

Попеленская Наталья Вадимовна

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ  
МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ  
БОЛИДНЫХ СЕТЕЙ

01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы  
01.03.04. Планетные исследования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2011

Работа выполнена в лаборатории общей аэродинамики Института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор В.П. Стулов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
А.В. Багров

доктор физико-математических наук  
профессор Н.Н. Смирнов

Ведущая организация: Вычислительный центр  
им. А.А. Дородницына РАН

Защита состоится 18 февраля 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119899, г. Москва, Ленинские горы, Главное здание МГУ, аудитория 12-12.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан 17 января 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.501.001.89,  
доктор физико-математических наук



А.Н. Осипцов

# 1. Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Цель наблюдений метеорных явлений состоит в получении достоверной информации о характеристиках метеорных тел, входящих в атмосферу Земли. Эта информация необходима для построения системы защиты, как летательных аппаратов, так и планеты в целом. В последние годы были усовершенствованы методы наблюдения метеорных тел. Также появились новые методы определения параметров крупных метеорных тел, характеризующиеся хорошей точностью. Малые метеорные тела остались мало изученными, старые методы обработки наблюдательных данных для них малоинформативны. Поэтому задача разработки эффективных методов обработки наблюдений малых метеорных тел, рассмотренная в диссертации, является актуальной.

В лаборатории Общей аэродинамики НИИ механики МГУ под руководством профессора В.П. Стулова начиная с 1988 года ведутся работы по разработке методов обработки данных наблюдений болидных сетей для определения параметров метеорных тел. Диссертация является продолжением работ лаборатории Общей аэродинамики в области метеорной физики.

## **Основные цели работы:**

- расширение диапазона применения динамического метода определения параметров малых метеорных тел (Попеленская Н.В., Стулов В.П. "Внеатмосферная масса малых метеороидов Прерийной и Канадской болидных сетей". *Астрономический вестник*. Т. 42. No 2, 2008. с. 119-125.) на область больших значений параметра уноса массы;
- разработка принципиально нового метода определения параметров малых метеорных тел по высоте погасания с учетом теории теплообмена;
- выяснение корректности использования фотометрических оценок для определения параметров малых метеорных тел;
- определение параметров нетормозящихся малых метеорных тел;
- получение данных о параметрах теплообмена малых метеорных тел;
- получение новых данных о плотности малых метеорных тел;

– оценка влияния реактивной силы на движение малых метеорных тел.

**Научная новизна.** Создание эффективных методов обработки наблюдений является приоритетной задачей метеорной физики. Большое количество наблюдательных данных не может быть обработано существующими методами, либо обрабатывается некорректно. Задача определения параметров метеорных тел является обратной задачей метеорной физики, когда по конечным наблюдательным данным необходимо определить начальные параметры. Существуют два подхода к решению таких задач: фотометрический и динамический. Для малых метеорных тел фотометрический метод, характеризующийся невысокой точностью, до настоящего времени являлся основным. В работе показано, что к малым метеорным телам, которые существенно тормозятся при движении в атмосфере, может быть применен один из динамических методов, разработанный для крупных метеорных тел.

Для малых метеорных тел с небольшим торможением разработан принципиально новый метод определения параметров, основанный на совместном решении уравнений метеорной физики и уравнений для определения параметров теплообмена. Он имеет ряд преимуществ перед существующими на данный момент динамическими методами:

– достаточно данных наблюдений всего в двух точках: первой и последней точке светящегося участка траектории, поэтому метод позволяет обрабатывать наблюдения низкого качества;

– позволяет обрабатывать данные наблюдений метеорных тел с незначительным торможением, которые ранее могли быть обработаны только фотометрически;

– использует теорию теплообмена, не присутствующую в динамических методах определения параметров метеорных тел;

– для вычисления параметров метеорных тел необходимо начальное задание только формы тела, остальные параметры определяются в процессе расчетов.

Подтверждена возможность использования фотометрических данных для оценки параметров малых метеорных тел.

