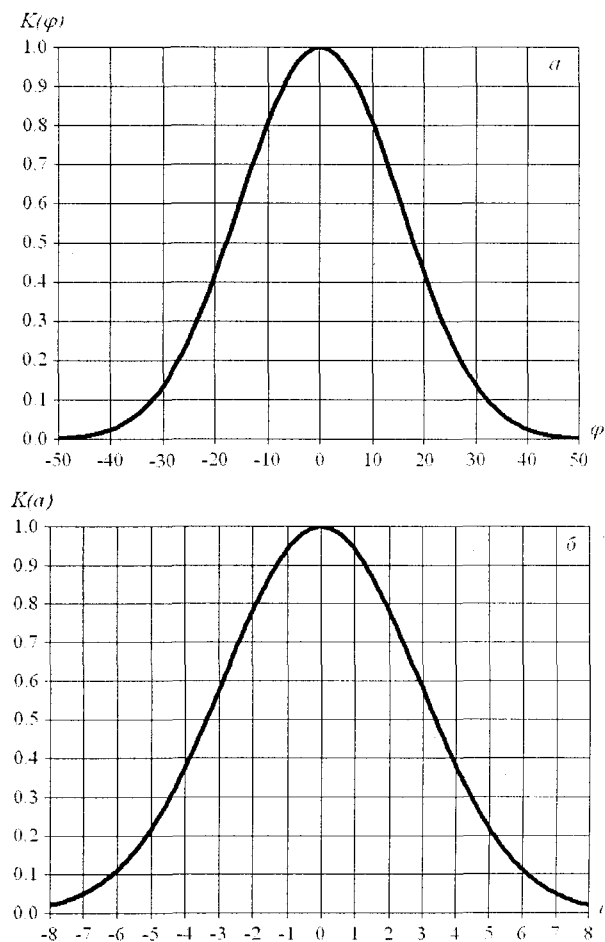


Рис. 2. Диаграммы направленности антенной системы комплекса МАРС

На рис. 3 приведен график геометрического фактора замечаемости метеорной автоматической системы МАРС [3] при круглосуточных наблюдениях метеоров с различными склонениями радиантов δ . Видно, что лучше всего наблюдаются метеоры, радианты которых имеют склонение 40° – 60° . Метеоры со склонением больше 75° и меньше -20° при построении истинных распределений радиометеоров посредством статистической обработки наблюдений включаются с высоким весом.

Стоит отметить, что зависимость (7) имеет два существенных недостатка: во-первых, в результате расчетов получаем оценки геометрического фактора замечаемости как функции склонения радианта δ . Наблюдаемые радианты в геоцентрической системе координат не могут представить реальное распределение орбит метеоров в пространстве. Зная распределение радиантов в гелиоцентрической системе координат ($\beta', \lambda' - \lambda_a$) и гелиоцентрическую скорость метеоров, можно судить о реальном распределении метеоров в пределах сол-

нечной системы. В геоцентрической системе координат, системе, непосредственно связанной с РЛС, истинное распределение радиантов искажено целым рядом кинематических и физических факторов, связанных с наличием атмосферы Земли, гравитационного притяжения, орбитального и вращательного движения Земли. Поэтому логичным при расчетах геометрического фактора будет выбрать именно систему $(\beta', \lambda' - \lambda_a)$, к тому же связанная с ней гелиоцентрическая скорость тоже меняется в гораздо меньших пределах, чем геоцентрическая. Во-вторых, геометрический фактор рассчитывается для случая наблюдением РЛС численности метеоров, что вносит погрешности при определении истинных распределений параметров орбит зарегистрированных метеоров.

