

УДК 523.503+531.42+523.53

О МАССЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАДИО-ОПТИЧЕСКИХ СЛАБЫХ МЕТЕОРОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ НА ВЫСОТЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Нарзиев М., Худжаназаров Х. Ф.

ABOUT MASS OF PARALLEL RADIO-OPTICAL FAINT METEORS BASED
ON THE INTENSITY OF LUMINOUS AND IONIZATION AT THE HEIGHT
OF A MIRROR POINT

Narziev M., Khujanazarov H. F.

Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, 734042, Tajikistan
e-mail: mirhusseyn_narzi@mail.ru, habibjon_2012@mail.ru

Abstract. Using results of the simultaneous optical and radar observation of 59 faint meteors with star magnitudes in an interval $0^m \div + 8^m$, on the basis of the measured a luminous intensity, value of linear electronic density for mirror-reflecting points and such parameters of an atmospheric trajectory as velocity, zenith angle of radiant, heights of homogeneous atmosphere photographic and radar mass of the same meteors are computed, which are in the satisfactory consent among themselves.

Keywords: luminous efficiency and ionization coefficient, photometric, ionization, mass, magnitude, linear electron density.

Всем известно, какую важность представляют данные о массах метеороидов. Необходимо отметить, что без правильной и надежной редукиции значения масс метеороидов невозможно решение таких важных задач метеорной астрономии, как определение параметра распределения метеорных тел по массам S , оценка притока метеорного вещества и плотности падающего потока на Землю, изучение структуры, возраста и происхождения метеорных тел и т.д. Данные о массе метеороидов представляют также интерес в таких отраслях науки как геофизика, радиофизика, космонавтика, космогония Солнечной системы, решение ряда теоретических и прикладных задач и т.д. Для решения этих вопросов особую ценность представляют результаты радиолокационных наблюдений метеоров, получаемые круглосуточно и независимо от погодных условиях. Однако для исследования параметра распределения метеорных тел по массам, изучения притока метеорного вещества на Землю и оценки плотности падающего потока в основном используют результаты круглосуточных радиолокационных наблюде-

ний метеоров с одного пункта. Полученные при этом данные, как правило, относятся к одной зеркальной точке индивидуального метеора.

Обычно для решения вышеизложенных задач, допускается, что высота зеркальной точки совпадает с высотой максимума ионизации и, исходя из этого, вычисляется масса метеороида по результатам радионаблюдений метеоров, полученных с одного пункта. Для убеждения в достоверности полученных таких результатов, повышения точности и надежности измерения данных радионаблюдений, получаемых с одного пункта, необходимо их калибровать с оптическими результатами, которые имеют относительно высокую точность. Такая калибровка осуществляется путем определения шкалы масс (зависимость коэффициента ионизации от скорости) радиометеоров относительно шкалы масс (скоростная зависимость коэффициента свечения) фотографических метеоров. Вычисление фотометрической и радиолокационной массы по интенсивности свечения и ионизации для зеркальной точки и сопоставление этих данных с

Нарзиев Мирхусен, канд. физ-мат. наук, старший научный сотрудник отдела Межпланетных тел Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: mirhusseyn_narzi@mail.ru.

Худжаназаров Хабибджон Файзалиевич, старший лаборанта отдела Межпланетных тел Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: habibjon_2012@mail.ru.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра Т-2113.

массами, вычисленными путем интегрирования кривой свечения метеора является целью настоящей работы.

Для этого вначале вкратце остановимся на результатах определения шкалы масс метеоров по результатам комбинированных наблюдений. Первая работа определения шкалы масс принадлежит Дэвису и Холлу [1], где авторы на основе данных 7 фоторадиолокационных метеоров, средняя скорость которых составляла 32 км/с, вычислили коэффициент ионизации. Несколько позже Бабаджанов, используя данные параллельных фото- и радиолокационных наблюдений метеоров в ГисАО и данные совместных фото- и радиолокационных наблюдений метеоров в Джодрелл Бэнке [1], для двух групп метеоров по скоростям: 1) $V = 32$ км/с 2) $V = 64$ км/с вычислил коэффициент ионизации [2]. Однако коэффициент ионизации для интервала скоростей 11 ÷ 30 км/с на основе данных параллельных оптических и радиолокационных наблюдений не был исследован.

Учитывая это обстоятельство, несколько позже в [3] на базе данных комбинированных фото- и радиолокационных и радио- и телевизионных наблюдений в для метеоров слабее 0^m вычислен коэффициент ионизации для широкого диапазона метеорных скоростей. Полученные результаты удовлетворительно согласовались со второй моделью, рассчитанной Тохтасьевым [4].