Показано, что реактивная сила не оказывает заметного влияния на движение малых метеорных тел.

Показано, что для малых метеорных тел характерно вращение при движении в атмосфере Земли.

Получены впервые значения объемной плотности для нетормозящихся метеорных тел и новые данные об объемных плотностях малых метеорных тел, тормозящихся при движении в атмосфере.

#### **Теоретическое и практическое значение.**

Разработанные методы анализа наблюдательных данных позволяют вычислять внеатмосферные массы малых метеорных тел с хорошей точностью. Эти результаты необходимы для основных приложений метеорной физики: обеспечения астероидно-кометной безопасности и разработки мер защиты космических, орбитальных летательных аппаратов, планетарной защиты.

Данные о плотностях малых метеорных тел крайне важны для формирования правильных представлений о материи в космосе.

**Апробация работы.** Основные положения работы докладывались на 13 российских и международных научных конференциях: конференция-конкурс молодых ученых 2006-2009 годов, Москва, НИИ механики МГУ; школа-семинар "Современные проблемы аэрогидродинамики" под руководством академика РАН Г.Г. Черного 2007, "Буревестник" МГУ им. М.В. Ломоносова; международная конференция "100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее" 2008г, Москва; международная конференция "Современные проблемы математики, механики и их приложений" 2009г, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова; научная конференция "Ломоносовские чтения" 2008, 2009г, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова; международная конференция "The European Planetary Science Congress" Potsdam, Germany, 2007, Munster, Germany, 2008; международная конференция "Asteroids, Comets, Meteors" Baltimore, Maryland, USA. 2008; международная конференция "Bolides and Meteorite Falls" Prague, Czech Republic, 2009.

Результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры аэромеханики и газовой динамики под руководством академика РАН Г.Г. Черного (мех-мат МГУ), семинарах под руководством профессора В.П. Стулова (НИИ механики МГУ).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована двадцать одна работа, из которых 8 – статьи в журналах и сборниках и 13 – тезисы докладов. Часть работ написаны совместно с научным руководите-

лем В.П. Стуловым, М.И. Грицевич, Н.Г. Барри. Во всех работах соискателю принадлежит участие в постановке задачи, численном моделировании и анализе результатов. Все положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, три главы и заключение. Список литературы содержит 88 наименования. Общий объем диссертации составляет 109 страниц и включает в себя 14 рисунков и 17 таблиц.

## 2 Содержание диссертации

**Введение** содержит основные понятия и терминологию метеорной физики. Приводятся классификации по различным признакам и возможный состав метеорных тел. Дан краткий обзор истории метеорных наблюдений и методов их обработки. Описаны основные модели разрушения метеорных тел. Приводится современное представление о малых метеорных телах. Обоснована актуальность проводимого в работе исследования. Сформулированы основные цели работы.

**Первая глава** содержит описание двух традиционных методов определения параметров малых метеорных тел: фотометрического и динамического. Фотометрический метод основан на анализе данных кривой светимости. Он является основным методом определения параметров малых метеорных тел. Динамический метод основан на анализе данных атмосферной траектории торможения, в предположении значительного торможения метеорного тела в атмосфере. Описываются особенности каждого из двух методов и показаны ограничения их применения. Приводятся основные уравнения, описывающие движение малых метеорных тел. Перечислены предположения и допущения, сделанные при выводе этих уравнений.

