

ВАРИАЦИИ СВЕЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ ВДОЛЬ СЛЕДА ОДНИХ И ТЕХ ЖЕ МЕТЕОРОВ

Введение

Всестороннее исследование метеорного вещества требует использования самых различных методов, среди которых наиболее информативными являются наземные комплексные оптические (фотографические, электронно-оптические, телевизионные) и базисные радиолокационные методы наблюдения одних и тех же метеоров. Оптическими методами, как правило, регистрируют кривую блеска, а радиометод позволяет измерять дальность, длительность радиоэха, фазы и амплитудно-временные характеристики радиоэха (АВХ) и, следовательно, кривые ионизации и др. параметры метеорного следа и атмосферы в метеорной зоне. Наличие кривой блеска и ионизации одних и тех же метеоров позволяет сопоставить вариации интенсивности свечения и линейной электронной плотности вдоль следа одних и тех же метеоров и получить ценную информацию не только о физико-динамических характеристиках метеоров, но и о процессах, сопровождающих полет метеоров в земной атмосфере.

Напомним, что попытки получения кривой блеска и ионизации одних и тех же метеоров по результатам параллельных фотографических и радиолокационных наблюдений, были предприняты еще в 60-х годах прошлого столетия [1 – 3]. При этом по результатам оптических наблюдений были получены кривые блеска, а по результатам радионаблюдений – лишь информация для одной зеркально отражающей точки следа метеора. И только в 70 – 80-х годах в США [4] и Таджикистане [5] по результатам параллельных радио-телевизионных наблюдений были получены данные о кривых блеска и ионизации одних и тех же метеоров. В частности, по результатам наблюдений [4] было получено 29 индивидуальных метеоров, скорость которых заключалась в интервале 17 – 32 км/с, а звездная величина – в диапазоне $4.5^m \div 7.5^m$. Опубликованные данные о кривых блеска и ионизации 13 совместных метеоров в [5] принадлежат, в основном, метеорному потоку Персеиды.

Из изложенного следует, что кривые блеска и ионизации одних и тех же метеоров в диапазоне скоростей $32 \leq V \leq 55$ км/с по результатам комбинированных оптических и радиолокационных наблюдений изучены недостаточно.

Аппаратура, наблюдение и редукция наблюдательного материала

С целью исследования взаимосвязи процессов свечения и ионизации в метеорных следах и изучения физико-кинематических характеристик метеороидов по результатам комбинированных наблюдений в 1978 – 1980 гг. в ГисАО были организованы и проведены одно-временные телевизионные и базисные радиолокационные наблюдения в период действия ряда известных главных ежегодных метеорных потоков, таких как Квадрантиды, δ -Аквариды, Персеиды, Ориониды и Геминиды.

Телевизионные наблюдения были проведены на базе усовершенствованной промышленной телевизионной станции ПТС –3 [5], которая состояла из следующих узлов: телевизионный телескоп; усилители; видеоконтрольные устройства; фотокамера. Телевизионный телескоп выполнял функции передающей камеры и состоял из входной оптики Юпитер-3 с фокусным расстоянием $F = 50$ мм, относительным отверстием 1/1,5 и с полем зрения $20^\circ \times 30^\circ$. Основные характеристики телевизионной аппаратуры следующие: способ разложения – чересстрочный, стандарт разложения – 625 строк в кадре, частота смены полей – 50 Гц, полоса пропускания видеосигнала с неравномерностью до $\pm 0,5$ дБ – 5 МГц, напряжение питания сети – 220 в, время непрерывной работы – 10 час.

Радиолокационные наблюдения проводились на комплексе МИР-2 [7]. В состав комплекса входили: передатчик, пять приемников, синхроблок, блок помехозащиты, измеритель точной дальности, приемники ретранслированных сигналов, приемники выносных пунктов,

передатчики ретрансляционных сигналов выносных пунктов, имитатор метеоров, многолучевой индикатор покадровой съемки [8], индикатор с ждуще-непрерывной фоторегистрацией [9] и антенны. Основные параметры комплекса МИР-2: длина волны – $\lambda = 8$ м; мощность передатчика в импульсе – 65 кВт; частота повторения импульсов – 500 имп/с; длительность импульса – 6.5 мксек; полоса пропускания основного приемника – 600 кГц; полоса пропускания трактов ретрансляционных сигналов с вынесенных пунктов – 2 МГц; пороговая чувствительность приемников – $8 \cdot 10^{-14}$ Вт; время срабатывания схемы помехозащиты – 6 мсек.

