

На правах рукописи



Грицевич Мария Игоревна

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ  
МЕТЕОРОВ И БОЛИДОВ

01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы

01.03.04. Планетные исследования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2008

Работа выполнена в Московском Государственном Университете имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор Стулов Владимир Петрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
Багров Александр Викторович

доктор физико-математических наук,  
профессор Турчак Леонид Иванович

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие  
«Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится 19 марта 2009 года в 14<sup>00</sup> на заседании Диссертационного совета Д 002.058.01 при Институте математического моделирования РАН по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММ РАН

Автореферат разослан 25 декабря 2008 года

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.058.01,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Змитренко Николай Васильевич

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью создания универсальных методов, позволяющих корректно определять параметры метеоров и болидов по наблюдательным данным. Для наблюдений метеоров организовывается работа фотографических патрульных служб, состоящих из нескольких станций. Станции располагают на достаточно большом расстоянии (порядка 100 км) и снабжают специальными камерами, непрерывно фотографирующими значительную часть неба. Такого рода наблюдения ведутся в географически различных регионах уже более полувека, при этом интенсивно развиваются как сами болидные сети, так и инструментальные методы наземных наблюдений. К сожалению, гораздо более скромными темпами совершенствуются методы обработки зарегистрированных наблюдателями данных. Так, из многих тысяч сфотографированных в атмосфере метеорных тел, до сих пор удалось обнаружить и идентифицировать всего лишь несколько метеоритных падений. Напротив, подавляющее большинство в метеоритных коллекциях составляют «находки», т.е. метеориты, найденные случайно.

Правильное математическое моделирование метеорных явлений способствует формированию фундаментальных представлений о материи в космосе. Полученные более надежные данные о массах и коэффициентах абляции вторгающихся тел имеют значение для ряда приложений - исследования астероидно-кометной безопасности, разработки мер планетарной защиты, а также для обоснованного и своевременного поиска тел, способных достичь поверхности Земли.

## Цели и задачи работы

Главной целью работы является построение концептуально нового метода обработки наблюдений метеоров и болидов, позволяющего изучать движение метеорных тел и правильно определять их основные параметры. На основе разработанного метода анализируются доступные экспериментальные данные. В частности, в работе проводится:

- исследование и сопоставление основных теоретических зависимостей, используемых при аппроксимациях наблюдаемых траекторий движения метеорных тел,
- определение области допустимых значений параметров задачи, при которых использование применяемого ранее приближенного решения имеет физический смысл,
- расчет по одним и тем же начальным данным новым и предшествующим способом, с целью оценки относительной погрешности последнего на конкретных примерах,
- получение надежных числовых значений параметра уноса массы и баллистического коэффициента по реальным наблюдениям ярких метеоров Канадской болидной сети и Прерийной сети США,
- оценка массы метеорных тел в начальной и в последующих точках траектории,
- оценка характерных высот, соответствующих различным режимам обтекания метеорного тела

Научная новизна работы заключается в разработанном методе обработки наблюдений метеоров и болидов. В основу метода впервые положена и реализована идея аппроксимации данных наблюдений непосредственно аналитическим решением уравнений метеорной физики. В новом методе полностью снято ограничение на величину параметра уноса массы (и на величину коэффициента абляции), что позволило изучить движение метеорных тел и корректно определить их параметры, в том числе и в условиях значительного уноса массы.

Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные положения:

Получено предельное значение параметра уноса массы, при котором приближенное решение применимо для описания траектории в рамках рассматриваемой модели во всем теоретически возможном диапазоне скоростей.

Сформулирована система уравнений, решением которой определяются искомые параметры метеорных тел; получено достаточное условие, позволяющее проверить корректность найденного решения.

Путем численного решения полученной системы определены значения параметра уноса массы и баллистического коэффициента для ряда фотографически зарегистрированных метеорных тел. Построены новые модели входа для болидов Пржибрам, Лост Сити, Иннисфри, Нойшванштайн.

На основе аналитического решения уравнений метеорной физики получена формула для вычисления ускорения метеорного тела.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, базируется на использовании общепризнанных моделей физических явлений, методов и подходов газовой динамики, проверенных численных методов. Все численные методы и программы, использованные при получении результатов, тщательно проверялись на известных решениях и специальных тестах. Правильность выбранных теоретических подходов подтверждается результатами, полученными в работе на основе анализа атмосферных траекторий известных болидов, после фотографической регистрации которых на поверхности Земли были найдены метеориты. В частности, оценки массы болидов, оставшейся в заключительной части траекторий, хорошо согласуются с общей массой обнаруженных метеоритов во всех рассмотренных случаях.

#### Практическая ценность

Полученные достаточно надежные числовые значения параметра уноса массы и баллистического коэффициента позволяют аппроксимировать имеющиеся наблюдательные данные. Эти значения необходимы для последующей оценки других ключевых параметров таких, как внеатмосферная масса, размерный коэффициент абляции, эффективная энтальпия испарения метеорных тел. Кроме того, владея информацией о массе тела на заданной высоте, в зависимости от его плотности, можно оценить его характерный размер, определяющий режим течения в лобовой части ударного слоя.

Развитый метод по определению динамических оценок, убедительно доказывает несостоятельность концепции существующего фотометрического подхода, господствующего сегодня в литературе, и в дальнейшем мог бы способствовать развитию более правильной интерпретации светимости метеорных тел, с учетом основных физических факторов, способных влиять на эту величину.