В первом разделе описывается фотометрический подход к обработке данных наблюдений болидных сетей, его преимущества и недостатки. В последние годы правомерность использования фотометрического подхода стала подвергаться сомнению (например, в Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. "Аэродинамика болидов". М.: Наука. 1995. 236 с., и Попеленская Н.В., Стулов В.П. "Внеатмосферная

масса малых метеороидов Прерийной и Канадской болидных сетей". *Астрономический вестник*. Т. 42. № 2, 2008. с. 119-125.). Во-первых, при атмосферном движении большинства метеорных тел наблюдается существенное торможение. Во-вторых, для тел, обтекаемых в режиме сплошной среды, основной вклад в свечение дает высокотемпературный ударный слой перед телом, что никак не учитывается в фотометрическом подходе. Режим обтекания для каждого метеорного тела определяется индивидуально, тогда как фотометрический подход един для всех тел. В-третьих, в работе (Мак-Кинли Д. "Методы метеорной астрономии". М.: Мир. 1964. 383 с.) показано, что определение массы тела, порождающего метеор нулевой звездной величины весьма неточно. Масса такого тела может колебаться от 30 до 0,03 г. Это вносит дополнительную погрешность при использовании фотометрического подхода. В-четвертых, по различным причинам, измерение интенсивности свечения метеоров имеет гораздо более низкое качество, чем измерения скорости движения и торможения. Для определения фотометрических данных необходимо очень точное значение коэффициента светимости. В настоящее время эта величина точно не определена.

В пользу использования фотометрического метода говорит качественное свойство метеорных спектров, состоящее в преобладании линий химических элементов, входящих в состав большинства метеоритов. Из этого делается вывод, что преобладающий вклад в свечение метеорного тела при его движении в атмосфере дает излучение паров материала тела, возникающих вследствие испарения его поверхности. По некоторым оценкам, доля атмосферных полос и линий в интенсивности излучения метеоров не превосходит 3% (Бронштэн В.А. "Физика метеорных явлений". М.: Наука, 1981. 416с.).

На основании вышесказанного, необходимо привлечение динамических методов, позволяющих максимально точно использовать кривую торможения. По результатам сравнения результатов обработки данных наблюдений всеми имеющимися в наличии методами можно будет сделать вывод, для каких тел возможно использование фотометрического подхода, определив диапазон его применения.

Во втором разделе описываются динамический метод и его недостатки. Рассчитана величина реактивной силы для метеорных тел, исследованных далее в работе, и степень ее влияния на унос массы

метеороида при движении в атмосфере Земли. Показано, что при движении малых метеорных тел в атмосфере Земли влиянием реактивной силы можно пренебречь.

Описана используемая модель атмосферы, предполагается, что она гидростатическая и экспоненциальная. Приведены возможные формы метеорных тел.

Приведены основные уравнения движения метеорного тела в атмосфере Земли. Проведена их нормализация. В качестве масштабов скорости  $V$ , массы  $M$  и площади  $S$  миделева сечения тела выбраны их значения  $V_e$ ,  $M_e$ ,  $S_e$ , соответственно, при входе в атмосферу. Масштабами высоты полета  $H$  и плотности атмосферы  $\rho_a$  служат высота однородной атмосферы  $h_0$  и значение плотности на уровне моря  $\rho_0$ , соответственно:

$$\begin{aligned} \text{масса } m &= \frac{M}{M_e}, & \text{скорость } v &= \frac{V}{V_e}, & \text{высота } y &= \frac{H}{h_0} \\ \text{плотность } \rho &= \frac{\rho_a}{\rho_0}, & \text{площадь миделева сечения } s &= \frac{S}{S_e}. \end{aligned}$$

При переходе к безразмерным переменным, исключая время  $t$ , получено:

$$m \frac{dv}{dy} = \alpha \rho v s, \tag{1}$$

$$\frac{dm}{dy} = 2\alpha\beta v^2 s \rho.$$

В уравнения (1) входят два безразмерных параметра, постоянных вдоль траектории:

$$\alpha = \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0 S_e}{M_e \sin \gamma}. \tag{2}$$

$$\beta = (1 - \mu) \frac{c_h v_e^2}{2c_d H^*}. \tag{3}$$

Параметр  $\alpha$  называется *параметром торможения*, так как он характеризует интенсивность торможения и пропорционален отношению массы столба атмосферы с поперечным сечением  $S$  вдоль траектории к массе тела. Параметр  $\beta$  называется *параметром уноса массы* (абляции) и пропорционален отношению доли кинетической энергии



единицы массы тела, поступающей к телу в виде тепла, к эффективной энтальпии разрушения.

