

УДК 552.6; 52-35

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

В.В. Ефремов^{1,2}, О.П. Попова¹, Д.О. Глазачев¹, А.П. Карташова³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

²Московский физико-технический институт

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
астрономии Российской академии наук

В работе рассмотрены модели взаимодействия мелких метеорных тел с атмосферой Земли. Эти модели были использованы для анализа наблюдений метеоров (кривых блеска), что позволило оценить массы и плотности метеорных тел, для чего был разработан автоматизированный метод оценки.

DOI

Введение

Метеорные тела, наряду с астероидами и кометами, несут важную информацию о нашей Солнечной системе, поскольку материал, из которого они состоят, свидетельствует о составе вещества в ранние этапы эволюции Солнечной системы. Большая часть этих тел не достигает поверхности Земли и не становится метеоритами. Метеорное тело, вошедшее в атмосферу, приводит к появлению

свечения, ионизации и звуковых волн. Анализ динамики (торможение, разрушение) и излучения (светимость, спектр) дает возможность получить информацию о составе метеорного вещества и свойствах метеорного тела. Фактически, атмосфера является детектором, позволяющим изучать свойства метеорных тел. Поскольку родительскими телами метеорных тел являются астероиды и кометы, изучение метеоров позволяет изучать астероиды и кометы, что дешевле космических миссий, но не заменяет их полностью.

Метеоры делятся на поточные, которые принадлежат к метеорным потокам, и спорадические, для которых не была определена принадлежность к какому-либо из известных потоков. Метеорный поток – совокупность метеоров, порождённых вторжением в атмосферу Земли роя метеорных тел с близкими орбитами и схожими параметрами. Наиболее известные из потоков: Персеиды, Геминиды, Леониды [Бронштэн, 1981].

Яркость метеора определяется звездной величиной. Звездная величина – мера освещённости, создаваемой небесным светилом на плоскости, перпендикулярной падающим лучам [Аллен, 1977]. Абсолютная звёздная величина метеора – это звёздная величина метеора, которую он имел бы, будучи видим в зените на расстоянии 100 км [Аллен, 1977]. Мелкими метеорными телами называют метеороиды диаметром от 100 мкм до 1 см [Campbell-Brown and Koschny, 2004], что примерно соответствует звездной величине не ярче -6^m .

Несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений, проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороида по наблюдательным данным остается до конца нерешенной. Детали взаимодействия метеорных частиц с атмосферой известны плохо, поэтому все их характеристики определяются с большими погрешностями. Большинство метеорных тел не достигают поверхности Земли, а значит невозможно исследовать их состав, поэтому их свойства приходится определять по косвенным признакам.

Наблюдения метеоров

В данной работе использовались данные наблюдений, проводимых в Звенигородской обсерватории Института астрономии Российской академии наук (ЗО ИНАСАН) и геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО «Михнево») ИДГ РАН [Карташова и др., 2017]. Пункты наблюдений располагаются на расстоянии 104 км. Для наблюдений используются широкоугольные (поле зрения $50^\circ \times 40^\circ$) телевизионные метеорные установки (состоящие из камер Watec LCL-902H Ultimate и объективов Computar 6/0.8), установленные неподвижно относительно сторон горизонта поля зрения. Предел звездной величины для метеоров (в безлунную ночь) $+4.5^m$. Максимальная область перекрытия камер располагается на высоте 100 км. Кроме того, для анализа использовались данные базисных наблюдений, полученные Канадской автоматизированной метеорной обсерваторией (The Canadian Automated Meteor Observatory (CAMO)). Расстояние между пунктами наблюдений составляет 45 км, на каждом пункте установлены две камеры: одна с широким полем зрения 28° , другая с узким – 1.5° . Широкоугольная камера используется для получения траектории, кривых светимости и торможения метеоров, а камера с узким полем зрения – для анализа морфологии метеора в полете. Предел звездной величины (по метеорам) у широкоугольной камеры составляет $+5^m$, у узкопольной $+10^m$ [Stokan and Campbell-Brown, 2015].

Модели абляции

Для оценки параметров метеорных тел (массы, плотности и др.) по наблюдательным данным используются модели абляции [Бронштэн, 1981; Лебединец, 1980]. Для определения параметров метеорных тел требуется подобрать такие начальные данные, которые позволят воссоздать наблюдения путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих высоту, скорость, массу и светимость в зависимости от времени.