### Апробация

Работы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на научных семинарах кафедры аэромеханики и газовой динамики (под руководством академика РАН Г.Г.Черного), кафедры газовой и волновой динамики (под руководством академика РАН Е.И.Шемякина) механико-математического факультета МГУ, на научных семинарах в НИИ Механики МГУ (под руководством академика Г.Г.Черного, проф., д.ф.-м.н. В.П.Стулова), в Институте астрономии РАН (под руководством д.ф.-м.н. М.А.Смирнова), в Институте Небесной механики и расчета эфемерид ИМССЕ (Париж, Франция), в Институте Математического Моделирования РАН (под руководством проф., д.ф.-м.н. Е.И.Леванова), в Вычислительном центре РАН им. А.А.Дородницына (под руководством д.ф.-м.н. В.И.Зубова), где получили высокую оценку.

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались в школе-семинаре “Современные проблемы аэрогидродинамики”, Туапсе, “Буревестник” МГУ, 2006 г., на Ломоносовских чтениях МГУ, 2006 г., на конференции-конкурсе молодых ученых, Москва, НИИ Механики МГУ, 2005, 2006, 2007 гг., на VI-й научно-технической конференции «Молодежь в науке», Саров, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007 г., а также были представлены на ряде международных конференций, в том числе на Европейском конгрессе по науке о планетах в 2006 (Берлин, Германия), в 2007 (Потсдам, Германия) и в 2008 гг. (Мюнстер, Германия), на конференции по Планетарной защите, 2007 г., (Вашингтон, США), на Международной Метеорной конференции ИМС, в 2007 (Барез, Франция) и в 2008 гг. (Банска-Быстрица, Словакия), на конференции Метеороиды, 2007 г., (Барселона, Испания), на 37-ой Научной Ассамблее Комитета по Космическим Исследованиям (Монреаль, Канада) в 2008 г.

Опубликованные работы отмечены дипломами победителя конкурсов научных работ на присуждение грантов поддержки талантливых студентов, аспирантов и молодых ученых МГУ им. М.В. Ломоносова 2006 и 2007 гг. (цикл статей «Исследование метеорных явлений в атмосфере Земли методами математического моделирования» в 2006 г. и цикл работ «Определение внеатмосферных масс метеороидов на основе наблюдений» в 2007 г.). Дипломная работа автора «Определение внеатмосферных масс болидов Канадской сети» заняла второе место на ежегодном конкурсе курсовых и дипломных работ механико-математического факультета МГУ в 2007 г.

#### Публикации и личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты опубликованы в 25 научных работах. Все основные результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК. Автором осуществлялась идейная постановка развитого метода интерпретации наблюдений метеоров и болидов, его реализация; написание программы для решения полученных трансцендентных уравнений; проведение численных расчетов; анализ экспериментальных данных и их сравнение с результатами, полученными в рамках других моделей; подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 118 страницах, включает в себя 12 рисунков, 14 таблиц, 108 библиографических ссылок.

## **II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, приведен обзор существующих методов и предположений, применяемых при оценке параметров метеорных тел, обозначены цели и задачи диссертационной работы, ее научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** сформулирована газодинамическая задача о движении метеороидного тела с очень большими скоростями в среде с сопротивлением, приведены основные дифференциальные уравнения движения и их известное аналитическое решение [1]:

$$m = \exp\left(-\frac{\beta}{1-\mu}(1-v^2)\right) \quad (1)$$

$$y = \ln \alpha + \beta - \ln \frac{\Delta}{2}, \quad \Delta = \bar{\text{Ei}}(\beta) - \bar{\text{Ei}}(\beta v^2), \quad \bar{\text{Ei}}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^z dz}{z}, \quad (2)$$

отражающее зависимость формы светящегося участка траектории от двух безразмерных параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , характеризующих торможение и абляцию метеороидного тела в атмосфере:

$$\alpha = \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0 S_e}{M_e \sin \gamma}, \quad \beta = (1-\mu) \frac{c_h V_e^2}{2c_d H^*}. \quad (3)$$

В формулах (3) угол траектории  $\gamma$ , коэффициенты сопротивления  $c_d$  и теплообмена  $c_h$ , а также эффективная энтальпия разрушения  $H^*$  – постоянные величины. Безразмерные переменные введены следующим образом:  $M=M_e m$ ,  $V=V_e v$ ,  $h=h_0 y$ ,  $S=S_e s$  ( $M, V$  – масса и скорость тела,  $M_e, V_e$  – масса и скорость тела в момент входа в атмосферу,  $h$  – высота над поверхностью планеты,  $h_0$  – высота однородной атмосферы,  $S$  – площадь миделева сечения тела,  $\rho_0$  – плотность атмосферы у поверхности планеты). В выражении для  $\beta$  участвует параметр изменения формы метеороида  $\mu$ , позволяющий записать закон изменения формы тела в следующем виде:  $\mu = \log_{ms}$ .

Из-за наличия интегральной экспоненты, аналитическое решение (2) ранее заменялось приближенным выражением, справедливым при ограниченных значениях параметра уноса массы  $\beta$ , и аппроксимирующем зависимость самого решения (2) от параметра  $\beta$  линейной функцией [1]:

$$y = \ln \alpha - \ln(-\ln v) + 0,83\beta(1-v) \quad (4)$$

Очевидно, использование аппроксимации (4) понижает точность дальнейших расчетов. Методы оказываются менее эффективными, а полученные с их помощью результаты – менее достоверными. Более того, при любом  $\beta > e/0.83 \approx$

3.275, функция (4) имеет на интервале  $0 < v < 1$  два локальных экстремума и корректно использовать ее, в качестве приближения функции (2), возможно лишь на ограниченном, начальном участке, где функция (4) монотонна [2].

Другими словами возникает необходимость в новом методе интерпретации наблюдений, преимуществом которого будет использование непосредственно аналитического решения (2), без перехода к упрощенному выражению (4).

Строгий математический алгоритм подбора параметров, при которых теоретическая зависимость высоты от скорости движения болида (2) наилучшим образом аппроксимирует данные наблюдений на светящемся участке траектории изложен **во втором разделе**.