Первая попытка определения масс одних и тех же метеоров по данным одновременных оптических и радиолокационных наблюдений метеоров впервые была выполнена в [3]. При этом для расчета фотометрической и радиолокационной массы метеоров из данных, опубликованных в работах [5–8], использованы только те метеоры, у которых высоты максимума ионизации совпали или были расположены близко к высоте максимума блеска метеоров. Спустя несколько лет в работе [9] расчет фотометрической и ионизационной масс метеороидов осуществлялся с использованием различных шкал масс. Причем фотометрическая масса m_{ph} определялась: а) путем интегрирования кривой свечения и б) по величине интенсивности свечения на высоте максимальной яркости m_{ph} , а радиолокационная масса m_r по величине максимальной линейной электронной плотности с использованием шкалы масс, полученной в [3], и принятой в Обнинском совещании. Показано,

что наилучшее согласие между массами m_{ph} и m_r наблюдается при использовании шкалы масс $\beta \sim f(v)$, полученной автором в [3]. При этом было обнаружено, что при переходе к метеорам ярче 0^m различия между фотографическими и радиолокационными массами увеличивается.

Несколько позже Камбелл–Броун и др. [10] на основе данных одновременных наблюдений метеоров с EISCAT UHF системы с узким полем зрения и двух станций видео наблюдений с гибридными камерами (снабженными усилителями яркости), получены четыре совместных метеора, зарегистрированных на всех трех радиолокационных приемниках и двух видео камерах. Эти данные позволяли для каждого метеора вычислить фотометрические и радиолокационные массы метеоров с использованием нескольких значений коэффициента свечения и ионизации. Показано, что у всех совместных метеоров фотометрическая и радиолокационная массы совпадают с точностью до предполагаемой ошибки в методах наблюдений и погрешности определения коэффициентов свечения и ионизации.

Таким образом, масса одного и того же метеора в области яркости $+0^m \div +8^m$ по результатам одновременных оптических и радиолокационных измерений интенсивности свечения и величины линейной электронной плотности изучена недостаточно.

Для вычисления фотометрической и радиолокационной масс одних и тех же метеоров по величинам интенсивности свечения и значения линейной электронной плотности зеркально-отражающей точки следа метеоров и сопоставления полученных результатов между собой нами использованы результаты совместных теле- и радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане и США [6–8]. При этом, зная значение высоты зеркальной точки, измеренной радиометодом, на соответствующей кривой свечения того же оптического метеора снимали значение звездной величины. Пересчет от звездной величины к интенсивности свечения осуществлялся по формуле

$$M = 24,3 - 2,5 \lg I_{ph}. \quad (1)$$

Значение линейной электронной плотности для зеркальной точки того же метеора в работе [8] было вычислено по измеренной величине амплитуды радиоотражения, а в работе [7] по измеренной длительности радиоэхо.

Расчет массы произведен по формулам [9]

$$m_{ph} = \frac{3HI_m}{2\tau_{ph}V^3 \cos Z_r}, \quad (2)$$

$$m_r = \frac{3H\mu_{m_H}q_m}{4\beta \cos Z_r}, \quad (3)$$

где Z_r — зенитное расстояния радианта, V — скорость, h — высота зеркально отражающей точки, $m_{от}$ и $q_{от}$ звездная величина и линейная электронная плотность для зеркально отражающей точки следа метеора, H^* — высота однородной атмосферы, τ_{ph} и β соответственно коэффициент свечения и коэффициент ионизации, и μ_{m_H} — атомный вес метеорного вещества. Общее количество метеоров слабее $+0^m$ по двум источникам радио- и телевизионных наблюдений оказалось 59. Исходные параметры, необходимые для расчета масс по соответствующим источникам, приведены в табл. 1, где N — номер метеора.

Для расчета коэффициента свечения использованы выражения [11]:

а) $\tau_{ph} = 3,25 \times 10^{-19} \times V$ при скорости
 $10 \text{ км/с} < V < 17 \text{ км/с};$

б) $\tau_{ph} = \frac{-9,6 \times 10^{-7}}{V}$ при скорости
 $V > 17 \text{ км/с}.$

Коэффициент ионизации вычислялся по формуле:

$$\beta = 10^{-7,73} \times V^{3,88},$$

которая получена по данным радио-оптических наблюдений в [3].

