УДК 551.510

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

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА АСТРОНОМИЧЕСКОГО ФАКТОРА ЗАМЕЧАЕМОСТИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ РАДИОМЕТЕОРОВ

Введение

В настоящее время большую научную ценность приобретает задача исследования эволюции метеорной составляющей в Солнечной системе, происхождения метеорных роев и их связей с возможными родительскими телами – кометными ядрами и астероидами. В решении данных вопросов неизменно присутствует задача определения истинных распределений элементов орбит метеорных тел.

При исследовании метеорных тел, не доступных для прямого изучения, используют косвенные методы наблюдений, в частности радиолокационный. При этом важное значение имеет учет различных видов селекций, искажающих наблюдательный материал и затрудняющих его правильную интерпретацию. Учет физического [1] и геометрического [2] факторов замечаемости позволяет перейти от полученной на РЛС совокупности параметров орбит зарегистрированных радиометеоров к геоцентрическому пространственному распределению метеорных тел. Чтобы получить оценки распределения метеорных тел в межпланетном пространстве, необходимо учесть вероятность встречи Землей метеорных тел, движущихся по различным орбитам вокруг Солнца – астрономический фактор замечаемости.

Стоит отметить, что замечаемость метеоров обуславливает наличие в видимых распределениях параметров орбит метеорных тел систематической ошибки, которую учесть путем увеличения объема выборки невозможно. Учет фактора замечаемости метеоров состоит в весовой обработке видимых распределений параметров орбит метеорных тел. В ходе данной операции каждому метеору необходимо приписать вес, равный обратному значению рассчитанного фактора замечаемости.

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

Расчет астрономического фактора замечаемости

Астрономический фактор замечаемости P_a обычно рассчитывается по формуле вероятности встречи метеорного тела с Землей, полученной Эпиком [3] с учетом изменения долготы восходящего узла и аргумента перигелия орбиты метеороида под действием возмущений со стороны планет:

$$P_a = \frac{R_{sc}^2 v_\infty^2}{\pi v_g \sin(i)} \sqrt{\frac{a}{2a-1-a^2\left(1-e^2\right)}} = \frac{R_{sc}^2 v_\infty^2}{\sqrt{2}\pi v_g \sin(i)} \sqrt{\frac{q+Q}{q+Q-1-q\cdot Q}}, \qquad (1)$$

где v_g – геоцентрическая скорость метеора; i, a, e, q, Q – наклонение, большая полуось, эксцентриситет, перигелийное и афелийное расстояние соответственно, $q = a(1-e)$, $Q = a(1+e)$, $2a = q+Q$; R_{sc} – радиус сферы захвата Земли, v_∞ – внеатмосферная скорость метеора. Астрономический фактор (1) рассчитан на одно обращение метеорного тела вокруг Солнца.

Выражение (1), как уже указывалось выше, определяет вероятность встречи метеорного тела с Землей, следовательно, оценки астрономического фактора P_a должны лежать в диапазоне $0 \le P_a \le 1$. В действительности же при наклонении $i = 0^0$ значение выражения (1) стремится к бесконечности и при достаточно малых i ее применять нельзя. Вторая особенность формулы Эпика возникает при равенстве перигелийного q (либо афелийного Q) расстояния единице, при этом в ноль обращается выражение $q+Q-1-q\cdot Q$. Следовательно, при значениях перигелийного или афелийного расстояний, близких к единице, формулу (1) также нельзя использовать. Кроме того, при обработке данных, полученных при наблюдениях метеоров возможна третья особенность формулы (1) – выражение $q+Q-1-q\cdot Q$ меньше нуля, что можно объяснить погрешностью наблюдений.