Итак, пусть известны значения высоты и скорости полета в отдельных точках –  $h_i$  и  $V_i$ , ( $i=1, \dots, n$ ),  $n \geq 3$ , где  $V_e = V_1$  – начальная скорость входа. Баллистический коэффициент  $\alpha$  характеризует интенсивность торможения, так как он пропорционален отношению массы столба атмосферы с поперечным сечением  $S_e$  вдоль траектории к массе тела. Параметр уноса массы  $\beta$  пропорционален отношению доли кинетической энергии единицы массы тела, поступающей к телу в виде тепла, к эффективной энтальпии испарения. Поэтому при подборе этих параметров основной акцент следует делать на наилучшую аппроксимацию именно того участка траектории, где торможение и абляция достаточно четко выражены. Другими словами, особую ценность представляют собой наблюдения на заключительном этапе, предшествующем полному погасанию болида. Универсальным алгоритмом решения такой задачи является применение взвешенного метода наименьших квадратов, позволяющего регулировать вклад тех или иных данных в результат. С другой стороны, расстановка весов вручную затруднила бы исследование, сделала бы его недостаточно объективным. Заметим, что по мере приближения метеорного тела к поверхности Земли значения высоты и скорости полета уменьшаются, поэтому к корректному результату удастся прийти, переходя от рассмотрения самих  $y$  к  $e^{-y}$ , т.е. путем использования зависимости (2) в следующей форме:

$$2\alpha \exp(-y) - \Delta \exp(-\beta) = 0, \quad \Delta = \bar{E}_i(\beta) - \bar{E}_i(\beta v^2), \quad \bar{E}_i(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t dt}{t} \quad (5)$$

Если бы существовали такие значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых все пары  $y_i=h_i/h_0$ ,  $v_i=V_i/V_e$  в точности удовлетворяли (5), то, очевидно, теоретическая кривая (2) с этими параметрами проходила бы через все точки наблюдений. Будем искать оценки для  $\alpha$  и  $\beta$ , основываясь на минимизации суммы квадратов значений левой части соотношения (5):

$$Q_4(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n (F_i(y_i, v_i, \alpha, \beta))^2, \quad (6)$$

где  $F_i(y_i, v_i, \alpha, \beta) = 2\alpha \exp(-y_i) - \Delta_i \exp(-\beta)$ ,  $\Delta_i = \bar{E}i(\beta) - \bar{E}i(\beta v_i^2)$ .

Тогда искомые параметры однозначно определяются следующими условиями:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n e^{-\beta-y_i} \cdot \Delta_i / (2 \sum_{i=1}^n e^{-2y_i}), \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ \left( \Delta_i \left( \sum_{i=1}^n \exp(-2y_i) \right) - \left( \sum_{i=1}^n \Delta_i \exp(-y_i) \right) \exp(-y_i) \right) \cdot \left( \Delta_i - (\Delta_i)'_{\beta} \right) \right] = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n e^{-2y_i} \sum_{i=1}^n (((\Delta_i)'_{\beta} - \Delta_i)^2 + (\Delta_i - 2\alpha \exp(\beta - y_i))) ((\Delta_i)''_{\beta} - 2(\Delta_i)'_{\beta} + \Delta_i)}{\left( \sum_{i=1}^n \exp(-y_i) (\Delta_i - (\Delta_i)') \right)^2} > 1 \quad (9)$$

Здесь  $\Delta_i = \bar{E}i(\beta) - \bar{E}i(\beta v_i^2)$ ,  $(\Delta_i)'_{\beta} = \frac{d\Delta_i}{d\beta}$ ,  $(\Delta_i)''_{\beta} = \frac{d^2\Delta_i}{d\beta^2}$ .

Решение полученной системы разбивается на следующие этапы. Сначала численно, при помощи метода Ньютона, находим  $\beta$ , удовлетворяющее (8). При этом, в качестве начального приближения  $\beta_0$ , можем взять  $\beta$ , вычисленное методом  $Q_3(\alpha, \beta)$  на основе приближенного решения (4) [3]. Далее, по известному  $\beta$ , вычисляем  $\alpha$  по формуле (7). Наконец, проверяем, выполняется ли для найденной пары Критерий Сильвестра, окончательно записывающийся для функции  $Q_4$  в виде (9). Как показывает практика, существует два различных решения уравнения (8), при этом искомой точке минимума соответствует меньшее значение  $\beta$ . Вторая пара определяет для функции  $Q_4$  седловую точку (для которой условие (9) не выполняется). В этом случае процедуру поиска решения следует повторить, начиная с другого начального приближения  $\beta_0$ .

Отметим, что численный результат практически не меняется при включении в  $Q_4$  наблюдаемых точек траектории с близкими к единице значениями  $v_i$ , эти точки вносят близкие к нулю слагаемые в саму сумму (6) и, как следствие, в соотношение (8). Это обстоятельство дополнительно свидетельствует о целесообразности применения пробной функции в форме (5), позволяющей включать в (6) весь имеющийся наблюдательный базис  $(y_i, v_i)$ , не отбрасывая заранее точки с малым торможением и абляцией.

**В третьем разделе** приведены аргументы в пользу возможности применения построенной модели к наблюдениям дробящихся метеорных тел. Фактически, величина параметра  $\beta$ , задаваемая соотношениями (8)-(9), отражает интенсивность уноса массы метеорного тела, происходящего на всем исследуемом участке траектории как вследствие испарения и оплавления наружного слоя с последующим сдуванием жидкой пленки набегающим воздушным потоком, так и вследствие отделения от родительского тела вторичных по размерам фрагментов.