Хотя моделирование процесса абляции позволяет оценить свойства метеора на основе данных наблюдений, определяемые параметры зависят от выбранной модели абляции и от используемых коэффициентов, которые в свою очередь связаны со свойствами материала и характера течения вокруг метеороида. Существуют две наиболее распространенные модели, описывающие взаимодействия метеора с атмосферой. Будем называть их модель А и модель Б.

В рамках модели А предполагается, что весь тепловой поток от набегающего потока газа расходуется на испарение материала поверхности. Уравнение потери массы тела имеет вид:

$$L \frac{dM}{dt} = -\frac{1}{2} c_h \rho_a V^3 S \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

где M , V – масса и скорость тела; t – время; S – площадь минимального сечения тела; ρ_a – плотность атмосферы на высоте полета; g – ускорение свободного падения; L – теплота абляции; c_h – коэффициент теплопередачи [Бронштэн, 1981].

Модель А чаще всего используется для моделирования достаточно больших тел (от 1 см) на средних и низких высотах, когда энергия набегающего потока настолько велика, что потерями энергии на другие процессы, кроме испарения, можно пренебречь. Обычно это происходит ниже так называемой высоты интенсивного испарения (110–130 км) [Бронштэн, 1981], но ее применяют и для субсантиметровых тел на высотах порядка 100 км [Stokan and Campbell-Brown, 2015].

На больших высотах для метеороидов маленьких размеров потери энергии на излучение с поверхности частицы и на нагрев самой частицы являются достаточно существенными. В этом случае предполагается, что набегающий поток расходуется на излучение, нагрев и испарение метеорного тела (модель Б), и уравнение сохранения энергии принимает вид:

$$\frac{1}{2} c_h \rho_a V^3 = 4\xi\sigma(T^4 - T_0^4) - \frac{L}{S} \frac{dM}{dt} + \frac{4}{3} R\rho c \frac{dT}{dt}. \quad (2)$$

Потеря массы частицы рассчитывается через давление насыщенного пара (уравнение Кнудсена-Ленгмюра):

$$\frac{dM}{dt} = -4\pi R p_v(T) \sqrt{\frac{\mu}{2\pi k T}} \quad (3)$$

где T – температура тела; p_v – давление насыщенного пара; μ – атомная масса; ρ – плотность тела; ρ_a – плотность атмосферы; R – радиус тела; L – теплота абляции; c_h – коэффициент теплопередачи, ε – излучательная способность; c – теплоемкость [Лебединец, 1980].

В обеих моделях уравнение сохранения энергии дополняется уравнениями движения:

$$M \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} c_d \rho_a V^2 S + Mg \sin \gamma \quad (4)$$

$$MV \frac{d\gamma}{dt} = Mg \cos \gamma - \frac{MV}{R_p} \cos \gamma \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dt} = -V \sin \gamma, \quad (6)$$

где M , V – масса и скорость тела; t – время; H – высота над поверхностью планеты; γ – угол наклона траектории (к горизонту); S – площадь минимального сечения тела; ρ_a – плотность атмосферы; g – ускорение свободного падения; R_p – радиус планеты; c_d – коэффициент сопротивления [Стулов и др., 1995].

Неопределенность параметров в моделях

Размер и плотность метеороида, определяемые по наблюдательным данным, зависят не только от подбираемых кривых светимости и торможения, но и от предположений о коэффициентах высвета, абляции, выражения для давления паров и т.д., используемых в модели абляции. Будем называть эти величины параметрами модели, хотя они определяются как свойствами метеорного тела, так и режимом его полета. Одним из плохо определенных параметров модели является эффективность излучения (коэффициент высвета), которая в принципе зависит как от химического состава тела, так и от его скорости и высоты полета. В обзоре [Subasinghe et al., 2017] показано, что используемые различными авторами зависимости эффективности излучения от скорости метеора различаются на несколько порядков.

В модели Б потеря массы определяется через давление насыщенного пара вещества метеороида, для которого разными авторами предлагаются заметно различающиеся зависимости для одного и того же вещества. Чаще всего используется зависимость давления от температуры в следующем виде:

$$\lg p_v = A - \frac{B}{T}, \quad (7)$$

где A и B – постоянные для данного вещества и могут изменяться для разных диапазонов температур. Константы A и B определяются экспериментально [Бронштэн, 1981].

В данной работе в основном использовались давления для каменного вещества из работ [Campbell-Brown and Koschny, 2004] и [Moses, 1992] как наиболее часто используемые в моделировании мелких метеорных тел.

