



УДК 523.68

Моделирование кривых блеска метеоров

Ю.М. Горбанев, И.И. Иванова

Одесская астрономическая обсерватория

Создана компьютерная модель метеорного явления, которая позволяет получить стандартную световую кривую блеска метеора по заданным скорости, углу влета метеора, массе и плотности частицы.

МОДЕЛЮВАННЯ КРИВИХ БЛИСКУ МЕТЕОРИВ, Горбанев Ю.М., Иванова І.І. — Створено комп'ютерну модель метеорного явища, яка дозволяє отримати стандартну світлову криву блеску метеора за заданими швидкістю, кутом вльоту метеора, масою та густиною частинки.

MODELLING OF METEORS LIGHT-CURVES, by Gorbanev Yu.M., Ivanova I.I. — The computer model of a meteoric phenomenon is elaborated, which allows one to calculate standard light curve of a meteor using input parameters such as velocity, angle of an entry, mass and density of a particle.

Одной из важных задач метеорной астрономии является определение глобального притока межпланетного пылевого вещества в атмосферу Земли. Для решения этой проблемы привлекаются различные наблюдательные (визуальный, фотографический, телевизионный, радиолокационный) и теоретические методы. Но для решения задачи взаимодействия метеорного потока с атмосферой Земли нам понадобились модельные расчеты для определения высоты появления, исчезновения и максимума блеска единичного метеора. С этой целью была создана компьютерная модель метеорного явления, которая позволяет, задав основные параметры метеорного явления и используя основные уравнения физики метеоров, а так же эмпирическую модель стандартной атмосферы Земли CIRA–86, моделировать метеорное явление.

Модельная пылевая частица влетает в атмосферу Земли с заданной скоростью v , углом влета (зенитным расстоянием) z , массой m и плотностью δ .

Чтобы задать для модельных метеоров условия земной атмосферы, мы использовали эмпирическую модель стандартной атмосферы Земли CIRA–86 [1], в которой для высот 20–120 км с шагом 5 км приводятся значения величин температуры, давления и скорости ветра. Эти данные даны для всех широт с шагом в 10 градусов и для 12 месяцев в году. Такая средняя атмосфера вполне удовлетворяет требованиям модели взаимодействия метеорного роя и атмосферы. Для получения требуемых значений давления, температуры и скорости ветра по высоте, широте, долготе и дате используется интерполяция по методу Лагранжа.

Входными параметрами модели так же являются константы. Это коэффициенты сопротивления Γ , теплопередачи Λ , формы A , эффективности излучения τ и удельная энергия абляции до свечения Q_H и во время свечения Q .

Коэффициент сопротивления Γ — это доля количества движения налетающих молекул воздуха, передаваемая метеорному телу. Коэффициент зависит от характера процессов передачи импульса метеорной частице, от формы и размеров тела, режима обтекания тела встречным потоком и от величины реактивного импульса отлетающих и испарившихся молекул.

Коэффициент теплопередачи Λ — это доля кинетической энергии молекул воздуха, передаваемая метеорному телу в результате их столкновения. Так как метеорному телу передается лишь часть энергии налетающих молекул воздуха, коэффициент Λ не может быть больше 1.0.