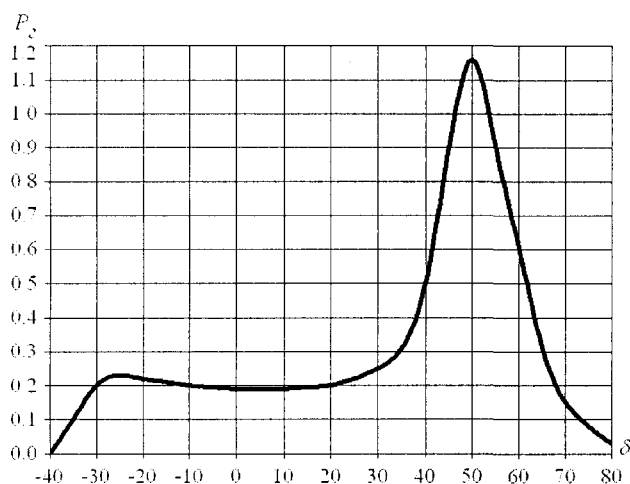


Рис. 3. Геометрический фактор замечаемости радиометеоров (7) для комплекса МАРС

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ КОМПЛЕКСА МАРС

1. Задаемся датой наблюдения метеора в формате: год (Y), порядковый номер дня в году (D), час (H) и минута (M).

2. Рассчитываем звездное время наблюдения метеора s :

$$s = \text{Angl} \left(\begin{matrix} c2(Y) + 0.017202124D + \\ + 0.26251H + 0.004375M \end{matrix} \right). \quad (8)$$

3. Рассчитываем долготу солнца в момент наблюдения метеора λ_h :

$$\lambda_h = \text{Angl} \left(\begin{matrix} 0.017202124D + 0.000716488H + \\ + 0.000011946M + 0.033423055 \times \\ \times \sin[0.0171775(D-3)] - c3(Y) \end{matrix} \right). \quad (9)$$

В выражениях (8) и (9) параметры $c2$ и $c3$ являются табличными и определяются годом наблюдения.

Функция Angl определяется следующим образом:

$$\text{Angl}(x) = \begin{cases} x, & \text{если } 0 \leq x \leq 2\pi \\ 2\pi \left\{ \frac{x}{2\pi} \right\}, & \text{если } x > 2\pi \\ 2\pi + 2\pi \left\{ \frac{x}{2\pi} \right\}, & \text{если } x < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\{x\}$ — дробная часть числа x .

4. Рассчитываем долготу апекса в момент наблюдения метеора λ_a :

$$\lambda_a = \text{Angl} \left(0.01672 \sin(\mu) + \lambda_h - \frac{\pi}{2} \right), \quad (11)$$

где $\mu = \lambda_h - 1.7864122 - 2.99614 \cdot 10^{-4} (Y - 1950)$.

5. Рассчитываем радиус-вектор орбиты Земли в момент наблюдения метеора R_e :

$$R_e = \frac{0.9997195}{1 - 0.01675 \cos(\mu)}. \quad (12)$$

6. Рассчитываем орбитальную скорость Земли в момент наблюдения метеора v_t :

$$v_t = 29.785 \sqrt{\frac{2}{R_e} - 1}. \quad (13)$$

7. Разбиваем сферу в координатах: долгота истинного радианта относительно апекса $\lambda' - \lambda_a$ — широта истинного радианта β' на N равных площадок. Для этого воспользуемся решением системы уравнений 1–3–5 распределения [4]:

$$\begin{cases} \beta'_k = (-1)^k \cos\left(\frac{k\pi}{2N+1}\right), & k = \overline{0, N}, j = \overline{0, 2k} \\ (\lambda' - \lambda_a)_{kj} = \frac{2\pi j}{2k+1} + \pi(\{2X1\} - 2\{X1\}) \end{cases}, \quad (14)$$

где $X1 = \frac{N-k+1}{4}$. В расчетах мы приняли N равным 39 и получили 1600 площадок.

8. Для каждого метеора на основе рассчитанной долготы апекса (пункт 4) и значений долготы и широты истинного радианта из каталога определяем наиболее «близкую» площадку из 1–3–5 распределения.

Далее рассмотрим алгоритм расчета геометрического фактора замечаемости для одного метеора. При расчете P_r для исследуемого каталога нижеследующую процедуру следует проводить с каждым метеором.

1. Задаемся рассчитанными значениями долготы апекса λ_a , орбитальной скорости Земли v_t и звездного времени s метеора. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ задаемся массивом значений гелиоцентрической скорости v_h , изменяющейся в диапазоне $5 \div 43$ км/с с шагом 0.1 км/с.

2. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений геоцентрической скорости v_g :

$$v_g = \sqrt{v_t^2 + v_h^2 + 2v_t v_h \cos(\beta') \cos(\lambda' - \lambda_a)}. \quad (15)$$

3. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений широты радианта β :

$$\beta = \arcsin\left(\frac{v_h \sin(\beta')}{v_g}\right). \quad (16)$$

4. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений долготы радианта λ :

$$\lambda = \text{Angl} \left[\lambda_a + \arctg 2 \left(\frac{\cos(\beta') \sin(\lambda' - \lambda_a)}{\frac{v_t}{v_h} + \cos(\beta') \cos(\lambda' - \lambda_a)} \right) \right]. \quad (17)$$

где функция $\arctg 2$ определяется следующим образом:

$$\arctg 2 \left(\frac{x}{y} \right) = \begin{cases} \arctg \left(\frac{x}{y} \right), & \text{если } y > 0 \\ \pi + \arctg \left(\frac{x}{y} \right), & \text{если } y < 0 \end{cases}. \quad (18)$$

5. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений склонения радианта:

$$\delta = \arcsin(\cos(\varepsilon) \sin(\beta) + \sin(\varepsilon) \cos(\beta) \cos(\lambda)), \quad (19)$$

где ε — угол наклона плоскости эклиптики к плоскости экватора, для комплекса МАРС имеем: $\cos(\varepsilon) = 0.917454$, $\sin(\varepsilon) = 0.397842$.

6. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений прямого восхождения радианта α :

$$\alpha = \arctg 2 \left(\frac{\cos(\varepsilon) \cos(\beta) \sin(\lambda) - \sin(\varepsilon) \sin(\beta)}{\cos(\beta) \cos(\lambda)} \right). \quad (20)$$

7. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений часового угла радианта t :

$$t = \text{Angl}(s - \alpha). \quad (21)$$

8. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений косинуса зенитного расстояния радианта $\cos(z)$:

$$\cos(z) = \begin{cases} \cos(z'), & \text{если } 0 \leq \cos(z') \leq 1 \\ 0, & \text{если } \cos(z') < 0 \text{ или } \cos(z') > 1 \end{cases} \quad (22)$$

$$\cos(z') = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(t),$$

где ϕ — геодезическая широта РЛС наблюдения радиометеоров, для комплекса МАРС имеем: $\cos(\phi) = 0.6505902$, $\sin(\phi) = 0.75942905$.

9. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений азимута радианта A :

$$A = \arctg 2 \left(\frac{\cos(\delta) \cos(t)}{\sin(\phi) \cos(\delta) \cos(t) - \cos(\phi) \sin(\delta)} \right). \quad (23)$$

10. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ рассчитываем массив значений угла места отражающей точки φ :

$$\varphi = \arctg[-\text{tg}(z) \cos(A - a)], \quad (24)$$

где a — азимут отражающей точки. С учетом малой ширины диаграммы направленности антенной системы комплекса МАРС в горизонтальной плоскости — порядка 5 градусов, можно заменить в выражении (24) возможный диапазон значений азимута отражающей точки значением $a = 270^\circ$ — направлением на максимум излучения. В итоге получим:

$$\varphi = [\text{tg}(z) \sin(A)]. \quad (25)$$

11. Разбиваем диаграмму направленности в вертикальной плоскости антенной системы МАРС на 20 диапазонов значения угла места отражающей точки φ и присваиваем каждому весовой множитель k (см. табл. 1).