**В четвертом разделе** описаны предшествующие методы интерпретации наблюдений, часть из которых была развита с участием автора. Методы, изложенные в этом разделе, подразумевают изначальную замену аналитического решения уравнений метеорной физики приближенным (4). С целью сравнения результатов, при помощи различных методов проведен расчет по одним и тем же начальным данным. В частности, анализ данных показывает, что при использовании метода  $Q_3$  во всех случаях оценки для баллистического коэффициента  $\alpha$  оказались завышены, в среднем отличие составляет около 5%, за исключением тех случаев, где значение  $\beta$  больше 3. Отметим, что при небольших  $\beta < 1$ , когда уравнение движения (2) можно надежно заменить соотношением (4), метод  $Q_3$  можно применять с хорошей точностью. По результатам расчетов новым методом  $Q_4$  приведена гистограмма, отражающая количество значений параметра уноса массы в различных диапазонах. Видно, что большая часть метеорных тел обладает малыми либо умеренными значениями параметра уноса массы  $\beta$ .

**В главе 2** новый метод был применен к наблюдениям ярких метеоров Канадской болидной сети, Прерийной сети, США, а также к наблюдениям болида Бенешов, одного из крупнейших, зарегистрированных Европейской сетью, по-

сколькx для этого болида имеются достаточно подробные наблюдения (46 точек). Примеры аппроксимации наблюдений с использованием найденных значений  $\alpha$ ,  $\beta$  показаны на рис. 1. Из аналитической записи уравнения (2) хорошо видно, что форма траектории полностью определяется параметром уноса массы. Значение баллистического коэффициента показывает лишь насколько «поднята» кривая над осью абсцисс. Поэтому при построении графиков разобрано несколько принципиально различных случаев, в зависимости от величины параметра  $\beta$ .

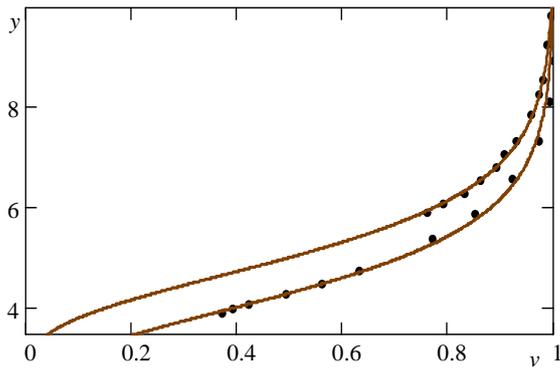


Рис. 1 (а)

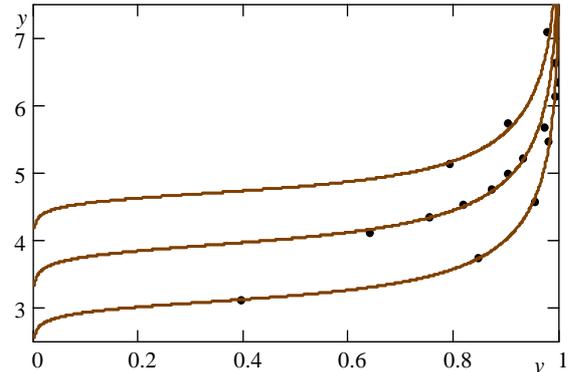


Рис. 1 (б)

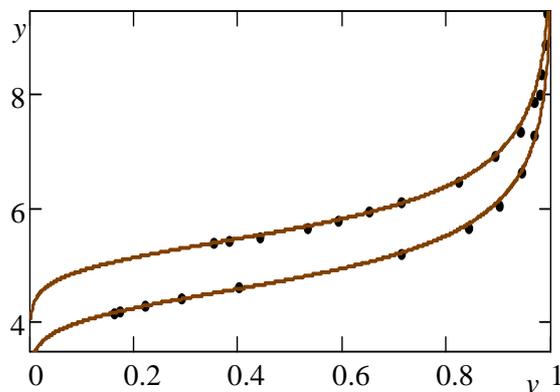


Рис. 1 (в)

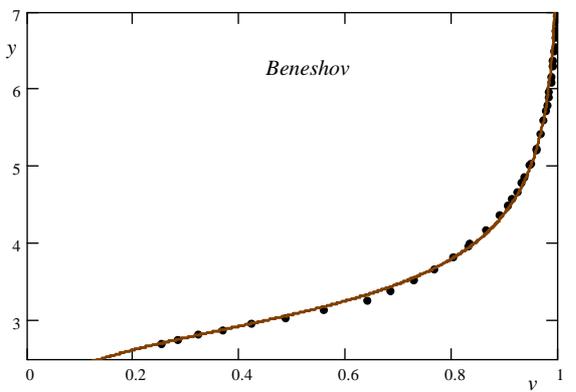


Рис. 1 (з)

**Рис.1. Аппроксимация экспериментальных данных для некоторых болидов: сплошная линия – аналитическая зависимость (2), точки – данные наблюдений; выбрано 4 случая: (а) – № 498, 580 при  $\beta = 0$ , (б) – № 39681\*, 204, 39470\* при  $\beta > 3$ , (в) – № 567, 925 при  $\beta \sim 1.5$ , (з) – болид Бенешов,  $\beta = 1,754$ .**

Результаты расчетов позволяют оценить начальную массу метеорного тела по интенсивности его торможения в атмосфере (второй раздел главы 2).