При расчетах масс метеороида по формулам (2) и (3) в качестве среднего значения массы атомов метеорного вещества принимается величина $\mu_{m_H} = 3,82 \times 10^{-23}$ г. Таким образом, точность вычисления и степень согласия между фотометрической и радиолокационной массами зависит от достоверности и надежности определения значений коэффициентов свечения и ионизации и их зависимости от скорости метеоров. Результаты расчета фотометрических и радиолокационных масс метеоров для высоты зеркальной точки приведены в табл. 1. Здесь в таблице также приведены данные о массах, вычисленных путем интегрирования по кривым свечениям для соответствующих метеоров по работе [3].

Результаты сопоставления масс метеороидов, вычисленные фотометрическим m_{ph} и радиолокационным m_r методами, показывают, что у 18 совместных метеоров массы, вычисленные двумя методами, близки или хорошо сходятся между собой. У 18 совместных метеоров массы, вычисленные фотометрическим методом, больше чем радиолокационные, а у 13 метеоров фотометрическая масса оказалось меньше, чем радиолокационная. Наибольшее расхождение между массами наблюдается у метеоров ярче 0^m .

Для сопоставления фотометрической и радиолокационной массы метеороидов между собою в широком диапазоне скоростей нами для каждой группы вычислены фотометрические и радиолокационные значения масс. При этом, нами разбиты метеороиды по скоростям в шесть групп, и для каждой группы вычислены усредненные значение масс фотометрическими и радиолокационными методами. Результаты вычисления приведены в табл. 2.

Здесь в таблице представлены также усредненные значения масс m_{ph} , вычисленных путем интегрирования по кривой свечения метеора. В табл. 1, наряду с усредненными значениями фотометрической и ионизационной масс, приведены и среднеквадратические ошибки. В последней строке дано количество метеоров, входящих в каждую группу.

Результаты сопоставления усредненных значений масс, вычисленных тремя методами, показывают удовлетворительное согласие друг другом. Следовательно, эти результаты дают основания полученные шкалы масс метеоров в [3] использовать для интерпретации результатов радиолокационных наблюдений метеоров, полученных с одной приемной станции.

Таким образом, получено, что в диапазоне звездных величин $0 \div +8^m$ фотометрические и ионизационные массы, вычисленные по интенсивности свечения и величине линейной электронной плотности на высоте зеркальной точки, находятся в удовлетворительной согласии между собой.

Выводы

По величинам интенсивности свечения и линейной электронной плотности для высоты зеркального радиоотражения вычислены фо-

Таблица 1. Фотометрическая и радиолокационная массы метеороидов по результатам комбинированных оптико-радиолокационных наблюдений