Передатчик вместе с приемниками центрального пункта и приемо-регистрирующая аппаратура расположены в ГисАО. Остальные четыре приемника были расположены на расстояниях от четырех до 10,9 км от центрального пункта. Причем приемные пункты второй, первый и пятый расположены в одной линии и расстояние между II и V пунктами составляло 15 км, что позволяло регистрировать участки следа длиной до 3.75 км по высоте.

В результате анализа данных двухгодичного цикла радиолокационных и телевизионных наблюдений было выявлено 57 совместных метеоров [10]. Образец регистрации метеора по результатам параллельных радио-телевизионных наблюдений от 04.01.1979 г. приведен на рис. 1.

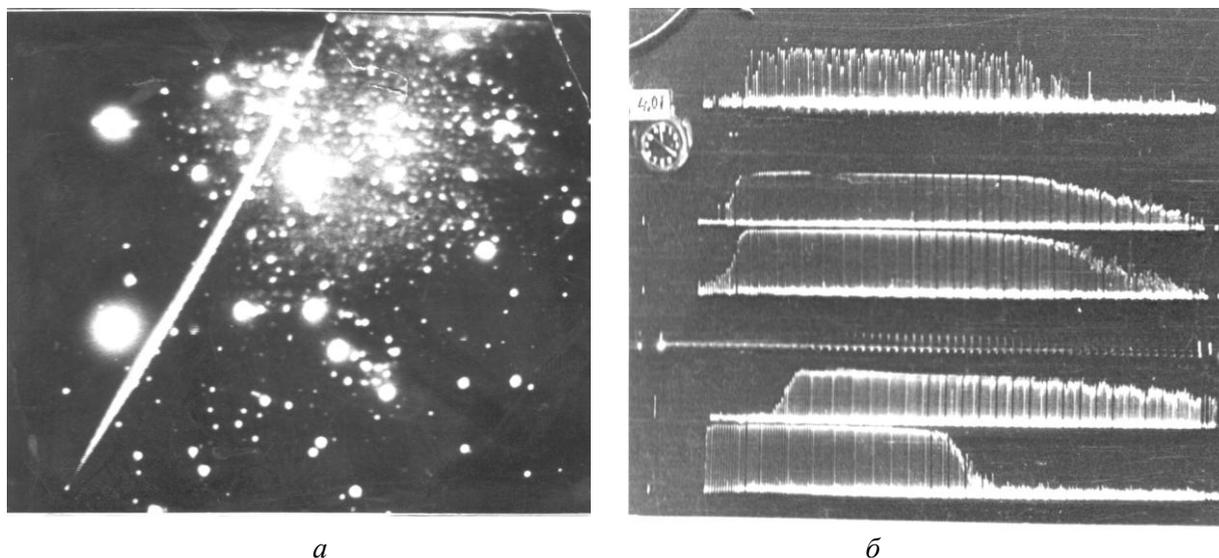


Рис. 1. Фотография совместного радио-телевизионного метеора № 8 на ТВ установке (А) и фотозаписи амплитудно-временных характеристик радиоэхо с помощью ждуще-непрерывного индикатора МИР-2 (Б)

Методика отождествления совместных метеоров, редукция данных атмосферной траектории и фотометрических измерений приведена в [10, 11]. Согласно [11] абсолютная звездная величина M вдоль следа метеора определялась по формуле:

$$M = m + \Delta m_R + \Delta m_W + \Delta m_Z \quad (1)$$

где m – видимая звездная величина метеора в заданной точке следа, Δm_R – поправка за приведение блеска метеора к стандартному расстоянию, Δm_W – поправка за различие скорости передвижения изображения метеора и звезды по фотослою и Δm_Z – поправка за атмосферное поглощение света. Величина этих поправок определялась по формулам:

$$\Delta m_R = 10 - 5 \lg R, \quad (2)$$

$$\Delta m_W = -2.5 p \lg U_M / U_3 \quad (3)$$

$$\Delta m_Z = -2.5 \Delta \Delta M_Z \lg P, \quad (4)$$

где R – дальность до метеора, P и ΔM_Z – коэффициент прозрачности атмосферы и разность воздушных масс при $Z = 0$ и при Z точек метеорного следа. ΔM_Z находится по известной таблице Бемпорада, U_3 и U_M соответственно, скорость передвижения изображений звезд и

метеора по фотослою и p – показатель Шварцшильда. Величина Δm_w , полученная нами по следам звезд для угловых скоростей от 10 до 24 градус/сек., составляет соответственно от 3^m до 4.2^m . Кроме того, по полученным данным (следы звезд) для следов, уходящих за предел растра, определены поправки за ошибки поля.