Таблица 1

Диапазон	$\varphi_{\min}$	$\varphi_{\max}$	k
1	5	85	1.0000
2	7	83	1.4856
3	9	81	2.1471
4	11	79	3.0233
5	13	77	4.1527
6	15	75	5.5702
7	17	73	7.3035
8	19	71	9.3688
9	21	69	11.7670
10	23	67	14.4799
11	25	65	17.4681
12	27	63	20.6696
13	29	61	24.0009
14	31	59	27.3591
15	33	57	30.6271
16	35	55	33.6794
17	37	53	36.3901
18	39	51	38.6407
19	41	49	40.3288
20	43	47	41.3751

12. Для каждой из 1600 пар координат $(\beta'; \lambda' - \lambda_a)$ определяем, в какие из заданных диапазонов $\varphi_{\min} \div \varphi_{\max}$ может попасть угол места отражающей точки (пункт 18) и присваиваем весовой множитель: площадка «видна» для j -го диапазона — вес k_j из табл. 1, соответственно площадка «не видна» — вес $k_j = 0$. В итоге получаем суммарный вес k_{sum} по всем диапазонам $\varphi_{\min} \div \varphi_{\max}$ для каждой из площадок.

13. Рассчитываем геометрический фактор замечаемости для каждой из 1600 площадок:

$$P_{ri} = \frac{k_{sumi} \cdot N_1}{\sum k_{sumi}}, \quad (26)$$

где i — номер площадки; N_1 — суммарный вес по всем площадкам для первого диапазона $\varphi \in [5^\circ; 85^\circ]$; $\sum k_{sumi}$ — общий суммарный вес по всем площадкам.

14. По данным пункта 8 определяем значение геометрического фактора замечаемости для площадки с заданными в каталоге координатами.

15. Рассчитываем геометрический фактор для всего каталога радиометеоров.

Расчет геометрического фактора, как функции, пропорциональной области видимости метеора на сфере (β' ; $\lambda' - \lambda_a$) при заданных координатах гелиоцентрических долготы и широты метеороида, а также даты его наблюдения, имеет ряд преимуществ перед методикой (7). Во-первых, значение геометрического фактора (7) остается одинаковым при неизменных координатах радианта метеора. Иными словами, метеоры, имеющие различные гелиоцентрические координаты и скорость, наблюдаются одинаково, если их координаты радианта равны. В отличие от алгоритма (7) предложенный выше алгоритм исправляет этот факт.

На рис. 4 приведена зависимость рассчитанного нами геометрического фактора замечаемости от склонения радианта по данным каталога ХНУРЕ. Видно, что лучше всего наблюдаются метеоры, радианты которых имеют склонение $0^\circ \div 40^\circ$. Метеоры со склонением более 70° и меньше -20° практически не наблюдаются.

Если сравнить зависимости геометрического фактора по (7) и по (26), то можно сделать вывод, что при построении истинных распределений параметров орбит радиометеоров методикой, предлагаемой в [1], пользоваться не рекомендуется. Во-первых, геометрический фактор (7) рассчитывается из условия постоянства потока метеоров в суточном ходе. Данное предположение неверно, т. к. наблюдения метеоров показали, что максимум потока приходится на утренние часы (приблизительно 7–8 часов), минимум — на вечерние (приблизительно 19–20 часов). В остальное время суток наблюдаются локальные минимумы и максимумы. Во-вторых, при расчете геометрического фактора (7), используются параметры метеорной зоны атмосферы (коэффициент ионизации, коэффициент амбиполярной диффузии, начальный радиус метеорного следа, высота приведенной атмосферы), точных моделей которых не существует. В-третьих, при расчете геометрического фактора (7), проводятся расчеты без учета отражения радиоволн от ненасыщенных и переуплотненных метеорных следов, что характерно для определения плотности потока метеоров в точке наблюдения, а не для определения параметров орбит метеороидов.

Однако геометрический фактор (7) можно использовать, как средство верификации для рассчитанного нами геометрического фактора замечаемости. Для этого рассчитаем весовой множитель, учет которого позволит нам получить для данных каталога ХНУРЕ равномерное распределение численности метеоров в течение суток. Произведение данного весового множителя и рассчитанного нами геометрического фактора замечаемости должно позволить нам получить функцию $P_r(\delta)$, близкую к приведенной на рис. 4. Полученная зависимость приведена на рис. 5 (график 1). Для удобства на этом же рисунке приведен геометрический фактор по (7) (график 2). Как видно из графиков, приведенных на рис. 4 и 5, сравниваемые зависимости близки по виду, что говорит о достоверности полученных нами оценок геометрического фактора. Для графика 1 характерна более равномерная замечаемость метеоров с двумя максимумами при $\delta \approx 30^\circ$ и $\delta \approx 65^\circ$. Для графика 2 наблюдается один ярко выраженный максимум при $\delta \approx 55^\circ$. Кроме того, для графика 1 характерно много бо́льшая замечаемость метеоров с временем регистрации после 18 часов ($\delta > 65^\circ$).