Оценка параметров метеорного тела

При оценке параметров метеорного тела согласно некоторой модели взаимодействия метеороида с атмосферой необходимо сопоставить расчетные кривые

светимости и торможения и наблюдаемые [Stokan and Campbell-Brown, 2015]. Возможен также вариант оценки параметров тела при использовании только кривой светимости [Babadzhanov, 2002]. Для этого можно, изменяя параметры в ручном режиме, подбирать кривые или же рассчитывать множество вариантов и выбирать среди них лучший. В нашей работе поиск решения производился методом дифференциальной эволюции. Для этого была построена функция невязки (функция отклонения модельного решения от наблюдаемых данных), которую было необходимо минимизировать.

В качестве невязки бралось отношение модуля разницы расчетной и наблюдаемой интенсивности свечения к наблюдаемой, на высотах, где была известна наблюдаемая интенсивность. Для фиксации максимума расчетной кривой было введено ограничение, которое позволяло ему находиться только в диапазоне высот, где есть наблюдательные данные. Варианты, не удовлетворяющие этому условию, отбрасывались.

Невязка рассчитывалась по формуле:

$$\frac{\sum_{i=1,n} \left| \frac{I_i^H - I_i^P}{I_i^H} \right|}{n} \quad (8)$$

где I_i^H – наблюдаемая интенсивность, I_i^P – расчетная интенсивность, n – количество наблюдаемых точек.

Параметры, минимизирующие значения невязки, могут соответствовать одному из локальных минимумов, что может привести к ошибке в результате. Для поиска истинного минимума были выбраны независимые параметры (размер тела и коэффициент высвета). Из этих параметров создавалась сетка, и искомый минимум по невязке в ячейках этой сетки, что позволило найти истинный минимум.

Разработанная методика была применена к оценке параметров двух метеоров, зафиксированных на ГФО «Михнево» ИДГ РАН и ЗО ИНАСАН в 2016 году, и 9 метеоров, наблюдавшихся Канадской болидной сетью в 2010 году.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчётов для метеора 20101103_061127 (скорость входа 30.4 км/с, угол входа 67°), зафиксированного Канадской болидной сетью (параметры решения в табл.).

Таблица

Параметры модели и метеорного тела (20101103_061127)

Модель	Невязка	Радиус, (м)	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопередачи	Теплота абляции, 10 ⁶ Дж/кг	Высвет, %
A	0.121	0.0012	1288	0.49	3.98	0.97
B	0.118	0.0011	845	0.59	3,80	1.46
[Stokan and Campbell-Brown, 2015]		0.00052	2400	1	6.30	5

Обе используемые модели позволяют описать наблюдательные данные этого метеора (рис. 1, а, б). Размеры, полученные обеими моделями, близки друг к другу,

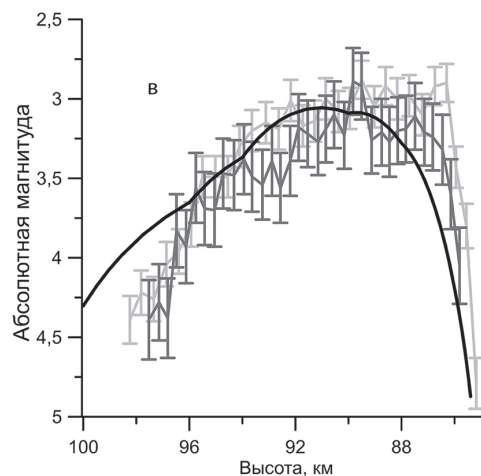
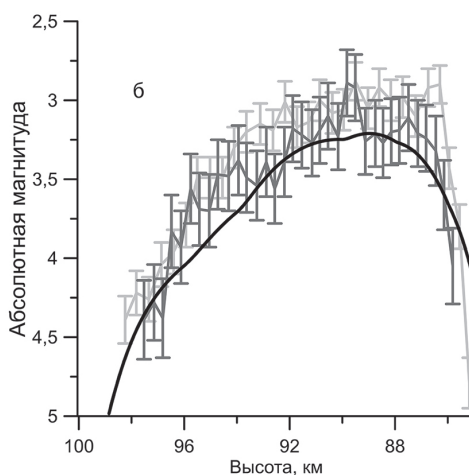
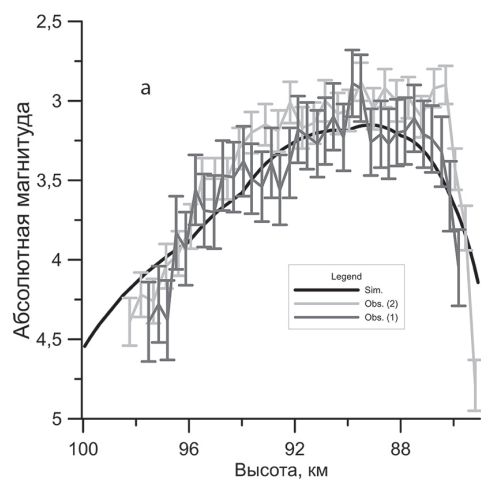