Действительно, используя формулу для вычисления коэффициента формы тела при входе в атмосферу:  $A_e = S_e / W_e^{2/3}$ , перепишем выражение (3) для баллистического коэффициента  $\alpha$  следующим образом

$$\alpha = \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0}{\sin \gamma} \frac{A_e}{\rho_m^{2/3} M_e^{1/3}} \quad (10)$$

Тогда внеатмосферная масса  $M_e$  может быть оценена как

$$M_e = \left( \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0}{\alpha \sin \gamma} \frac{A_e}{\rho_m^{2/3}} \right)^3 \quad (11)$$

В формуле (11) используются известные параметры: плотность атмосферы на уровне моря  $\rho_0$ , высота однородной атмосферы  $h_0$ , угол траектории с горизонтом  $\gamma$ , а также параметры, определяемые на основе физических теорий или специальных гипотез: коэффициент сопротивления  $c_d$ , плотность тела  $\rho_m$ , коэффициент начальной формы  $A_e$ . Полученные оценки указывают на то, что в большинстве случаев фотометрическая формула неверно предсказывает внеатмосферную массу метеороидов. **В третьем разделе** объяснена одна из причин этого обстоятельства. С этой целью вычисляются характерные высоты для траекторий крупных болидов, зарегистрированных Канадской наблюдательной сетью:

$h_l$  – высота, на которой характерный размер тела  $L$  равен длине свободного пробега молекул воздуха,

$h_{sw}$  – высота, ниже которой обтекание эквивалентной сферы радиуса  $R$  происходит в так называемом режиме тонкого вязкого ударного слоя, т.е. высота, на которой впервые (с уменьшением высоты после свободно-молекулярного обтекания) образуется тонкая ударная волна,

$h_{bl}$  – высота, соответствующая образованию тонкого пограничного слоя на эквивалентной сфере.

Далее полученные значения сравниваются с величинами  $h_b$ ,  $h_{ml}$ ,  $h_t$  – высотами начала светящегося сектора траектории, максимальной светимости и окончания светящегося сектора, заимствованными из наблюдений (таб. 1). Результаты расчетов свидетельствуют, что основная часть светящегося сектора траекторий исследуемых болидов лежит в условиях обтекания в режиме сплошной среды, а условие свободно-молекулярного обтекания находится вне его пределов, за ис-

ключением болида 567, где это условие относится лишь к самому началу траектории. Для всех рассмотренных болидов – высота максимального свечения меньше высоты образования мощной головной ударной волны. Это позволяет предположить, что в данных условиях существенный вклад в светимость болида дает воздух в сжатом ударном слое, а не свечение паров материала тела, как это требуется для обоснования применимости известной фотометрической формулы [4]. Таким образом, физико-механические параметры крупных метеорных тел – болидов, полученные на основе вычисленной фотометрическим методом массы, крайне не надежны.

**Таблица 1.** Характерные значения высот для траекторий крупных болидов.

№	$L$ , см	$R$ , см	$h_l$ , км	$h_{sw}$ , км	$h_{bl}$ , км	$h_b$ , км	$h_{ml}$ , км	$h_t$ , км
18	4,8	9,2	89,0	69,4	55,2	75,5	44,9	27,5
169	3,9	7,5	87,5	67,9	53,8	78,9	44,2	34,0
189	4,9	9,5	89,3	69,7	55,4	75,5	55,6	27,9
195	3,2	6,1	86,1	66,4	52,5	77,4	40,6	30,4
204	12,1	23,4	95,7	76,3	61,2	61,9	40,6	29,5
219	6,8	13,2	91,6	72,1	57,5	67,7	33,5	26,1
223	11,1	21,3	95,0	75,6	60,6	78,5	49,0	27,1
276	4,3	8,3	88,2	68,6	54,4	81,8	32,4	24,4
285	10,0	19,2	94,3	74,9	60,0	58,8	35,0	19,8
288	10,2	19,6	94,5	75,0	60,1	68,6	29,2	20,2
307	8,3	15,9	93,0	73,5	58,7	78,2	36,0	22,0
331	3,6	6,9	87,0	67,3	53,3	71,4	50,7	31,0
567	3,9	7,4	87,5	67,9	53,8	91,4	56,4	38,7
672	4,9	9,4	89,2	69,6	55,3	65,5	35,9	32,7
683	3,0	5,8	85,7	66,0	52,2	73,4	45,0	33,1
687	4,6	8,8	88,7	69,1	54,8	77,3	49,0	28,9
840	3,9	7,5	87,6	68,0	53,9	78,7	42,2	27,7
872	6,3	12,1	91,0	71,5	57,0	67,7	35,9	20,8
888	3,4	6,6	86,6	66,9	52,9	75,1	49,5	29,2
925	15,5	30,0	97,5	78,2	62,8	91,2	47,6	29,8

**Четвертый раздел** посвящен оценке динамической массы тела в заключительной части траектории. Результат согласуется с независимыми оценками ка-

надских авторов [5]. Показано, что фотометрическая оценка массы метеорного тела не соответствует массе, обеспечивающей его наблюдаемое торможение.

**В главе 3** построена новая модель входа в атмосферу болида Нойшванштайн, сфотографированного в Германии 6 апреля 2002 года и найденного в виде трех фрагментов метеорита в ходе последующих поисков на территории, предсказанной в наблюдениях. Форма метеорного тела задана в виде куба со скругленными вершинами и ребрами. Оценка массы метеорного тела при входе в атмосферу оказалась близка к литературным данным, полученным в результате сейсмического, акустического и инфразвукового анализа. Отмечено, что впервые в анализе данного болида фотометрический подход в мировой литературе не использовался.

**Глава 4** посвящена детальному исследованию атмосферных траекторий болидов, после фотографической регистрации полета которых на поверхности Земли были найдены метеориты (таблица 2). В двух последних столбцах таб. 2 приведены найденные по формулам (7)-(9) значения баллистического коэффициента  $\alpha$  и параметра уноса массы  $\beta$ .