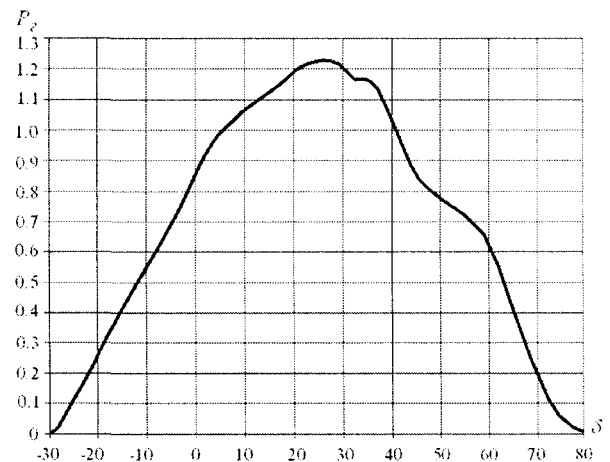


Рис. 4. Геометрический фактор замечаемости радиометеоров (26) для комплекса МАРС

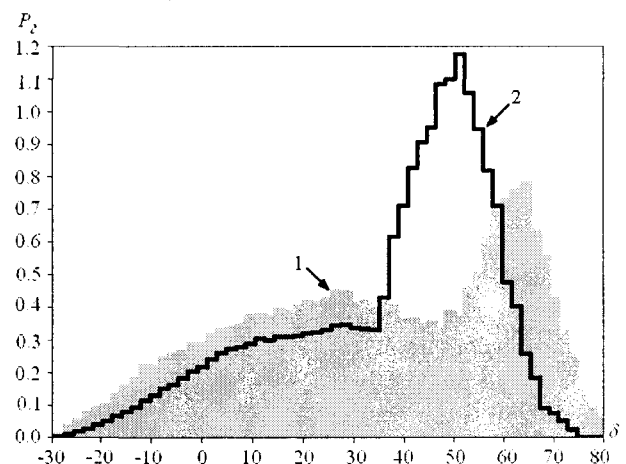


Рис. 5. Гистограммы склонений радианта, исправленные с учетом геометрического фактора замечаемости по (26) и (7)

УЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИСТИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАДИОМЕТЕОРОВ

Приписывая каждому зарегистрированному метеору вес, равный P_r^{-1} , можно перейти от распределений зарегистрированных радиометеоров к исправленным за геометрический 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, exc — эксцентриситет, q — перигелийное расстояние, i — наклонение, ω — аргумент перигелия, $\lambda' - \lambda_a$ — гелиоцентрическая долгота радианта, β' — гелиоцентрическая широта радианта) приведены на рис. 6 графики 1. Для сравнения на рис. 6 графики 2 приведены распределения параметров метеоров исследуемого каталога, исправленные за геометрический фактор (7). На графиках рис. 6 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 (среднее значение, СКО, мода и коэффициент асимметрии) 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 мы не будем приводить астрономическую интерпретацию рассчитанных зависимостей.

Геоцентрическая скорость. Оба распределения имеют 2 максимума в интервалах скоростей 25–35 км/с и 55–65 км/с. В распределении, изображенном на графике 1, рассматриваемые максимумы практически равноценны — $N_{\max} \approx 3\%$, в то время как для графика 2 имеем $N_{\max} \approx 3.6\%$ и $N_{\max} \approx 2.4\%$ соответственно. Отметим также, что учет геометрического фактора по (26) привел к заметному увеличению (примерно с 25 % до 36 %) вклада в общее распределение радиометеоров со скоростями более 50 км/с и соответственно уменьшению вклада более медленных метеоров — с 75 % до 64 %.