Таблица 1. Константы

№	Константа	Единицы	Значение	Примечание	Лит-ра
1	Коэффициент сопротивления Γ — выражает долю количества движения набегающего потока, переходящего в торможение тела	безразм.	1 0.2–1 2 0.5–3.0 1.15 1	обычно для болидов частица с вращ фотографические для $v = 30$ км/с	[16] [20] [2]
2	Коэффициент теплопередачи Λ — энергия, идущая на абляцию	безразм.	0.75–1.0 0.8–0.1 0.1 1	каменные и железные фотографические частица с вращ. для болидов	[16] [20] [19]
3	Коэффициент абляции σ	$\text{с}^2/\text{см}^2$	$3.7 \cdot 10^{-12}$ $4.1 \cdot 10^{-12}$ $2.0 \cdot 10^{-12}$ $5.8 \cdot 10^{-12}$	фотографические по наблюдениям в Одессе для $v = 40$ км/с	[16] [20] [2]
4	Коэффициент эффективности излучения τ доля кинетической энергии метеорной частицы, преходящая в свечение	безразм.	$(0.5-1) \cdot 10^{-3}$ $(0.5-6) \cdot 10^{-3}$	слабые метеоры яркие метеоры	[16]
5	Коэффициент формы A — отношение поверхности миделя тела к его объему в степени $2/3$	безразм.	1.21 1 1.21 1.7 1.21	для шара для куба для сферы для осколков для сферы	[20] [19] [2]
6	Удельная теплоемкость Q — энергия разрушения тела, т.е энергия, необходимая для удаления единицы массы с его поверхности	эрг/г	$10^{10} \dots 10^{11}$ $8 \cdot 10^{10}$ $8 \cdot 10^{10}$ $2 \cdot 10^{10}$	фотографические для болидов для $v < 10$ км/с	[16] [19] [20]

Коэффициент абляции σ является комбинацией трех очень важных параметров физической теории метеоров:

$$\sigma = \Lambda / 2\Gamma Q.$$

Так как для обычных метеоров фотографической области Λ может принимать значения от 0.1 до 0.8, Γ — от 0.5 до 3.0, Q — от 10^{10} до 10^{11} , коэффициент $\sigma = 1.7 \cdot 10^{-13} \dots 8.0 \cdot 10^{-11}$. Поэтому во многих расчетах принимают для σ значение, близкое к среднему, $\langle \sigma \rangle = 3.7 \cdot 10^{-12}$.

Коэффициент эффективности излучения τ определяет долю кинетической энергии метеорной частицы, которая превращается в свечение. От величины коэффициента τ зависит вычисление по данным фотографических наблюдений такой важной характеристики, как масса метеорной частицы. В общем случае τ зависит от скорости, массы, структуры и химического состава метеорного тела.

В метеорной физике чаще всего используют безразмерный коэффициент формы: $A = SV^{-2/3}$, где V — объем тела, для сферы $A = 1.21$.

Полет метеора продолжается без свечения до тех пор, пока метеорная частица не достигнет определенной высоты, где плотность атмосферы определяется формулой [2]:

$$\rho_H = \frac{2Q_H M_0^{1/3} \delta^{2/3} \cos z}{\Lambda A H^* v_0^2} \quad (1)$$

где H^* — высота однородной атмосферы, M_0 — начальная масса метеорной частицы.

В модели по формуле (1) вычисляется плотность и соответствующая высота метеора, и с этого момента времени начинается свечение вещества метеорной частицы и потеря массы. В основу модели мы заложили такой механизм разрушения, как квазинепрерывное дробление, которое является одним из наиболее распространенных видов дробления [9]. Существуют следующие физические механизмы, приводящие к квазинепрерывному дроблению метеорных тел:

- 1) сдвигание расплавленной пленки [4, 5, 6, 7] — преимущественно в случае железных метеорных тел;
- 2) «сброс» нагретого поверхностного слоя метеорного тела вследствие очень быстрого испарения более летучих примесей [8, 9];
- 3) терморазрушение поверхностного слоя в твердом состоянии [10, 11, 12].

В работе [2] приведена средняя масса M осколков метеорного тела, образовавшихся вследствие квазинепрерывного дробления, которая равна $10^{-6} \leq M \leq 10^{-4}$ г. Аналогичные оценки были получены рядом авторов [13, 14, 15] путем математического моделирования процессов абляции, свечения и торможения метеоров.

С началом свечения метеора начинается его дробление, и в модели решается совместно уравнение торможения и потери массы.

Уравнение торможения — это первое основное уравнение физической теории метеоров, которое основано на предположении, что потеря количества движения метеороидом Mdv пропорциональна количеству движения набегающего потока воздуха:

$$M \frac{dv}{dt} = -\Gamma S \rho v^2, \quad (2)$$

где M — масса, v — скорость, S — площадь лобового сечения метеорного тела (миделево сечение), ρ — плотность атмосферы.