Рисунок. Сравнение наблюдаемой и модельной кривой светимости для метеора 20101103_061127 (скорость входа 30.4 км/с, угол входа 67°): а) – по модели А; б) – модель Б с давлением насыщенного пара из работы [Campbell-Brown and Koschny, 2004]; в) – результат моделирования по модели А из работы [Stokan and Campbell-Brown, 2015].

Для наблюдаемой кривой приведены данные с двух камер

плотности расходятся в полтора раза. Коэффициент теплопередачи и теплота абляции близки. Высвет различается в полтора раза. Сравнение результатов моделирования с оценками, полученными в [Stokan and Campbell-Brown, 2015], показывает, что наша аппроксимация ближе к наблюдательным данным. Размер, плотность, коэффициент теплопередачи, теплота абляции различаются в два раза, коэффициент высвета – в три-пять раз по сравнению с результатами Stokan and Campbell-Brown [2015]. Следует отметить, что в работе Stokan and Campbell-Brown [2015] коэффициенты высвета и теплопередачи, теплота абляции не варьировались.

Результаты

Анализ данных для 11 метеоров показал, что обе рассматриваемые модели (модель А и модель Б) позволяют описывать наблюдательные данные. Наилучшее согласие между наблюдаемой и модельной кривыми блеска достигается в рамках модели А для 3 метеоров из 11 (27%), в рамках модели Б – для 9 метеоров из 11 (82%). Один метеор хорошо описывается обеими моделями. Модель Б лучше подходит для моделирования взаимодействия мелких метеорных тел с атмосферой.

Оценка параметров моделей при исследовании показала, что эффективность высвета, получившаяся при моделировании, находится в пределах разброса литературных данных. Зависимость между оценкой эффективности высвета и используемой моделью не прослеживается. В целом, анализируя 11 метеоров нельзя сказать, что высвет можно определить достоверно, так как для отдельного метеора при использовании трех разных вариантов моделей эффективность высвета может достигать любого из значений диапазона.

Зависимости коэффициента теплопередачи от скорости не прослеживается. В целом, он варьируется в диапазоне 0.3–0.9, и в основном не достигает значения $c_h = 1$, которое чаще всего используется при моделировании. Таким образом, при моделировании мелких метеоров нельзя использовать приближение свободно молекулярного течения. Для модели А коэффициент варьируется в диапазоне от 0.3 до 0.5, а для модели Б – от 0.5 до 0.9. Оценки теплоты абляции, полученные при моделировании, находятся в диапазоне $3.8\text{--}7.3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Большая часть значений лежит в диапазоне $3.8\text{--}4.5 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИДГ РАН (рег. № 0146-2017-0003).

Литература

- Аллен К.У. Астрофизические величины // М. : Мир, 1977. – 447 с.
- Бронитэн В.А. Физика метеорных явлений // М. : Наука, 1981. – 416 с.
- Карташова А.П., Рыбнов Ю.С., Глазачев Д.О., Попова О.П., Болгова Г.Т. Изучение метеорных явлений по комбинированным наблюдениям / Триггерные эффекты в геосистемах: материалы IV-й Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6–9 июня 2017 г.). ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2017. С. 483–489.
- Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве // Метеоры. Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.
- Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. Аэродинамика болидов. М. : Наука. Физматлит, 1995. – 240 с.
- Babadzhanov P.B. 2002. Fragmentation and densities of meteoroids. *Astron. Astrophys.*, 384(1), 317–321.
- Campbell-Brown M.D., and Koschny D. 2004. Model of the ablation of faint meteors. *Astron. Astrophys.*, 418, 751–758.
- Moses J.I. 1992. Meteoroid ablation in Neptune's atmosphere. *Icarus*, 99, 368–383.
- Stokan E., Campbell-Brown M.D. 2015. A particle-based model for ablation and wake formation in faint meteors. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 447, 1580–1597.
- Subasinghe D., Campbell-Brown M., and Stokan E. 2017. Luminous efficiency estimates of meteors -I. Uncertainty analysis. *Planet. Space Sci.*, 143, 71–77.