Гелиоцентрическая скорость. Обе модели дают примерно одинаковые распределения, что хорошо иллюстрируют данные из табл. 2. Отметим только незначительное смещение распределения на графике 1 в сторону быстрых метеоров, что привело к

увеличению на 6% вклада в общее распределение радиометеоров с гелиоцентрической скоростью $v_h > 36$ км/с.

Таблица 2

График 1				
	v_g	v_h	exc	q
Средн. знач.	41.9904	31.6656	0.5656	0.5787
СКО	13.9004	6.08682	0.2588	0.2857
Мода	25.9500	37.1600	0.3194	0.9663
Коеф. асим.	0.0184	-0.6410	-0.2602	-0.1144
	i	ω	$\lambda' - \lambda_a$	β'
Средн. знач.	89.4679	199.9758	215.8091	28.4079
СКО	54.7330	108.2876	106.4616	29.1488
Мода	158.5400	193.8200	342.6000	47.8200
Коеф. асим.	-0.03083	-0.3544	-0.4749	-0.4453
График 2				
	v_g	v_h	exc	q
Средн. знач.	37.2798	30.7892	0.6136	0.4826
СКО	13.0111	6.1104	0.2488	0.2846
Мода	23.2300	34.7300	0.7561	1.0010
Коеф. асим.	0.3646	-0.6528	-0.5452	0.2792
	i	ω	$\lambda' - \lambda_a$	β'
Средн. знач.	71.4814	184.1129	187.9359	21.4121
СКО	56.4729	112.6546	98.6347	29.2758
Мода	3.5600	334.1258	228.8100	2.6800
Коеф. асим.	0.4048	-0.06199	-0.09871	-0.1196

Эксцентриситет орбит. Оба распределения довольно сходны по виду: резкий рост значения N при $exc < 0.1$, плавный рост функции до $exc < 0.6$, резкий рост $0.6 < exc < 0.7$ до пологого максимума при $0.7 < exc < 0.9$ и резкий спад значения N для метеоров с высокоэллиптическими орбитами. Использование предложенной методики расчета P_r приводит к увеличению вклада в общее распределение орбит с эксцентриситетами $0.1 < exc < 0.6$ (примерно с 39% до 45%) и уменьшению вклада метеоров с эксцентриситетом $exc > 0.6$ — с 57% до 50%.

Перигелийное расстояние. График 2 представляет собой двумодальную функцию — основной вклад в распределение вносят метеоры с перигелийным расстоянием $0.1 < q < 0.3$ ($N_{\max} \approx 2.7\%$) и $q < 0.95$ ($N_{\max} \approx 3.5\%$). Распределение перигелийных расстояний, изображенное на графике 1, несколько иное — для орбит метеоров, у которых $q < 0.2$, наблюдается рост значения N , далее в диапазоне $0.2 < q < 0.9$ наблюдается фактически равномерное