В настоящее время опубликовано много работ, в которых авторы развивают теорию астрономического фактора применительно к решению задач метеорной астрономии. В работе [4] формула Эпика для вероятности встречи представлена в виде

$$P_a=\left(\frac{\sigma_\infty}{\sigma_g}\cdot\frac{v_h}{v_g}\cdot\cos(\alpha)\sin(i)\right)^{-1}, \tag{2}$$

где α – угол между вектором скорости метеорного тела в точке, где оно пересекает сферу радиуса 1 а.е. с центром в Солнце, и радиусом-вектором; σ_∞ и σ_g – реальное и эффективное сечения Земли:

$$\cos(\alpha)=\sqrt{\frac{2a-1-a^2\left(1-e^2\right)}{2a-1}}=\sqrt{\frac{q+Q-1-q\cdot Q}{q+Q-1}}. \tag{3}$$

После преобразования потока метеорных тел в гравитационном поле Земли для вероятности встречи получаем выражение

$$P_a=\left(\frac{d\sigma_\infty}{d\sigma_g}\cdot\frac{v_h}{v_g}\cdot a^{3/2}\cdot\cos(\alpha)\sin(i)\right)^{-1}. \tag{4}$$

В формуле (4) вместо отношения площадок вводится отношение их дифференциалов, что соответствует реальному случаю, когда регистрация метеоров производится в очень малой, по сравнению с размерами Земли, площадке. Отношение $\dfrac{d\sigma_\infty}{d\sigma_g}$ получено в работе [5]:

$$\frac{d\sigma_\infty}{d\sigma_g}=\frac{4\left(\dfrac{v_\infty}{v_g}\cos(z)+1\right)\left(\dfrac{v_\infty}{v_g}+\cos(z)\right)}{\left(\dfrac{v_\infty^2}{v_g^2}+2\dfrac{v_\infty}{v_g}\cos(z)+1\right)^2}, \tag{5}$$

где z – видимое зенитное расстояние радианта.

В итоге получаем выражение для астрономического фактора замечаемости метеоров:

$$P_a=\frac{\left(\dfrac{v_\infty^2}{v_g^2}+2\dfrac{v_\infty}{v_g}\cos(z)+1\right)^2}{4\left(\dfrac{v_\infty}{v_g}\cos(z)+1\right)\left(\dfrac{v_\infty}{v_g}+\cos(z)\right)\cdot\dfrac{v_h}{v_g}\cdot a^{3/2}\cdot\cos(\alpha)\sin(i)}. \tag{6}$$

Данное выражение, как и формула Эпика, имеет особенности: при наклонении равном нулю или перигелийном (афелийном) расстоянии равном единице (3) значение астрономического фактора стремится к бесконечности, следовательно выражение (6) применять нежелательно.

В работе [6] дана физическая трактовка особенностей формулы (1) и получены выражения расчета вероятности пересечения метеорного тела с орбитой Земли в этих точках. Для случая малых значений наклонения

$$P_a=\frac{R_{sg}^2}{8\pi a^{3/2}}\frac{2-a^{-1}+\left[a\left(1-e^2\right)\right]^{1/2}\cos(i)}{\left[2-a^{-1}-a\left(1-e^2\right)\cos^2(i)\right]\left[2-a^{-1}\right]^{1/2}}. \tag{7}$$

Для случая касания орбиты метеорного тела с орбитой Земли в перигелии или афелии приводятся выражения:

$$
\begin{cases}
q \to 1 = 1 - \Delta r \\
Q \to 1 = 1 + \Delta r \;\Rightarrow P_a = \dfrac{\sqrt{2}R_{sc}^2\left(1 + 0.14\dfrac{R_{sc}^2}{\Delta r^2}\right)}{16\pi a^2\left[\Delta r \cdot e(1 \mp e)\right]^{1/2}} \dfrac{2 - a^{-1} + \left[a\left(1-e^2\right)\right]^{1/2}}{\left[2 - a^{-1} - a\left(1-e^2\right)\right]^{1/2}\left[2-a^{-1}\right]^{1/2}} \\
\Delta r > R_{sc}
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
q \to 1 = 1 - \Delta r \\
Q \to 1 = 1 + \Delta r \;\Rightarrow P_a = \dfrac{\sqrt{2}R_{sc}^{3/2}\left[1 + \dfrac{\Delta r}{R_{sc}}\right]^{1/2}}{16\pi a^2\left[e(1 \mp e)\right]^{1/2}} \dfrac{2 - a^{-1} + \left[a\left(1-e^2\right)\right]^{1/2}}{\left[2 - a^{-1} - a\left(1-e^2\right)\right]^{1/2}\left[2-a^{-1}\right]^{1/2}} \\
\Delta r < R_{sc}
\end{cases} \tag{8}
$$

В формулах (8) верхние знаки соответствуют случаю касания орбит в перигелии, нижние – в афелии.