В формулах (2) и (3) угол траектории  $\gamma$ , коэффициенты сопротивления  $c_d$  и теплообмена  $c_h$ , а также эффективная энтальпия разрушения  $H^*$  - считаются постоянными вдоль траектории величинами. Как видно из определения (2), можно найти значение внеатмосферной массы, если предварительно вычислить величину параметра торможения.

В третьем разделе приведен динамический метод  $Q_3$  определения параметров торможения и уноса массы. Аналитическое решение уравнений (1) с начальным условием  $y = \infty$ ,  $v = 1$ ,  $m = 1$  выражается через интегральную экспоненту:

$$m = \exp\left[-\beta \frac{(1 - v^2)}{1 - \mu}\right], \quad (4)$$

$$y = \ln \alpha + \beta - \ln \frac{\Delta}{2}, \quad (5)$$

$$\Delta = \overline{Ei}(\beta) - \overline{Ei}(\beta v^2),$$

$$\overline{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t dt}{t}.$$

Величина параметра  $\mu$  характеризует возможную роль вращения в полете,  $\mu = \log_m s$ . Наличие интегральной экспоненты заметно усложняет использование уравнения (5). В данной работе для анализа наблюдений метеоров используется его упрощенный вариант. При ограниченных значениях параметра  $\beta$  решение заменяется более простым приближенным выражением (Кулаков А.Л., Стулов В.П. "Определение параметров метеорных тел по данным наблюдений" Астроном. Вестн. Т. 26. No 5, 1992. с. 67-75). Показано, что при  $0 \leq \beta \leq 2$  во всем диапазоне  $0 \leq v \leq 1$  формула (5) может быть с хорошей точностью заменена следующим выражением:

$$y(v, \alpha, \beta) = \ln \alpha - \ln(-\ln v) + 0,83\beta(1 - v). \quad (6)$$

Для нахождения параметров торможения и уноса массы по данным наблюдений используется метод наименьших квадратов. Для пара-

метра  $\alpha$  получено явное выражение:

$$\alpha = -\frac{\sum_{i=1}^n \ln v_i \exp[-y_i - 0,83\beta(1 - v_i)]}{\sum_{i=1}^n \exp(-2y_i)}, \quad (7)$$

для параметра  $\beta$  – трансцендентное уравнение:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \alpha(1 - v_i) \ln v_i \cdot \exp(-y_i) \cdot \exp[-0,83\beta(1 - v_i)] + \\ + \sum_{i=1}^n (1 - v_i) \ln^2 v_i \cdot \exp[-1,66\beta(1 - v_i)] = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Наблюдаемые значения хорошо ложатся на смоделированную с использованием параметров  $\alpha$  и  $\beta$  кривую как для умеренных значений параметра  $\beta$ , так и для больших значений. Среднеквадратичное отклонение для рассмотренных метеорных тел не превышает 3%.

**Во второй главе** рассматриваются особенности применения динамического метода определения параметров метеорных тел с использованием метода наименьших квадратов. Существует естественное ограничение использованной аппроксимации. Функция (6) имеет точку перегиба при  $v = e^{-1}$ . Производная функции (6) в точке перегиба равна

$$y'(e^{-1}, \beta) = e - 0,83\beta.$$

При  $\beta = \beta_c = 3,275$  точка перегиба является седловой точкой. При любом  $\beta > \beta_c$  функция (6) имеет на интервале  $(0 \leq v < 1)$  минимум и максимум, так что ее использование для аппроксимации движения метеора во всем диапазоне изменения безразмерной скорости становится проблематичным.

В первом разделе проанализировано изменение скорости при движении в атмосфере малых метеорных тел. Определим точку локального минимума функции (6). Величина  $v_{min}$ , в которой достигается минимальное значение безразмерной высоты  $y$  согласно (6) при  $\beta > \beta_c$ , может быть получена из условия

$$\beta = -(0,83v_{min} \ln v_{min})^{-1}. \quad (9)$$

Использование аппроксимации (6) при условии  $\beta > \beta_c$  возможно на отрезке  $v_{min} \leq v \leq 1$ .