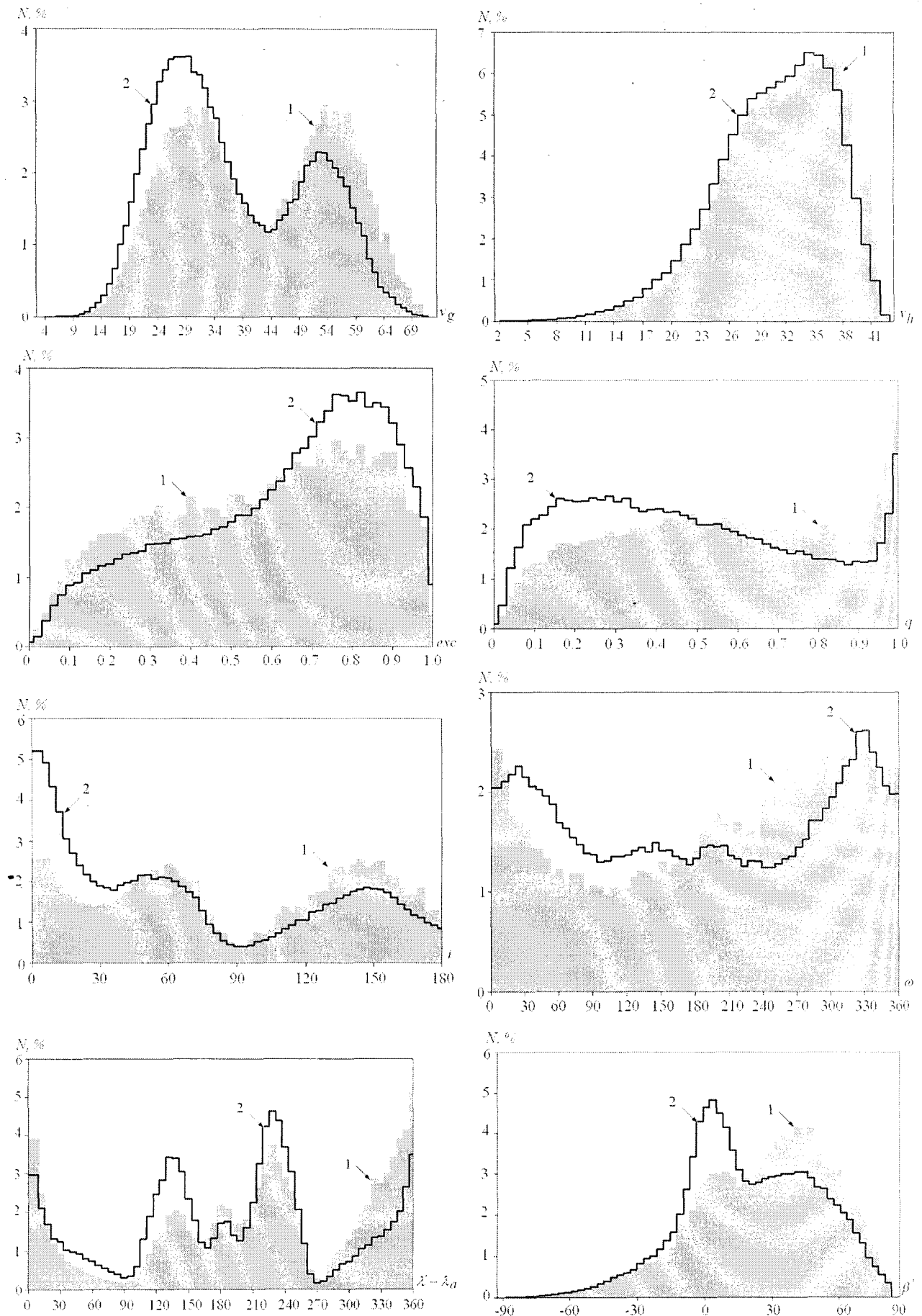


Рис. 6. Гистограммы параметров орбит радиометеоров, исправленные с учетом геометрического фактора замечаемости по (26) и (7)

распределение; при перигелийных расстояниях, близких к единице ($q > 0.95$), наблюдается максимум распределения $N_{\max} \approx 4.5\%$.

Наклон орбит. Распределения метеороидов по наклонениям сходны по виду зависимости, однако довольно сильно различаются количественно. Для обоих распределений характерны 3 максимума – при значениях наклонения $i < 15^\circ$ и $50^\circ < i < 70^\circ$ и $140^\circ < i < 170^\circ$. Минимум обоих распределений соответствует наклонению $i = 90^\circ$. В распределении по (26) наблюдается уменьшение количества метеоров в области малых наклонов $i < 50^\circ$ – в данном диапазоне сосредоточено 30% всех исследуемых орбит против 45% для графика 2, и увеличение вклада орбит с наклонами более 90° – в данном диапазоне сосредоточено 50% всех орбит против 35% для графика 2.