Выражения (7) – (8) имеют три существенных недостатка: во-первых, астрономический фактор рассчитывается как вероятность столкновения метеорного тела с Землей без учета малых размеров и места положения площадки регистрации метеорных тел; во-вторых, данные выражения не учитывают эллиптичности орбиты Земли, следовательно при наблюдениях метеоров возможны случаи, когда значения перигелийного расстояния будут стремится к единице, но превышать на малую величину ($q \to 1 = 1 + \Delta r$), либо, наоборот, афелийные расстояния будут стремится к единице, но меньше малую величину ($Q \to 1 = 1 - \Delta r$). В-третьих, погрешность расчета значения перигелия (либо афелия) по данным радиолокационных наблюдений в случае $q \to 1$ ($Q \to 1$) сопоставима с величиной Δr и выражение (8) использовать не рекомендуется.

Новый метод расчета астрономического фактора замечаемости метеоров для радионаблюдений

Использование для расчета астрономического фактора формул вероятности встречи метеорного тела с Землей, как было отмечено выше, вносит существенные погрешности в рассчитанные оценки астрономического фактора замечаемости радиометеоров. Следовательно, перед нами стоит задача разработки методики расчета P_a с учетом двух требований: во-первых, нужно ввести зависимость оценок астрономического фактора от координат РЛС (условия видимости метеора с данной орбитой неодинаковы в различных пунктах Земли); во-вторых, полученные соотношения не должны содержать особых точек.

Известно [Лебединец, Кощеев, Лагутин], что астрономический фактор замечаемости оказывает сравнительно слабое влияние на распределение больших полуосей орбит метеорных тел, следовательно, и на распределение их гелиоцентрических скоростей. Последнее утверждение верно, если пренебречь эллиптичностью орбиты Земли, тогда большая полуось и гелиоцентрическая скорость метеорного тела связаны соотношением

$$
v_h = 29.785\sqrt{2 - \frac{1}{a}}. \tag{9}
$$

Положение метеороида в Солнечной системе можно задать тремя параметрами: гелиоцентрическими координатами (долгота истинного радианта относительно апекса $\lambda' - \lambda_a$, широта истинного радианта β'), а также величиной его гелиоцентрической скорости. В таком случае астрономическая селекция для данного метеороида, т.е. с заданными координатами

$(\lambda' - \lambda_a, \beta')$, определяется диапазоном возможных значений $v_h \in \left[v_{h\min}, v_{h\max}\right]$, при которых происходит выпадение метеорного тела на поверхность Земли. Следовательно, астрономический фактор замечаемости радиометеора можно рассчитать как вероятность принятия значений $\left[v_{h\min}, v_{h\max}\right]$ в распределении гелиоцентрических скоростей, исправленному с учетом физического и геометрического факторов замечаемости (см. рис. 1).

На рисунке приведено исправленное распределение гелиоцентрических скоростей для радиометеоров, наблюдавшихся в 1972 – 1978 годах на комплексе МАРС.

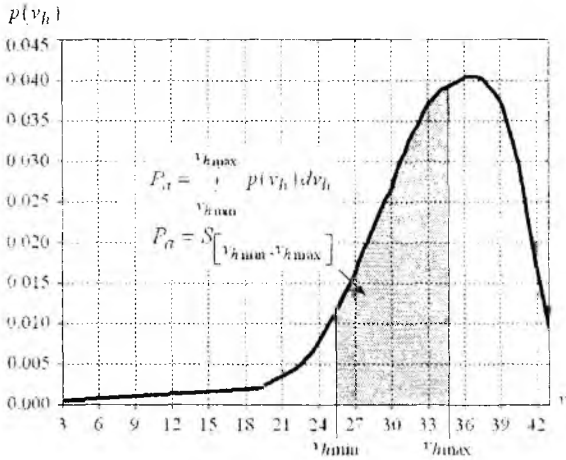

Рис. 1

Предлагаемая методика позволяет получить оценки астрономического фактора в диапазоне $[0,1]$ без особых точек. Учет физического и геометрического факторов в распределении гелиоцентрических скоростей позволяет привести данные оценки P_a к геоцентрическим координатам РЛС и условиям наблюдений метеорных тел – заданным энергетическим параметрам и форме диаграммы направленности антенной системы РЛС.