Для метеорных тел, рассматриваемых в работе, были вычислены значения минимальной скорости. Оказалось, что почти во всех случаях значение скорости  $v_t$  в последней точке наблюдаемой траектории превышает величину  $v_{min}$ . Показано, что для большинства малых метеорных тел выполняется условие  $v_t > 0,8$ . Обоснована законность использования аппроксимации в ограниченном диапазоне изменения скорости при больших значениях параметра уноса массы.

Во втором разделе произведено сравнение результатов использования уравнения траектории тела в виде точного решения (5) и аппроксимации (6). При отсутствии дефектов наблюдений использование разных пробных функций практически не влияет на величины полученных параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . Это подтверждают результаты расчетов для 56 метеороидов Прерийной и Канадской сетей, приведенных в работе (Грицевич М.И., Попеленская Н.В. "Траектории метеоров и болидов при больших значениях параметра уноса массы" ДАН, Т. 418. No 4, 2008. с. 477-481).

В третьем разделе приведен анализ высот погасания малых метеорных тел, который подтверждает возможность применения аппроксимации с небольшой потерей точности. Здесь и далее высотой погасания называется значение высоты в последней точке наблюдаемого свечения. Если воспользоваться асимптотическим выражением для точного решения системы (1), то из условия  $m_t = 0$  с использованием значений  $\alpha$  и  $\beta$ , вычисленных по уравнениям (7) и (8), можно получить простое выражение для высоты погасания  $y_t$  при движении с постоянной скоростью

$$y_t = \ln(2\alpha\beta), \quad (10)$$

и его модификацию, учитывающую торможение метеорного тела в атмосфере до его погасания при  $v = v_t$

$$y = \ln(2\alpha\beta) - \ln\{1 - \exp[-\beta(1 - v^2)]\}, \quad (11)$$

$$m^{1-\mu} = 1 - 2\alpha\beta \cdot \exp(-y).$$

Были проведены расчеты значений высот погасания  $y_{t1}$  по формуле (11) при  $v = v_t$  и  $y_{t2}$  по формуле (10) для рассматриваемых в работе метеорных тел.