№	$\cos Z_r$	$V, \text{км/с}$	$H_{от}, \text{км}$	$M_{от}$	$\lg q_{от}$	$m_{ph.m} \times 10^3, \text{г}$	$m_r \times 10^3, \text{г}$	$m_{ph} \times 10^3, \text{г}$	Ист.
1	0,5871	56,70	104,4	1,50	13,70	12,48	10,48	27,4	[6]
2	0,5443	36,50	92,0	1,10	13,60	46,94	62,86	57,4	—
6	0,3907	40,80	99,0	1,63	13,16	32,12	15,90	19,4	—
7	0,5693	57,90	102,3	1,90	13,67	8,54	7,06	11,4	—
8	0,4702	46,20	105,0	1,10	13,98	33,91	53,71	153,4	—
9	0,5749	40,10	92,0	2,50	13,98	10,14	71,39	10,8	—
10	0,5098	21,90	86,0	0,20	13,07	318,93	495,22	595,0	—
11	0,7180	41,40	96,3	1,60	13,60	17,45	23,83	17,6	—
13	0,4648	39,20	95,1	2,20	13,56	17,30	33,57	17,2	—
14	0,6443	29,90	92,3	2,16	13,11	22,26	42,97	21,6	—
15	0,4294	43,40	92,0	0,50	13,77	73,13	39,29	154,2	—
16	0,5075	41,80	91,6	1,90	12,60	18,37	3,00	9,6	—
17	0,1939	41,80	93,0	1,70	13,44	57,82	54,26	62,4	—
18	0,4821	40,60	92,6	1,80	13,30	22,48	17,79	—	—
19	0,5394	40,20	92,0	0,20	13,97	89,46	74,36	161,4	—
20	0,7251	30,80	90,9	1,80	13,28	25,97	56,46	28,4	—
21	0,4888	47,70	102,2	2,20	13,49	11,11	13,59	22,0	—
22	0,6018	44,97	93,5	1,60	13,50	17,65	13,90	25,8	—
23	0,6281	42,90	92,7	1,20	13,45	26,86	14,02	18,4	—
24	0,5301	40,80	98,9	2,50	12,88	10,63	6,15	11,6	—
25	0,6029	41,40	94,2	1,00	13,83	36,12	48,19	51,8	—
26	0,5183	37,50	98,5	2,50	12,84	12,86	7,65	10,2	—
27	0,7236	31,00	88,0	—	13,11	—	38,26	—	—
28	0,6881	22,60	86,5	0,0	13,73	266,75	1341,60	287,2	—
29	0,5979	43,90	95,0	1,40	13,70	22,41	24,02	27,8	—
32	0,6782	60,90	102,4	1,50	13,55	9,36	4,50	12,0	—
33	0,4255	60,90	106,4	—	14,36	—	46,28	—	—
34	0,7312	62,20	107,5	0,80	14,20	15,86	18,18	23,4	—
36	0,7881	38,00	84,2	0,0	13,34	82,38	12,56	217,8	—
37	0,8485	40,90	87,0	2,05	12,33	9,99	1,08	23,0	—
38	0,4953	52,90	106,6	0,22	14,50	55,23	91,46	73,6	—
39	0,6413	55,50	106,1	2,05	13,92	7,18	15,93	9,6	—
40	0,6252	57,80	105,8	2,28	13,88	5,50	11,59	6,0	—
41	0,7531	59,90	104,1	1,00	13,76	13,81	6,57	25,8	—
42	0,7621	60,90	106,7	1,10	14,04	12,04	12,37	11,8	—
43	0,7417	55,70	102,5	2,00	13,64	6,46	7,23	12,4	—
46	0,7873	63,90	102,7	1,82	13,62	5,46	4,14	9,4	—
47	0,8139	58,10	106,2	1,50	13,99	8,57	11,47	8,6	—
48	0,8236	62,20	106,0	0,80	14,20	14,08	15,75	18,6	—
49	0,8389	65,70	101,1	1,53	14,09	6,33	10,08	7,6	—
50	0,8357	62,30	103,5	1,05	13,63	10,988	3,99	30,8	—
51	—	59,80	105,5	0,20	14,29	—	—	—	—
52	0,7082	60,50	102,5	1,50	13,56	9,08	4,41	17,6	—
53	—	60,40	100,8	2,60	13,27	—	—	—	—
55	0,7017	55,00	105,2	1,40	13,85	12,17	12,39	10,2	—
56	—	61,00	108,0	1,70	14,27	—	—	—	—
57	0,8344	56,10	106,3	0,40	14,12	24,70	18,11	24,0	—

Окончание табл. 1

№	cos Z_r	$V, \text{км/с}$	$H_{\text{от}}, \text{км}$	$M_{\text{от}}$	lg $q_{\text{от}}$	$m_{ph.m} \times 10^3, \text{г}$	$m_r \times 10^3, \text{г}$	$m_{ph} \times 10^3, \text{г}$	Ист.
1	0,6184	31,20	83,7	5,50	10,16	0,98	0,05	1,0	[8]
2	0,7455	14,70	97,3	6,87	10,12	1,42	3,04	4,9	—
7	0,7513	17,90	91,9	4,85	10,80	4,47	2,89	1,43	—
9	0,6587	28,80	99,3	4,95	11,10	1,80	0,47	—	—
12	0,7902	16,20	90,1	7,75	9,65	0,404	0,49	—	—
14	0,8191	36,00	84,0	6,13	10,77	0,31	0,06	—	—
15	0,7782	30,10	92,9	6,30	10,72	0,40	0,15	—	—
19	—	30,40	100,7	6,20	10,40	—	—	—	—
21	0,7313	32,00	92,3	6,78	10,22	0,24	0,04	0,6	—
23	—	35,70	84,3	7,15	10,24	—	—	—	—
24	0,8201	27,10	91,0	6,50	10,08	0,39	0,04	—	—
25	0,6730	20,20	88,9	5,53	10,13	2,10	0,43	7,2	—

Таблица 2. Средние значения фотометрической m_{pm} , радиолокационной m_r и фотометрической масс m_{ph} по [3] для шести групп метеороидов по скоростям

$V, \text{км/с}$	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70
$m_{pm}, \text{г}$	0,00294 ± 0,0015	0,15251 ± 0,0818	0,02666 ± 0,0110	0,03114 ± 0,0063	0,01546 ± 0,0046	0,0104 ± 0,0013
$m_r, \text{г}$	0,00296 ± 0,0001	0,4700 ± 0,3113	0,02474 ± 0,0099	0,03044 ± 0,0063	0,01923 ± 0,0081	0,009178 ± 0,0020
$m_{ph}, \text{г}$	0,003165 ± 0,001735	0,22775 ± 0,138307	0,047514 ± 0,029332	0,05128 ± 0,014526	0,0209 ± 0,006352	0,0164 ± 0,0028
n	2	4	7	15	10	8

тометрические и ионизационные массы одних и тех же метеоров слабее $0^m \div +8^m$.