Методика расчета астрономического фактора замечаемости

1. Рассчитать звездное время наблюдения метеора s:

$$s = \mathrm{Angl}\left(c2(Y) + 0.017202124D + 0.262516171H + 0.0043752696M\right), \tag{10}$$

где Y, D, H, M – год, порядковый номер дня в году, час и минута момента наблюдения метеора соответственно.

2. Рассчитать долготу солнца в момент наблюдения метеора λ_h:

$$\lambda_h = \mathrm{Angl}\begin{pmatrix} 0.017202124D + 0.000716488H + 0.000011946M + \\ +0.033423055\sin\left[0.0171775(D-3)\right] - c3(Y) \end{pmatrix}. \tag{11}$$

В выражениях (10) и (11) параметры $c2$ и $c3$ являются табличными и определяются годом наблюдения.

Функция Angl определяется следующим образом:

$$\mathrm{Angl}(x) = \begin{vmatrix} x, \text{ если } 0 \le x \le 2\pi \\ 2\pi\left\{\dfrac{x}{2\pi}\right\}, \text{ если } x > 2\pi \\ 2\pi + 2\pi\left\{\dfrac{x}{2\pi}\right\}, \text{ если } x < 0 \end{vmatrix}, \quad \{x\} \text{ – дробная часть числа } x. \tag{12}$$

3. Рассчитать долготу апекса в момент наблюдения метеора λ_a:

$$\lambda_a = \mathrm{Angl}\left(\lambda_h - \frac{\pi}{2} + 0.01672\sin\left(\lambda_h - 1.7864122 - 2.99614\cdot 10^{-4}(Y-1950)\right)\right). \tag{13}$$

4. Рассчитать радиус-вектор орбиты Земли в момент наблюдения метеора R_e:

$$R_e = \frac{0.9997195}{1 - 0.01675\cos\left(\lambda_h - 1.7864122 - 2.99614\cdot 10^{-4}(Y-1950)\right)}. \tag{14}$$

5. Рассчитать орбитальную скорость Земли в момент наблюдения метеора v_t:

$$v_t = 29.785\sqrt{\frac{2}{R_e} - 1}. \tag{15}$$

6. Рассчитать для заданных гелиоцентрических координат радиометеора $(\lambda' - \lambda_a, \beta')$ массив значений геоцентрической скорости $v_g(v_h)$ (v_h изменяется в пределах от 5 до 43 *км/с* с шагом 0.01 *км/с*):

$$v_g(v_h) = \sqrt{v_t^2 + v_h^2 + 2v_t v_h \cos(\beta')\cos(\lambda' - \lambda_a)}. \tag{16}$$

7. Рассчитать массив значений широты радианта $\beta(v_h)$:

$$\beta(v_h) = \arcsin\left(\frac{v_h}{v_g}\sin(\beta')\right). \tag{17}$$

8. Рассчитать массив значений долготы радианта $\lambda(v_h)$:

$$\lambda(v_h) = \mathrm{Angl}\left[\lambda_a + \mathrm{arctg}\,2\left(\frac{\cos(\beta')\sin(\lambda' - \lambda_a)}{\frac{v_t}{v_h} + \cos(\beta')\cos(\lambda' - \lambda_a)}\right)\right], \tag{18}$$

где функция $\mathrm{arctg}\,2$ определяется следующим образом:

$$\mathrm{arctg}\,2\left(\frac{x}{y}\right) = \begin{cases} \mathrm{arctg}\left(\frac{x}{y}\right), \text{ если } y > 0 \\ \pi + \mathrm{arctg}\left(\frac{x}{y}\right), \text{ если } y < 0 \end{cases}. \tag{19}$$

9. Рассчитать массив значений склонения радианта $\delta(v_h)$:

$$\delta(v_h) = \arcsin\big(\cos(\varepsilon)\sin(\beta(v_h)) + \sin(\varepsilon)\cos(\beta(v_h))\cos(\lambda(v_h))\big), \tag{20}$$