Аргумент перигелия. Распределения орбит метеоров по ω в сравнении с другими зависимостями, приведенными на рис. 6, максимально не совпадают. Для графика 1 наблюдаются 3 экстремума – острый пик при $\omega < 20^\circ$ ($N_{\max} \approx 2.5\%$), пологий максимум при $270^\circ < \omega < 360^\circ$ ($N_{\max} \approx 2.3\%$) и минимум при $\omega \approx 100^\circ$. Для графика 2 наблюдаются также два основных максимума при $20^\circ < \omega < 40^\circ$ ($N_{\max} \approx 2.2\%$) и $310^\circ < \omega < 340^\circ$ ($N_{\max} \approx 2.6\%$), в диапазоне $100^\circ < \omega < 240^\circ$ наблюдается практически равномерное распределение с двумя вторичными максимумами при $130^\circ < \omega < 160^\circ$ и $190^\circ < \omega < 220^\circ$ – оба $N_{\max} \approx 1.4\%$. В диапазоне аргументов перигелия $\omega > 180^\circ$ наблюдается преобладание орбит метеоров для графика 1 – 62% против 51% для графика 2.

Гелиоцентрическая долгота. Для распределений по гелиоцентрической долготе $\lambda' - \lambda_a$, как и в случае наклонения орбит, характерно сходство вида графиков и их количественное отличие. Во-первых, наблюдаются 3 максимума распределений для значений $\lambda' - \lambda_a < 30^\circ$, $\lambda' - \lambda_a > 330^\circ$ и $170^\circ < \lambda' - \lambda_a < 190^\circ$, в данных диапазонах гелиоцентрической долготы имеем преобладание орбит метеоров для графика 1 – 3.9%, 5.2%, 2.1% против 3%, 3.2% и 1.7% для графика 2 соответственно. Во-вторых, наблюдаются 2 максимума в распределениях гелиоцентрической долготы для значений $110^\circ < \lambda' - \lambda_a < 150^\circ$ и $210^\circ < \lambda' - \lambda_a < 250^\circ$, где имеем преобладание орбит метеоров для графика 2 – 3.6% и 4.8% против 2.1% и 3.8% для графика 1 соответственно. Отметим также общее смещение количества орбит в распределении для графика 1 в область гелиоцентрических долгот более 180° – медианное значение 215.8091 против 187.9359 для графика 2.

Гелиоцентрическая широта. Распределения имеют 2 четко выраженных максимума: основной – в интервалах $30^\circ < \beta < 50^\circ$ ($N_{\max} \approx 4\%$) для графика 1 и $10^\circ < \beta < 20^\circ$ ($N_{\max} \approx 5\%$) для графика 2; вторичный – в интервалах $10^\circ < \beta < 20^\circ$ ($N_{\max} \approx 3\%$) для графика 1 и $30^\circ < \beta < 50^\circ$ ($N_{\max} \approx 3\%$) для графика 2 соответственно. Отметим также, что использование предложенной методики расчета геометрического фактора замечаемости приводит к общему увеличению орбит с гелиоцентрической широтой $\beta < 20^\circ$ на 12% по сравнению с графиком 2.

ВЫВОДЫ

Применение предлагаемой методики учета геометрического фактора замечаемости, как функции диаграммы направленности антенной системы РЛС, геоцентрических координат ее положения и гелиоцентрических координат радиометеоров, приводит к существенному изменению распределений параметров орбит метеороидов. Полученные в статье результаты планируется в дальнейшем использовать для построения истинных распределений параметров орбит метеорных тел.

Литература.

- [1] Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Наука, 1967, — 260 с.
- [2] Ткачук А.А. Замечаемость слабых метеоров // Сб. «Проблемы космической физики», вып. 9. — К.: Вища школа, 1974. — С. 92-98.
- [3] Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. — К.: Наук. Думка, 1989. — 296 с.
- [4] Giacaglia G.E.O., Lundquist C.A. Sampling function for geophysics. — Smithson. Astrophys. Observ. Special Rep., 1972, № 344. — 95 p.

Поступила в редакцию 24.11.2006



Горелов Денис Юрьевич, ассистент кафедры ОРТ ХНУРЭ. Область научных интересов: радиоастрономия ближнего и дальнего космоса.



Волощук Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры СС ХНУРЭ. Область научных интересов: радиоастрономия ближнего и дальнего космоса.