Дальности до точки зеркального радиоотражения, измеренные по результатам радионаблюдений, и координаты начала и конца следа метеора, определяемые по телевизионным снимкам метеора, позволяли для каждого метеора определить высоты начала, максимума, точки зеркального радиоотражения и конца следа.

Метод определения кривой ионизации метеора

В настоящее время для получения кривой ионизации метеора, то есть получения распределения линейной электронной плотности вдоль метеорного следа, используются три метода: статистический, комплексный и многостанционный. При многостанционном методе получения кривой ионизации по величине амплитуды отраженного сигнала (в случае насыщенных следов) или по значению длительности радиоотражения, измеренные по амплитудно-временным характеристикам (ABX) радиоэхо (для следов промежуточного и насыщенного типа), получаемых в нескольких пунктах данного метеора, определяют величину линейной электронной плотности для отражающих точек каждого выносного пункта. Обычно линейную электронную плотность для метеорных следов переуплотненного типа определяют по известной формуле

$$q = [(\tau + r^2 / 4D) D] / A \lambda^2 \quad (5)$$

где τ – длительность отражения, $A = e^2 / 4\pi^2 m c^2$, λ – длина волны; e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света, r – начальный радиус следа и D – коэффициент амбиполярной диффузии. Уравнение (5) справедливо тогда, когда уменьшение электронной концентрации в следе происходит только вследствие амбиполярной диффузии. Согласно [12] наряду с амбиполярной диффузией длительность радиоэхо укорачивается вследствие следующих возможных типов деионизации: рекомбинации, прилипания электронов к нейтральным частицам, турбулентной диффузии и т.д. Изучение влияния этих процессов на уменьшение длительности радиоэхо проводилось рядом исследователей, в частности в Институте астрофизики АН Республики Таджикистан Р.Ш. Бибарсовым. Согласно [12] длительность радиоэхо, с учетом последних трех типов деионизации, для метеоров, наблюдаемых в ночное время,

$$\tau_n = [3D / \omega \tau_n (\tau_n e^{k\tau_n} - t)^3 + t] \quad (6)$$

где t – постоянная времени мелкомасштабных вихрей, ω – удельная энергия диссипации атмосферных вихрей и k – скорость прилипания электронов к нейтральным частицам. Из (5) – (6) находим формулу для определения линейной электронной плотности в отражающей точке q_n метеоров, наблюдаемых в ночное время:

$$q_n = 1/A\lambda^2 \{[\omega/3D (\tau_n - t)^3 + t] e^{-k\tau_n} + r^2/4 D\} D \quad (7)$$

Для метеоров, длительность которых меньше, чем постоянная времени мелкомасштабных вихрей (т. е. метеоров, у которых $\tau_n \leq t \leq 10$ с) выражение для вычисления величины линейной электронной плотности для ночных метеоров с учетом прилипания и амбиполярной диффузии можно получить из [12] в виде

$$q = (\tau e^{-k\tau} + r^2/4 D) D / A \lambda^2, \quad (8)$$

где $A = 7.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-1}$. Для применения формул (5), (7), (8) при вычислении величины линейной электронной плотности кроме измеренного значения длительности радиоотражения, необходимо значение величины начального радиуса r , коэффициента амбиполярной диффузии D и скорости прилипания k . Для вычисления значения r , D и k использованы известные формулы [Нарзиев]:

$$\begin{aligned}
 r &= 1.47 \cdot 10^{-10} V^{0.65} \rho^{-1}, \\
 \lg D &= 0.079 h_i - 6.6, \\
 g k &= 4.99 - 0.07 h_i,
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где ρ – плотность атмосферы на высоте h_i . Высота точки зеркального отражения для центрального пункта наблюдения определяется по известной формуле

$$h = R \cos Z + \Delta h \tag{10}$$

Здесь R – дальность отражающей точки, Z – зенитное расстояние отражающей точки на центральном пункте, Δh – поправка по высоте, учитывающая кривизну Земли и превышение пункта наблюдения над уровнем моря. Значения высот отражающих точек Δh_i на следе метеора относительно высоты точки центрального пункта для каждого метеора находятся из выражения

$$\Delta h_i = V \Delta t \cos Z_R \tag{11}$$

где V – скорость метеора и Z_R – зенитное расстояния радианта.