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

10. Рассчитать массив значений прямого восхождения радианта $\alpha(v_h)$:

$$\alpha(v_h) = \mathrm{arctg}\,2\left(\frac{\cos(\varepsilon)\cos(\beta(v_h))\sin(\lambda(v_h)) - \sin(\varepsilon)\sin(\beta(v_h))}{\cos(\beta(v_h))\cos(\lambda(v_h))}\right). \tag{21}$$

11. Рассчитать массив значений косинуса зенитного расстояния радианта $\cos(z(v_h))$:

$$\cos(z(v_h)) = \sin(\phi)\sin(\delta(v_h)) + \cos(\phi)\cos\big(\mathrm{Angl}(s - \alpha(v_h))\big), \tag{22}$$

где ϕ – геодезическая широта РЛС наблюдения радиометеоров, для комплекса МАРС имеем: $\cos(\phi) = 0.65059$, $\sin(\phi) = 0.759429$.

12. Определить диапазон гелиоцентрических скоростей метеорного тела $\left[v_{h\min}, v_{h\max}\right]$, в котором значение косинуса зенитного расстояния радианта лежит в диапазоне $[0;1]$.

13. Определить значение астрономического фактора замечаемости, как вероятность, с которой гелиоцентрическая скорость попадает в диапазон $\left[v_{h\min}, v_{h\max}\right]$.

14. Выполнить пункты 1 – 13 для каждого метеора.