Получено, что масса, вычисленная фотометрическим методом, находится в удовлетворительном согласии с массой, вычисленной радиометодом, и массой, полученной путем интегрирования по кривым свечения.

Литература

1. *Davies J.G., Hall J.E.* Meteor luminosity and ionization // *Proc. Roy. Soc.*, 1963, A271, No. 1344. P. 120–128.
2. *Бабаджанов П.Б.* Свечение и ионизация метеоров // *ДАН СССР*. 1969. Т. 184. № 4. С. 800–802.
3. *Нарзиев М.* Масса метеороидов по результатам параллельных наблюдений. Шкала масс радиометеоров // *Докл. АН РТ*. 2003, Т. 40. No. 1. С. 3–12.
4. *Тохтасьев В.С.* Вероятность ионизации в метеорных следах. В. кн.: Метеорное распространение радиоволн. Вып. 7. Казань, изд-во КГУ, 1970. С. 33–49.
5. *Narziev M.* Dependences of ratio of the luminosity to ionization on velocity and chemical composition of meteors. Meteoroids: the smallest solar system bodies. NASA/CP-2011-216469. Breckenridge, Colorado, USA, July 2011. P. 168–173.
6. *Нарзиев М., Малышев И.Ф.* Кривые блеска метеоров и определение масс метеороидов по результатам комплексных радиотелевизионных наблюдений // *Известия АН РТ*. 2009. №4(137). P. 36–45.
7. *Нарзиев М.* Вариации свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров // *Радиотехника*. 2016. Вып. 184. С. 53–58.
8. *Cook A.F, Forti G., Mc Crosky R.E., Posen A., Southworth R., Williams J.T.* Evolutionary and physical properties of meteoroids // *IAU – Colloquium*. Washington, 1973. P. 23–44.
9. *Narziev M.* Meteoroids mass by results of the combined Radio-Television observations // *44rd L&Pci. Conf.* 2013.
10. *Campbell-Brown M.D., Kero J., Szasz C., PellinenWannberg A., Weryk R.J.* Photometric and ionization masses of meteors with simultaneous EISCAT UHF radar and intensified video observations, *Comets, Meteors*. 2012.
11. *Лебединцев В.Н.* Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 246 с.

References

1. *Davies J.G., Hall J.E.* Meteor luminosity and ionization. *Proc. Roy. Soc.*, 1963, A271, no. 1344, pp. 120–128.

2. Babadzhanov P.B. Luminosity and ionization of meteors. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Rep. of the Academy of Sciences of the USSR], 1969, vol. 184, no. 4, pp. 800–802. (In Russian)
3. Narzиеv M. The mass of meteoroids according to the results of parallel observations. The scale of radio meteor masses. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* [Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2003, vol. 40, no. 1, pp. 3–12. (In Russian)
4. Tokhtas'ev V.S. Probability of ionization in meteor traces. In: *Meteoritic propagation of radio waves, iss. 7*. Kazan', KGU Pub., 1970, pp. 33–49. (In Russian)
5. Narzиеv M. *Dependences of ratio of the luminosity to ionization on velocity and chemical composition of meteors. Meteoroids: the smallest solar system bodies*. NASA/CP-2011-216469. Breckenridge, Colorado, USA, July 2011, pp. 168–173.
6. Narzиеv M., Malyshev I.F. Meteor light curves and determination of meteoroid masses based on the results of complex radio-television observations. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadjikistan* [News of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan], 2009, no. 4(137). pp. 36–45. (In Russian)
7. Narzиеv M. Variations of the luminescence and ionization along the traces of the same meteors. *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2016, iss. 184, pp. 53–58. (In Russian)
8. Cook A.F., Forti G., Mc Crosky R.E., Posen A., Southworth R., Williams J.T. *Evolutionary and physical properties of meteoroids. IAU – Colloquium*. Washington, 1973, pp. 23–44.
9. Narzиеv M. Meteoroids mass by results of the combined Radio-Television observations. *Proc. of 44rd L&Pci. Conf.*, 2013.
10. Campbell-Brown M.D., Kero J., Szasz C., PellenWannberg A., Weryk R.J. *Photometric and ionization masses of meteors with simultaneous EISCAT UHF radar and intensified video observations, Comets, Meteors*, 2012.
11. Lebedinetc V.N. *Dust in the upper atmosphere and space. The meteors*. Leningrad, Gidrometeoizdat Pub., 1980, 246 p. (In Russian).