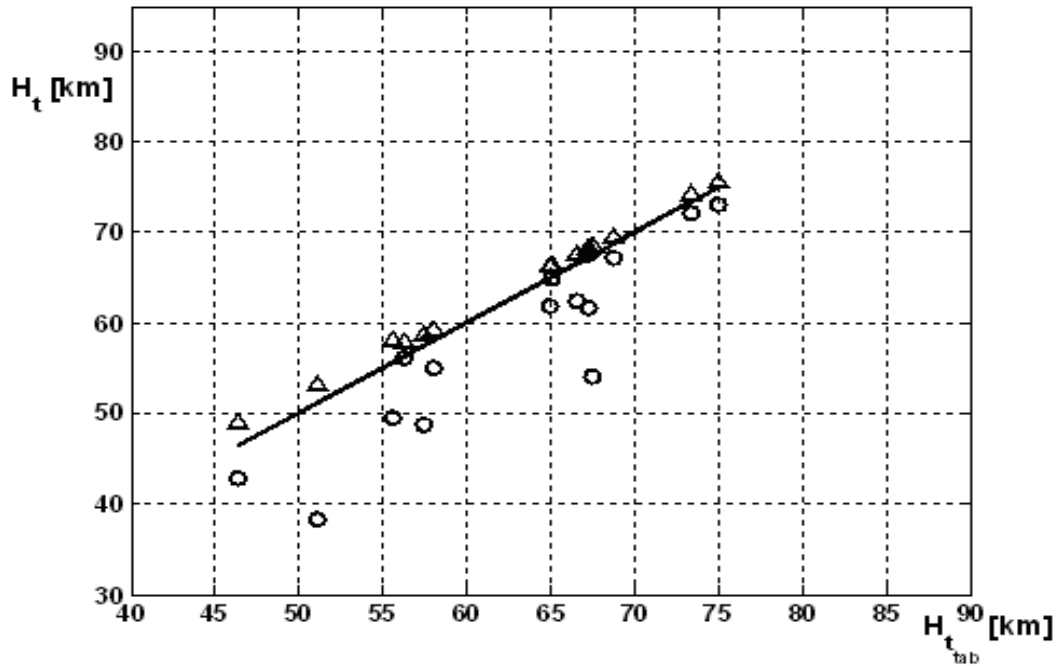


Рисунок 1. Сравнение высот погасания.

Для метеорных тел из Канадской болидной сети результаты сравнения высот погасания показаны на рисунке 1. По горизонтали отложены значения высот в последней точке наблюдений в км. По вертикали отложены размерные значения высот, полученных по формулам (10) и (11). Отметим, что биссектриса  $H_t = H_{t_{tab}}^{90}$  соответствует табличным значениям высот. Величины высот, полученных с учетом торможения по формуле (11) соответствуют  $\Delta$ , величинам высот, полученных без учета торможения по формуле (10) -  $\circ$ . Анализ полученных результатов расчетов подтверждает пригодность асимптотик (11) и (10) для описания движения малых метеоров даже при выполнении условия  $\beta > \beta_c$ . Показано, что на участке  $v_{min} \leq v_t \leq 1$  изменения скорости решение (5) может быть приближенно представлено как формулой (6), так и выражениями (10), (11), причем диапазон изменения параметра  $\beta$  для таких представлений существенно шире, чем это справедливо при представлении во всем диапазоне изменений скорости ( $0 \leq v < 1$ ).

В четвертом разделе описан способ определения внеатмосферной массы малых метеорных тел в зависимости от параметра торможе-

ния. Из уравнения (2) выражение для внеатмосферной массы метеорного тела  $M_e$  через баллистический коэффициент  $\alpha$  можно представить в следующем виде:

$$M_e = \left( \frac{1}{2} c_d \frac{\rho_0 h_0 A}{\rho_m^{\frac{2}{3}}} \frac{1}{\alpha \sin \gamma} \right)^3 \quad (12)$$

При вычислении  $M_e$  для сферической формы можно принять  $c_d A = 1,209$  (В. Baldwin, Y. Sheaffer "Ablation and Breakup of large meteoroids during atmospheric entry" Journal of geophysical research, V. 76. no. 19, 1971. p.4653-4668.). Расчеты динамической массы проведены для четырех возможных материалов метеорных тел: лед –  $M_i$  ( $\rho_{mi} = 0,9$  г/см<sup>3</sup>), углистый хондрит –  $M_h$  ( $\rho_{mh} = 2,2$  г/см<sup>3</sup>), камень –  $M_s$  ( $\rho_{ms} = 3,73$  г/см<sup>3</sup>), железо –  $M_f$  ( $\rho_{mf} = 7,8$  г/см<sup>3</sup>). Полученные динамические оценки подтверждают принадлежность рассмотренных тел к малым метеорным телам. Можно заметить, что при использовании различных предположений о возможной форме метеорного тела, динамическая и фотометрическая массы становятся очень близки. Например, наибольшее совпадение динамической и фотометрической масс наблюдается для тел сферической формы либо для формы плиты с коэффициентом формы тела равным  $A = 1,67$ . Таким образом, вероятная причина расхождения фотометрических и динамических оценок для малых метеорных тел заключается в принудительном задании определенной формы тела. На основе сравнения полученных масс с данными фотометрии, выявлены наиболее вероятные формы малых метеорных тел. Рекомендуемая для вычисления параметров малых метеорных тел величина произведения  $c_d A$  составляет 2,5.