**Таблица 2.** Падения, зафиксированные специальными болидными сетями.

Название метеорита	Страна падения	Год падения	Найденная масса, кг	Тип	$\alpha$	$\beta$
Пржибрам	Чехословакия	1959	5,8	H5	8,34	13,64
Лост Сити	США	1970	17,2	H5	11,11	1,16
Иннисфри	Канада	1977	4,58	L5	8,25	1,70
Нойшванштайн	Германия	2002	6,2	EL6	3,92	2,57

Помимо качественных фотографических снимков движения в атмосфере для болидов таб. 2 достоверно известны значения плотности, а также форма частей метеорных тел, достигших поверхности Земли. Интерес к анализу атмосферных траекторий болидов, достигших поверхности Земли, объясняется еще и тем, что в процессе движения, с момента входа в атмосферу до падения, такие болиды испытывают все возможные режимы обтекания.

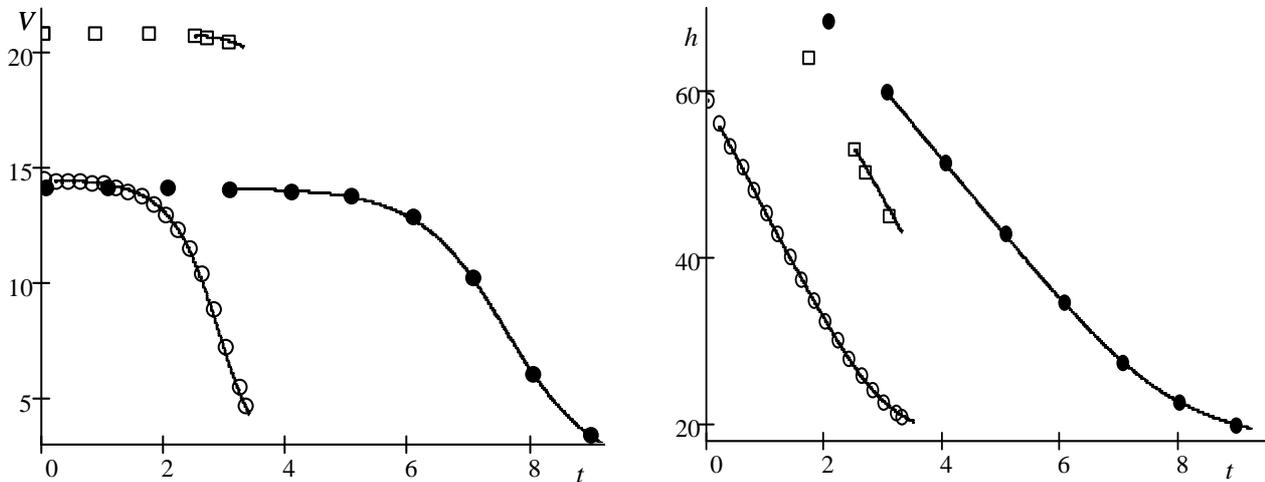
Для получения более точных оценок начальной массы рассматриваемых болидов проведена оценка наиболее вероятной формы родительских тел. Для контроля проведен альтернативный расчет, подразумевающий классическое для метеорной физики предположение о сферической исходной форме тела. С учетом последних результатов численных экспериментов по сверхзвуковому обтеканию тел различных форм [6] вычислена внеатмосферная масса тел, получены динамические оценки массы в других точках траектории. В отличие от монографии [1], где рассматривался случай ориентированного движения тела с сохранением площади миделева сечения, в данной работе расчеты проведены с учетом возможного изменения площади миделева сечения, т.е. при различных предположениях о величине параметра изменения формы тела  $\mu$ .

Отмечено, что в некоторых случаях, чаще всего – с целью получения оценок массы вероятно выпавших метеоритов, наблюдатели вычисляют динамическую массу тела в нижней части траектории. Эти вычисления проводятся с использованием локальных значений ускорения тела  $\frac{dV}{dt}$ , получаемых путем численного дифференцирования наблюдаемой зависимости  $V(t)$ . С другой стороны, используемая модель позволяет определить величину  $\frac{dy}{dv}$  непосредственно из самого решения (2). Последующая подстановка геометрического соотношения вдоль траектории  $dh = -V \sin \gamma dt$  в полученное выражение дает следующий результат:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V_e \sin \gamma}{h_0} \cdot v \frac{\Delta}{\Delta'}, \text{ где } \Delta' = \frac{d\Delta}{dv}, \Delta = \bar{E}i(\beta) - \bar{E}i(\beta v^2) \quad (12)$$

Численное решение дифференциального уравнения (12) позволяет полностью реконструировать движение на светящемся участке траектории. В частности, полученные с помощью этого решения графики теоретической зависимости размерной скорости и размерной высоты от времени для исследуемых болидов представлены на рис. 2. В качестве начального условия при решении уравнения (12) для каждого случая была выбрана первая точка исходных данных, в которой наблюдаемая скорость в достаточной степени отличалась от начальной скорости входа. Под такой точкой будем понимать первую «общую» точку наблюдений и

аналитического решения (2): функция (2) имеет вертикальную асимптоту  $v = 1$ , в то время как в реальных наблюдениях точке со значением скорости  $v = 1$  соответствуют конечные значения высоты, заведомо заданные с определенной погрешностью.



**Рис. 2. Графики полученной теоретической зависимости размерной скорости (а) и размерной высоты (б) от времени для болидов Иннисфри, Лост Сити и Пржибрам. Для сравнения нанесены данные наблюдений Иннисфри (кружки), Лост Сити (точки) и Пржибрам (квадратики).**

Полученные в разделе 4.6 оценки оставшейся массы болидов в нижней части анализируемых траекторий хорошо согласуются с общей массой найденного метеоритного вещества во всех рассмотренных случаях.