Уравнение потери массы — второе основное уравнение физической теории метеоров, которое описывает убыль массы метеорного тела при условии, что вся энергия затрачивается на абляцию (испарение или плавление и сдвигание):

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\Lambda S \rho v^3}{2Q}, \quad (3)$$

где Q — удельная теплота испарения или плавления метеорного вещества.

Далее решается третье основное уравнение физической теории метеоров уравнение свечения, которое основывается на предположении что сила света метеора I пропорциональна кинетической

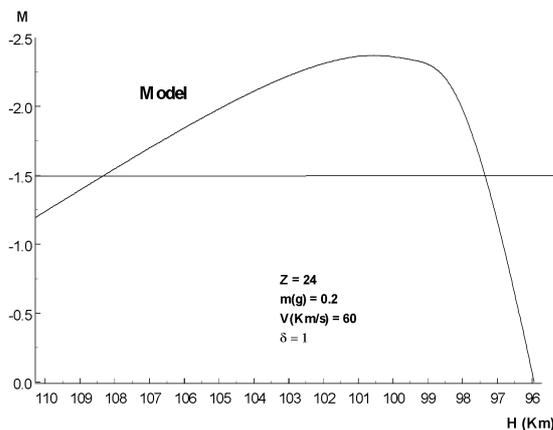


Рис. 1. Модельная кривая блеска

энергии, испарившейся за время dt массы dM :

$$I = \tau \left(-\frac{dM}{dt} \right) \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

где τ — коэффициент эффективности излучения, или коэффициент светимости, который может зависеть от скорости, массы и состава метеороида. Это уравнение позволяет вычислить абсолютный блеск свечения метеора для данного момента времени. Вычисляется высота, скорость, масса метеорной частицы на текущий момент времени, а после сгорания — высота максимума блеска и исчезновения. Момент сгорания частицы определяется по достижению нулевой массы частицы. В результате вычислений определяется световая кривая — зависимость абсолютного блеска метеора от времени.

Так как у каждой приемной аппаратуры свой порог чувствительности, чтобы сравнить наблюдаемые кривые блеска с модельными, мы вводим предельную звездную величину, на уровне которой рассматривается световая кривая метеора.

Обработка базисных фотографий метеоров дает возможность получить довольно подробную информацию об изменении абсолютного блеска вдоль пути метеора в зависимости от времени или высоты. Фотометрический уровень регистрации определяется параметрами применяемой аппаратуры, фотоленки, атмосферными условиями и др. Если в конце метеора блеск убывает очень быстро и незарегистрированный участок кривой, как правило, невелик, то в начале метеора увеличение