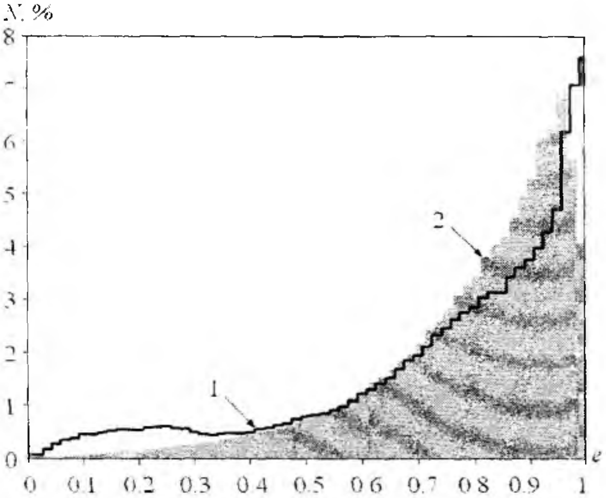

Рис. 2

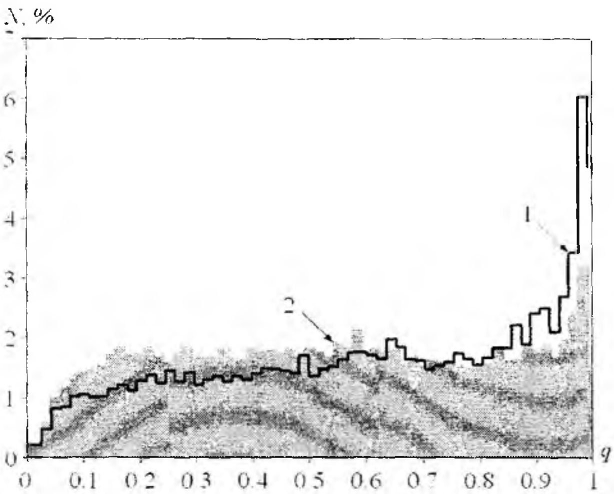

Рис. 3

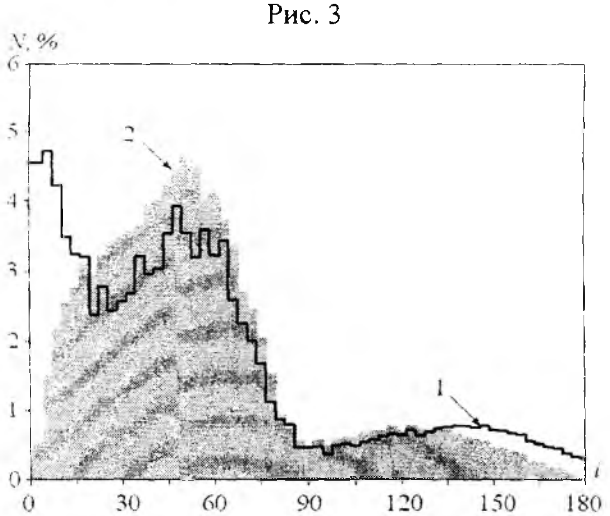

Рис. 4

Чтобы перейти от видимых распределений параметров орбит зарегистрированных радиометеоров к исправленным за астрономический фактор распределениям необходимо приписать каждому метеору вес, равный $P_a^{-1}a^{3/2}$. Множитель $a^{3/2}$ приводит все оценки P_a^{-1} к одному масштабу времени (одному году). Рассчитанные по предложенной в данной статье методике исправленные распределения параметров орбит метеоров (около 156000) каталога ХНУРЭ: e – эксцентриситет, q – перигелийное расстояние, i – наклонение; приведены на рис. 2, 3 и 4 графике 1 соответственно.

В настоящее время формула Эпика время является безальтернативной, и большинство разработанных ныне методик расчета астрономического фактора являются лишь модификациями выражения (1), следовательно, для сравнения на рис. 2, 3 и 4 графики 2 приведены распределения параметров орбит метеоров исследуемого каталога, но исправленные за астрономический фактор по (1). Отметим, что в расчетах участвовало 145000 орбит. Для остальных 11000 орбит получить оценки P_a невозможно, т.к. выражение $q+Q-1-q\cdot Q$ меньше нуля. На графиках рис. 2, 3 и 4 по оси ординат – количество орбит в процентах от общего объема выборки N, по оси абсцисс – параметр, по которому строится распределение.

Следует отметить, что полученные распределения параметров орбит метеорных тел довольно сильно сходны, как качественно, так и количественно. Наблюдаемые различия в распределениях определяются только особенностями формулы Эпика – при стремлении перигелийного (афелийного) расстояния к единице, либо наклонения к нулю (или 180^0) значение P_a^{-1} стремиться к нулю, следовательно, такие метеорные тела в исправленном распределении будут участвовать с весом близким к нулю.

Данный эффект мы наблюдаем на рис. 2 ($Q\to 1$) для малых значений эксцентриситета, рис. 3 ($q\to 1$) и рис. 4 ($i\to 0^0\left(180^0\right)$), графики 2, где наблюдается резкий спад значения N в распределениях параметров орбит в областях, соответствующих особым точкам выражения

(1). Для графиков 1, как и ожидалось, в данных областях характерен рост значения числа орбит N. Кроме того, в отличие от формулы Эпика (где выражение $q+Q-1-q\cdot Q<0$), предложенная нами методика расчета астрономического фактора позволяет получить оценки P_a для орбит метеоров близких к гиперболическим (рис. 2 $e\to 1$).

Выводы

Применение предложенной в статье методики учета астрономического фактора замечаемости позволяет получить оценки P_a, свободные от особых точек во всем диапазоне изменения значений параметров орбит радиометеоров – большой полуоси, эксцентриситета и наклонения. Полученные в статье результаты планируется в дальнейшем использовать для построения истинных распределений параметров орбит метеорных тел.

Список литературы: 1. *Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И.* Уточнение методики учета физического фактора замечаемости при построении истинных распределений параметров радиометеоров // Радиотехника. 2007. Вып. 149. С. 62-68. 2. *Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И.* Оценка геометрического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т. 5, №4. С. 519-527. 3. *Öpik E.* Collision probabilities with the planet and the distribution of interplanetary matter // Proc. Roy. Irish. Acad. 1951. N 12. P. 165-169. 4. *Белькович О.И.* Астрономическая селекция при наблюдениях метеоров и методы ее учета // Астрон. вестн. 1983. 17, №2. С. 108-115. 5. *Андреев Г.В., Бабаджанов П.Б.* Влияние гравитационного поля Земли на структурные характеристики метеорных потоков // Докл. АН ТаджССР. 1981. 24, №9. С. 189-193.6. *Бронштэн В.А.* К вопросу об учете астрономической селекции при обработке наблюдений метеоров // Астрон. вестн. 1983. 17, №3. С. 175-181.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 28.10.2007