В заключение в таблице 3 приведем значения начальных масс ( $M$ ) болидов Пржибрам, Лост Сити и Иннисфри, полученных автором с учетом форм индивидуальных фрагментов. Для сравнения даны значения начальной массы болидов, определенные ранее по динамике входа [7];  $M_{ph}$  – фотометрическим методом; внеатмосферные массы, полученные на основе анализа следов, вызванных космическим излучением, опубликованные в [11] и в [13]; а также оценки [12], полученные путем пошагового пересчета параметров из уравнений метеорной физики (включая фотометрические зависимости), с учетом массы выпавшего вещества в качестве начальных данных. В последней строке приведены «начальные скорректированные фотометрические массы» [11].

**Таблица 3.** Сопоставление оценок начальной массы.

	Пржибрам	Лост Сити	Иннисфри
$\rho_m, \text{г/см}^3$	3,7	3,73	3,5
$M, \text{кг}$	316,97	168,53	178,77
$M^{[7]}, \text{кг}$	1300	52	18
$M_{ph}, \text{кг}$	21500 <sup>[8]</sup>	490 <sup>[9]</sup>	318 <sup>[10]</sup>
$M^{[11]}, \text{кг}$	320	65	?
$M^{[12]}, \text{кг}$	–	165	42
$M^{[13]}, \text{кг}$	250	210	–
$M^{[11]}, \text{кг}$	1700	38	25

Помимо приведенных в таб. 3 опубликованы и другие оценки начальных масс рассматриваемых болидов. Так, после калибровки величины коэффициента эффективности излучения  $\tau$  (подробнее об этом написано **во введении**), фотометрическая масса Иннисфри составила уже 46 кг [5], а внеатмосферная масса, определяемая авторами [5] путем сложения фотометрической и «суммарной выпавшей» масс, 51 кг. Фотометрическая оценка массы болида Пржибрам была снижена до 11000 кг [14] и до 1300 кг [15].

Динамическая оценка начальной массы метеороида Лост Сити, полученная для сферической формы составила 32-50 кг [1], после учета плиточной формы фрагментов метеорита Лост Сити получен другой диапазон значений  $M_c$ : 157-245 кг [16].

**В заключении** приведены основные результаты диссертации, выносимые на защиту, сформулированы выводы и обозначены перспективы для дальнейшей работы.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. Аэродинамика болидов. М.: Наука, 1995, 236 с.

2. *Грицевич М.И.* Анализ траекторий болидов и условия образования кратеров // Труды конференции-конкурса молодых ученых 12-17 октября 2005 г. Под ред. акад. Черного Г.Г., проф. Самсонова В.А. Изд-во МГУ, 2006, стр. 158-165.
3. *Грицевич М.И., Стулов В.П.* Внеатмосферная масса болидов Канадской сети // Астрон. вестник, 2006, т. 40, № 6, стр. 522-529.
4. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере и в космическом пространстве. Метеоры. Л.: Гидрометеиздат, 1980, 250 с.
5. *Halliday I., Griffin A.A., Blackwell A.T.* Detailed data for 259 fireballs from the Canada camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids // Meteoritics & Planetary Science, 1996, V. 31, p. 185-217.
6. *Ждан А.И., Стулов В.П., Стулов П.В., Турчак Л.И.* Коэффициенты сопротивления тел метеоритных форм // Астрон. вестник. 2007, т. 41, № 6, стр. 544-547.
7. *ReVelle D.O., Rajan R.S.* On the luminous efficiency of meteoritic fireballs // Journal of Geophysical Research, 1979, V. 84, p. 6255-6262.
8. *Ceplecha Z.* Fireballs photographed in central Europe // Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia, 1977, V. 28, № 6, p. 328-340.
9. *Мак-Кроски Р.Е., Шао Ц.И., Позен А.* Болиды Прерийной сети. 1. Общие сведения и орбиты // Метеоритика. Изд-во АН СССР, 1978, Вып. 37, стр. 44-59.
10. *ReVelle D.O.* A predictive macroscopic integral radiation efficiency model // Journal of Geophysical Research, 1980, V. 85, p. 1803-1808.
11. *Wetherill G.W., ReVelle D.O.* Which fireballs are meteorites— A study of the Prairie Network photographic meteor data // Icarus, 1981, V. 48, p. 308-328.
12. *Ceplecha Z., ReVelle D.O.* Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere // Meteoritics & Planetary Science, 2005, V. 40, № 1, p. 35-54.
13. *Bagolia C., Bhandari N., Sinha N., Goswami J.N., Lal D., Lorin J.C., Pellas P.* Multiple fall of Příbram meteorites photographed. XII - Pre-atmospheric size of the Příbram meteorite based on studies of fossil cosmic ray tracks and spallation products // Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia, 1980, V. 31, p. 51-58.
14. *Ceplecha Z.* Impacts of meteoroids larger than 1 m into Earth's atmosphere // Astronomy and Astrophysics, 1994, V. 286, p. 967-970.

15. *Borovička J., Kalenda P.* The Morávka meteorite fall: 4 Meteoroid dynamics and fragmentation in the atmosphere // *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, V. 38, № 7, p. 1023-1043.
16. *Стулов В.П.* Определение параметров разрушающихся метеороидов по торможению в атмосфере // *Астрон. вестник*, 2000, т. 34, № 6, стр. 545-549.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ**

На основе аппроксимации наблюдений аналитическим решением уравнений метеорной физики, предложен оригинальный алгоритм подбора динамических параметров метеорного тела, существенно повышающий точность их оценки. Аналитически получена формула для вычисления ускорения метеорного тела.

Новым методом определены значения параметра уноса массы и баллистического коэффициента для болидов Прерийной и Канадской наблюдательных сетей. Проведена оценка внеатмосферных масс метеорных тел. Получены оценки массы в других точках траектории. Детально проанализированы атмосферные траектории болидов Пржибрам, Лост Сити, Иннисфри, Нойшванштайн; оценена масса, оставшаяся в точке погасания болида.