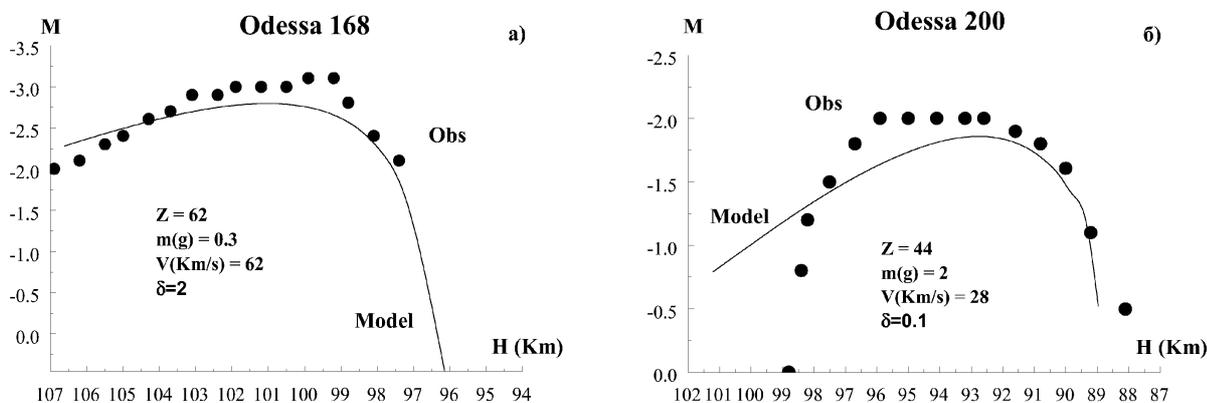


Рис. 2. Наблюдаемые и модельные световые кривые метеоров

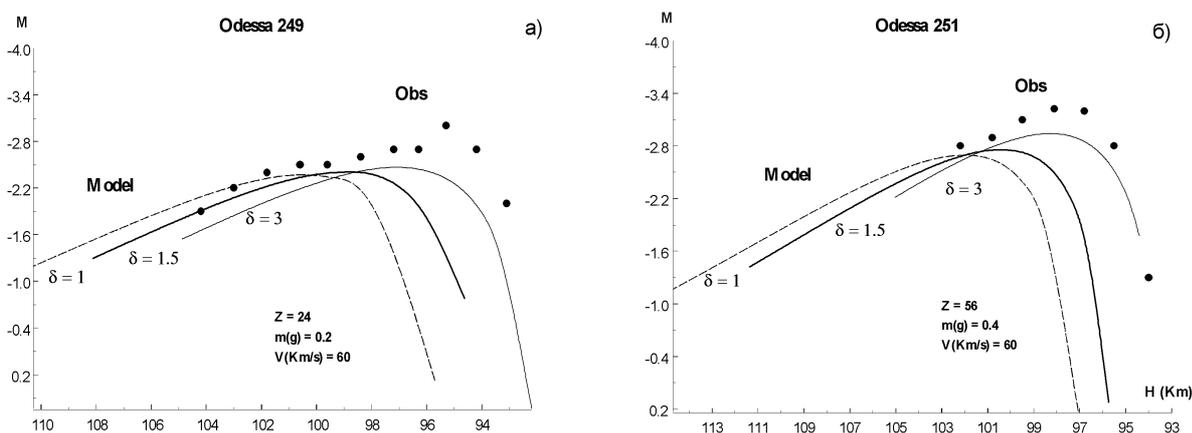


Рис. 3. Световые кривые, смоделированные с различными плотностями

блеска происходит более плавно и значительная часть световой кривой остается неизвестной.

При наблюдениях [16] проводимых с помощью камер НАФА-3С/25 в большинстве случаев регистрируются метеоры ярче 0^m . Среднее значение уровня регистрации соответствует $\langle M \rangle = -1.5^m \pm 1.0^m$.

Наблюдательные данные, полученные фотографическим методом метеорной астрономии, позволили получить некоторые представления о так называемой стандартной кривой блеска метеора. Большинство метеоров имеют световые кривые классического типа: умеренно пологая восходящая ветвь и более крутая нисходящая, как правило, без значительных вспышек яркости [17]. Световые кривые этого класса принадлежат метеорам, порожденными главным образом пылевыми частицами, испытывающими квазинепрерывное дробление.

Как правило, кривые блеска поточных метеоров в большем своем числе являются стандартными, т.е. у них не наблюдаются аномальные вспышки или падение блеска.

Для проверки модели производилась выборка из каталога световых кривых блеска метеоров [18]. Так как наши модельные метеоры разрушаются квазинепрерывно, для тестирования выбирались только стандартные метеоры, то есть метеоры без вспышек. Используя для таких метеоров параметры вхождения в атмосферу, полученные из наблюдений и задав константы метеорного явления (табл. 1), были проведены модельные вычисления. Результатом вычислений является модельная световая кривая — зависимость абсолютной звездной величины метеора от высоты сгорания. На рис. 1 представлена характерная модельная кривая блеска метеора при определенном зенитном угле влета, массе, скорости и плотности межпланетной пылевой частицы. Горизонтальная линия характеризует проникающую силу приемной аппаратуры.