Вариация свечения и ионизации вдоль следа одних и тех же метеоров

Наличие полной формы АВХ (длительность радиоэхо) в 4-5 точках следа метеоров и их соответствующие высоты позволяют по формулам (7) и (8) вычислить значение линейной электронной плотности в этих точках и сопоставить полученные ионизационные кривые с кривыми свечения соответствующих метеоров.

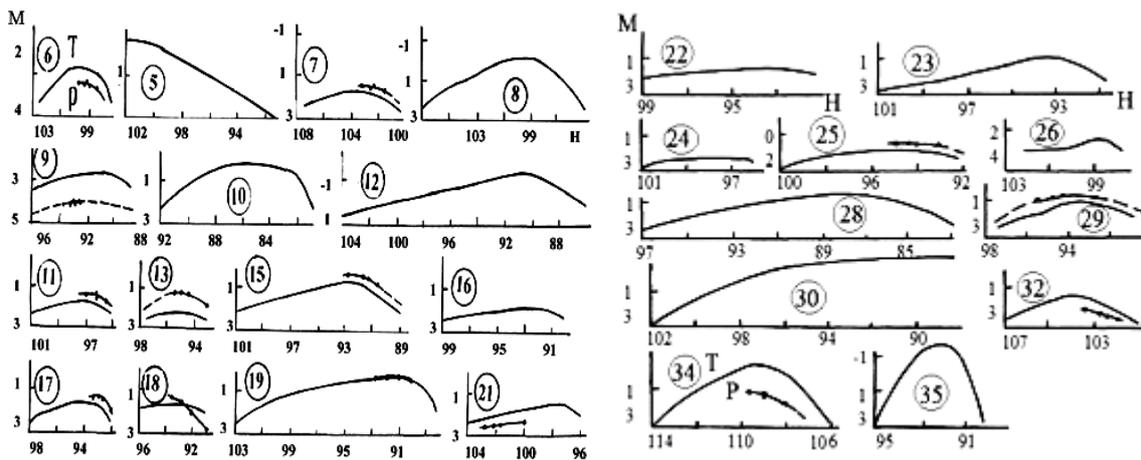


Рис. 2. Вариация радиовеличины M_r (P) звездной величины (T) вдоль следа одних и тех же метеоров

Для сравнения полученных отрезков ионизационных кривых с соответствующими частями их кривых свечения по значениям линейной электронной плотности, вычисленных для каждой наблюдаемой точки следа метеора, были определены звездные величины по общеизвестной формуле:

$$M_r = 35 - 2.5 \lg q \tag{12}$$

Иными словами, мы получили "кривую блеска" по радиолокационным данным. На рис. 2 для некоторых совместных метеоров представлены данные о кривых блесках и ионизации одних и тех же метеоров, где по оси ординат отложена звездная величина, а по оси абсцисс отложены высоты. Высоты начала и конца следа каждого метеора определялись на основании точно измеренного значения дальности до точки зеркального радиоотражения и горизонтальных координат начала и конца следа, определяемых по телевизионным снимкам следа метеора.

Из наблюдавшихся 57 совместных метеоров (включая данные опубликованные в [5]) у 15 метеоров максимумы блеска по обоим наблюдениям совпадают по высоте, у 5 метеоров

наблюдаемые отрезки радиолокационной "кривой блеска" совпадают с восходящей ветвью телевизионной кривой, а у 12 метеоров – с нисходящей. Для остальных метеоров (включая 6-поворотные радиометеоры) не удалось получить достаточно достоверные отрезки ионизационных кривых.

На рис.3 приведены кривые блеска и ионизации по результатам параллельных радиотелевизионных наблюдений по работе Кука и др.[4]. Ход кривых почти у всех радиотелевизионных метеоров согласуется.

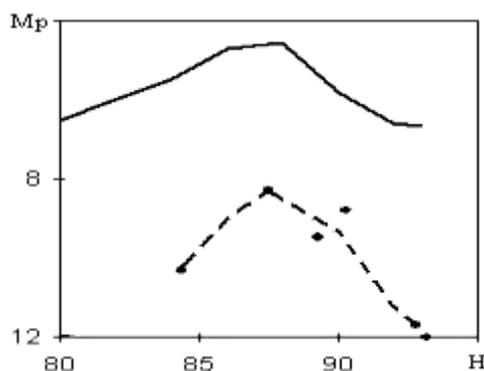


Рис. 3. Кривые свечения (сплошная линия) и ионизации (точками) по результатам наблюдений Кука и др. [4]

Однако разбросы по звездной величине между кривыми, полученными разными авторами, неоднозначны. Для случая очень слабых низкоскоростных метеоров [4], где $10 \leq V \leq 36$ км/с, это различие имеет вид:

$$M_r - M_{ph} = + 2.85 - 3.85 (\lg V - 6.41), \quad (13)$$

где V выражено в см/с. Зависимость разности между кривыми от скорости для наших метеоров и метеоров, полученных в [1] (так как наблюдаемый диапазон звездной величины одинаков), представлена в таблице. Здесь N – число метеоров. При этом мы в основном использовали метеоры с абсолютной звездной величиной слабее -1^M , так как следы метеоров ярче -1^M в основном были поворотными.