Показано, что основная часть светящегося сектора траекторий крупных болидов лежит в условиях обтекания в режиме сплошной среды, а условие свободно-молекулярного обтекания, необходимое для корректной интерпретации светимости, находится вне его пределов.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Грицевич М.И. Анализ атмосферных траекторий для падений Пржибрам, Лост Сити, Иннисфри, Нойшванштайн. *Астрономический вестник*, 2008, т. 42, № 5, стр. 397-417.
2. Грицевич М.И. Идентификация динамических параметров болидов. *Вестник Московского Университета. Серия 1. Математика. Механика*, 2008, № 1, стр. 38-42.

3. Грицевич М.И. Оценка конечной массы крупных метеорных тел. Доклады РАН, 2008, т. 423, № 1, стр. 44-50.
4. Грицевич М.И. О применимости фотометрической формулы при оценке массы болидообразующих тел. Доклады РАН, 2008, т. 418, № 5, стр. 624-630.
5. Грицевич М.И., Попеленская Н.В. Траектории метеоров и болидов при больших значениях параметра уноса массы. Доклады РАН, 2008, т. 418, № 4, стр. 477-481.
6. Грицевич М.И., Стулов В.П. Модель движения болида Нойшванштайн в атмосфере. Астрономический вестник, 2008, т. 42, № 2, стр. 126-131.
7. Грицевич М.И. Оценка массы болидообразующих тел. Сборник докладов шестой научно-технической конференции «Молодежь в науке». Под редакцией д.ф.-м.н. Незнамова В.П. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008, стр. 68-81.
8. Грицевич М.И., Стулов В.П. Масса входа болидов Канадской сети. Доклады РАН, 2007, т. 413, № 4, стр. 472-477.
9. Грицевич М.И. Приближение наблюдаемого движения болидов аналитическим решением уравнений метеорной физики. Астрономический вестник, 2007, т. 41, № 6, стр. 548-554.
10. Грицевич М.И. Определение внеатмосферных масс болидов Канадской сети. Изд-во механико-математического факультета МГУ, 2007, 40 с.
11. Грицевич М.И. Вычисление параметров метеорных тел по дискретным значениям скорости и высоты полета. Труды конференции-конкурса молодых ученых 11-16 октября 2006 г. Под редакцией академика РАН Черного Г.Г., профессора Самсонова В.А. Изд-во МГУ, 2007, стр. 122-135.
12. Грицевич М.И., Стулов В.П. Внеатмосферная масса болидов Канадской сети. Астрономический вестник, 2006, т. 40, № 6, стр. 522-529.
13. Грицевич М.И., Стулов В.П. Нойшванштайн. Отчет НИИМ МГУ № 4859 о научно-исследовательской работе, Москва, 2006, 22 с.
14. Грицевич М.И. Анализ траекторий болидов и условия образования кратеров. Труды конференции-конкурса молодых ученых 12-17 октября 2005 г. Под редакцией академика РАН Черного Г.Г., профессора Самсонова В.А. Изд-во МГУ, 2006, стр. 158-165.

15. Грицевич М.И. О несоответствии динамической массы болидов фотометрическим оценкам. Тезисы докладов XIV школы-семинара “Современные проблемы аэрогидродинамики”, 6-16 сентября 2006 года, Сочи, «Буревестник» МГУ. Изд-во МГУ, 2006, стр. 36-37.
16. Грицевич М.И., Стулов В.П. Определение параметров метеорных тел по данным наблюдений. Ломоносовские чтения МГУ, 2006. Тезисы докладов. Изд-во МГУ, 2006, стр. 59-60.
17. Stulov V.P., Gritsevich M.I. Preatmospheric masses of large fireballs from the Canadian network. European Planetary Science Congress. Berlin, Germany, 18-22 September, 2006, EPSC Abstracts, Vol. 1, EPSC2006-A-00028.
18. Gritsevich M.I. New method for entry dynamics determination upon observations. Meteoroids 2007. Barcelona, Spain, 11-15 June, 2007. Book of abstracts, p. 61.
19. Gritsevich M.I., Stulov V.P. Initial mass of the Neuschwanstein fireball. Meteoroids 2007. Barcelona, Spain, 11-15 June, 2007. Book of abstracts, p. 62.
20. Stulov V.P., Gritsevich M.I. New initial masses of large fireballs from the Canadian network. Meteoroids 2007. Barcelona, Spain, 11-15 June, 2007. Book of abstract, p. 64.
21. Gritsevich M.I., Stulov V.P. Form and properties of the Neuschwanstein meteoroid. European Planetary Science Congress 2007. Potsdam, Germany, 19-24 Aug. 2007, EPSC Abstracts, Vol. 2, EPSC2007-A-00005.
22. Gritsevich M.I. Identification of dynamic parameters for fireballs. European Planetary Science Congress 2007. Potsdam, Germany, 19-24 August, 2007, EPSC Abstracts, Vol. 2, EPSC2007-A-00026.
23. Gritsevich M.I. An Analysis of results of Earth observations of Meteors and Fireballs, International Conference "100 years since Tunguska phenomenon: Past, present and future". Moscow, Russia, 26-28 June, 2008. Book of abstracts, p. 111-112.
24. Gritsevich M.I. Determination of parameters of meteor bodies from observational data with high accuracy of estimate. 37th COSPAR Scientific Assembly. Montreal, Canada, 13-20 July, 2008. Program, p. 97, Abstract B04-0042-08.
25. Gritsevich M.I. Computation of terminal mass for large fireballs. European Planetary Science Congress 2008. Munster, Germany, 21-26 September, 2008, EPSC Abstracts, Vol. 3, EPSC2008-A-00157.

Подписано в печать 20.12.2008  
Формат 60x88 1/16. Объем 1.5 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 786  
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»  
119991 г.Москва, Ленинские горы, д.1  
Главное здание МГУ, к. А-102