Плотности метеорных частиц в каталоге [18] принимаются равными 1 г/см^3 , модельные же вычисления позволяют получать световые кривые при любом заданном значении. На рис. 2 точками представлены наблюдаемые световые кривые для метеоров (указан каталожный номер), а сплошной линией — модельные вычисления при плотностях, отличающихся от единицы. На рис. 3 показана тенденция смещения модельных кривых блеска метеоров при различных значениях плотности пылевых частиц. Можно отметить, что при некоторых значениях плотности модельные и наблюдаемые кривые совпадают. Определенные таким образом плотности частиц имеют значения от 0.1 до 5 г/см^3 , что соответствует реальному распределению плотностей для метеорных частиц.

Таким образом, наша модель может служить инструментом для определения некоторых параметров метеорного явления и характеристик пылевых частиц, порождающих метеоры с квазинепрерывным дроблением.

1. Rees D. // *Advances in Space Research*. — 1988. — 8, № 5–6.
2. Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве // *Метеоры*. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — С. 85–100.
3. Новиков Г.Г., Лебединец В.Н., Блохин А.В. О дроблении метеорных тел. Квазинепрерывное дробление // *Письма в Астр. журнал*. — 1984. — 10, № 1. — С. 71–75.
4. Лебединец В.Н., Портнягин Ю.И. Дробление плотных метеорных тел в атмосфере // *Астр. журнал*. — 1967. — 44, № 4. — С. 874–888.
5. Cook A.F. A criterion for the mode of ablation of stone meteors // *Smith. Contr. Astrophys.* — 1963. — 4, № 5. — P. 131–136.
6. Cook A.F., Jacchia L.G., McCrosky R.E. Luminous efficiency of iron and stone asteroidal meteors // *Smithson. Contr. Astrophys.* — 1963. — 7. — P. 209–220.
7. Orlik E.J. *Physics of meteor flight in the atmosphere*. — New York, Interscience Publ., 1958. — P. 174.
8. Иванова И.А., Лебединец В.Н. Изучение скорости испарения каменных метеоритов сравнительным методом // *Геохимия*. — 1963. — № 2. — С. 239–242.
9. Лебединец В.Н. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в окрестностях орбиты Земли по результатам радионаблюдений: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Обнинск, 1996. — 30 с.

10. *Сытинская Н.Н.* Окончательный каталог 827 метеорных радиантов и соответствующих орбит // Ученые записки Ленинград. ун-та. — 1937. — № 12. — С. 73–102.
11. *Jones J., Kaiser T.R.* The effect of thermal radiation, conduction and meteoroid heat capacity on meteor ablation // M.N. R.A.S. — 1966. — **133**, № 4. — P. 411–420.
12. *Султанов М.А.* О моделировании процесса абляции метеоритов в лабораторных условиях при сверхзвуковом обтекании плазменным потоком // Астр. вестник. — 1976. — **10**, № 4. — С. 230–240.
13. *Симоненко А.Н.* Зависимость параметров метеоров от процесса дробления метеорных тел // Метеоритика. — 1973. — № 32. — С. 43–49.
14. *Мусий В.И., Шестака И.С.* Об определении массы, испарившейся во время вспышки метеора // Астр. вестник. — 1970. — **4**, № 2. — С. 108–111.
15. *Симоненко А.Н.* К гипотезе дробления метеорных тел путем отделения мелких частиц // Метеоритика. — 1973. — № 32. — С. 50–64.
16. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. — К.: Наукова думка. — С. 9–11.
17. *Крамер Е.Н., Шестака И.С.* Метеорная материя в атмосфере Земли и околосолнечном космическом пространстве. — М.: Наука, 1983.
18. *Крамер Е.Н., Шестака И.С.* Результаты фотографических наблюдений метеоров по программам Международного геофизического года, международного года спокойного солнца и Международного года активного солнца. Каталог. — М., 1982.
19. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Наука, 1967.
20. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981.

Поступила в редакцию 9.09.2004