Зависимость разности радио M_r и фото M_p величин от скорости V

V	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
V_{cp}	14.26	26.40	35.50	42.10	57.10	62.20
$M_r - M_{ph}$	+0.47	+1.06	0.0	0.16	-0.83	-0.76
N	1	7	10	18	16	11

На наш взгляд, расхождение между кривыми обусловлены тем, что в формуле (12), дающей зависимость между звездной величиной и линейной электронной плотностью, не учтено влияние скорости. Следовательно, эта зависимость нуждается в уточнении.

Выводы

1. По результатам параллельных радиотелевизионных наблюдений получены кривые блеска и отрезки ионизационных кривых метеоров потоков Квадрантиды, δ -Аквариды, α -Каприкорниды, Ореониды и Геминиды, скорости которых заключены в диапазоне $23 \leq V \leq 69$ км/с.

2. Показано, что ход вариации магнитуды и линейной электронной плотности вдоль следов одних и тех же метеоров удовлетворительно согласуется между собою.

Список литературы: 1. *Davies J.G., Greenhow J.S., Hall J.E.* Combined photographic and radio echo observations of meteors // *Proc. Roy. Soc.*, 1959, A 253, N 1272, P. 121-129. 2. *Davies J.G., Greenhow J.S., Nall J.E.* The effect of attachment on radio echo observations of meteors // *Proc. Roy. Soc.*, 1959, A 253, N 1272, p. 130-139. 3. *Бабаджанов П.Б.* Свечение и ионизация метеоров // *ДАН СССР*. – 1969. – Т.184, № 4. – С. 800-802. 4. *Cook A.F., Forti G., Mc Crosky R.E., Posen A., Southworth R., Williams J.T.* Combined observations of meteors by Image-orthicon television camera and malty-station radar // *Evolutionary and physical properties of meteoroids. IAU – Colloquium. Washington, 1973.* – pp. 23-44. 5. *Бабаджанов П.Б., Мальшиев И.Ф., Нарзиев М., Чеботарев Р.П.* Кривые свечения и ионизации метеоров по результатам параллельных телевизионных и радиолокационных наблюдений // *Кометы и метеоры*, 1985. – № 37. – С. 28-33. 6. *Бабаджанов П.Б., Мальшиев И.Ф.* Телевизионные наблюдения метеоров в Душанбе // *Астрон. циркуляр*. – 1979. – № 1071. – С. 5-6. 7. *Чеботарев Р.П., Сидорин В.Н., Полушкин Г.А. и др.* Комплекс аппаратуры для радиолокационных исследований метеоров в Душанбе // *Бюлл. Ин-та астрофиз. АН Тадж. ССР*. – 1970. – № 55. – С. 25-28. 8. *Чеботарев Р.П., Исамутдинов Ш.О.* Многолучевой индикатор метеорного радиолокатора // *Бюлл. ин-та астрофиз. АН Тадж. ССР*. – 1970. – №55. – С. 34-39. 9. *Чеботарев Р.П., Гартман Н.А.* Индикатор метеорного радиолокатора с ждуще-непрерывной фоторегистрацией // *Бюлл. Ин-та астрофиз. АН Тадж. ССР*. – 1979. – № 68. – С. 28-34. 10. *Нарзиев М., Мальшиев И. Ф.* Результаты комплексных радио-телевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане. I. Динамические характеристики // *Бюллетень Института астрофизики Академии Наук Республики Таджикистан*. – Душанбе, 2006. – № 85. – С. 35-45. 11. *Нарзиев М., Мальшиев И.Ф.* Кривые блеска метеоров и определение масс метеороидов по результатам комплексных радио-телевизионных наблюдений // *Известия АН РТ*. – 2009. – С. 12. *Бибарсов Р.Ш.* Влияние процессов деионизации на длительность метеорного радиоэхо // *Бюл. Ин-та астрофизики АН Тадж. ССР*. – 1970. – № 55. – С. 3-9.

*Институт астрофизики
Академия наук Республики Таджикистан*

Поступила в редколлегию 20.03.2016