**В третьей главе** в первом разделе представлен новый метод определения размера малых метеорных тел по высоте погасания, который используется для обработки данных наблюдений метеорных тел с незначительным торможением или без торможения.

Рассмотрим выражения для высот погасания (10) и (11). Формула (10) для нетормозящихся метеороидов и формула (11) с учетом торможения дают нам связь параметров  $\alpha$  и  $\beta$  и высоты погасания  $y_t$  метеора. Подставим в уравнение (10) выражения для параметров  $\alpha$

и  $\beta$  из (2) и (3). В дальнейшем будем считать, что рассматриваемые тела имеют форму, близкую к сферической.

Размер тела при входе в атмосферу определяется для малых метеорных тел с несущественным торможением из условия

$$R = \frac{3(1 - \mu)}{8} \frac{\rho_0 h_0}{\rho_m e^{y_t} \sin \gamma} \frac{c_h V_e^2}{H^*}, \quad (13)$$

и для метеорных тел с заметным торможением

$$R = \frac{3(1 - \mu)}{8} \frac{\rho_0 h_0}{\rho_m e^{y_t} \sin \gamma} \frac{c_h V_e^2}{H^*} \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \frac{(1 - \mu) c_h V_e^2}{c_d H^*} \left( 1 - \frac{V_t^2}{V_e^2} \right) \right) \right]^{-1}. \quad (14)$$

Полученные уравнения дают нам возможность определить размер тела при входе в атмосферу, зная только величины скоростей и высот в первой и последней точках наблюдений. Знание распределения значений скорости и высоты полета по времени не требуется. Это выгодно отличает новый метод от динамического метода, описанного в первой главе, поскольку существенно снижает ошибку, которая накапливается при использовании наблюдательных данных низкого качества.

Решая уравнения (13) или (14) совместно с уравнениями для вычисления коэффициентов сопротивления, теплообмена и эффективной энтальпии разрушения с использованием данных таблиц наблюдений, возможно вычислить радиус тела в начальной точке свечения. Именно это значение радиуса в дальнейшем можно использовать для определения внеатмосферной массы метеорного тела. Считается, что потеря массы при прохождении атмосферы до начала свечения может не приниматься в расчет, поскольку существенный унос массы начинается при достижении телом температуры плавления.

Во втором разделе представлен обзор существующих методов определения коэффициентов сопротивления и теплообмена. Численные методы расчета коэффициентов сопротивления и теплообмена для тел, движущихся в атмосфере, требуют учета множества факторов. В метеорной физике, как правило, форма, размер и материал тела неизвестны. Поэтому используются аналитические выражения для вычисления коэффициентов сопротивления и теплообмена. Основная проблема состоит в том, что для вычисления этих коэффициен-

ентов необходимо знать режим обтекания, а он, в свою очередь, определяется в процессе вычисления радиуса. Поэтому возникла необходимость в таких аппроксимациях, которые переходят в константы ( $c_d = 2$ ,  $c_h = 1$ ) в свободно молекулярном режиме, с хорошей точностью определяют коэффициенты в режиме сплошной среды и дают плавный переход между этими двумя режимами в переходном режиме. На основе сравнения нескольких методов вычисления коэффициентов сопротивления и теплообмена выбран наиболее подходящий для определения размера малых метеорных тел.

В третьем разделе приведены результаты расчетов новым методом и сравнение с данными фотометрии, а также с динамическим методом  $Q_3$ , основанном на методе наименьших квадратов. Как и во второй главе, расчеты внеатмосферной массы проведены по для четырех значений материала метеорного тела: лед –  $M_i$  ( $\rho_{mi} = 0,9$  г/см<sup>3</sup>), углистый хондрит –  $M_h$  ( $\rho_{mh} = 2,2$  г/см<sup>3</sup>), камень –  $M_s$  ( $\rho_{ms} = 3,73$  г/см<sup>3</sup>), железо –  $M_f$  ( $\rho_{mf} = 7,8$  г/см<sup>3</sup>). Расчеты проводились только для метеорных тел из Канадской болидной сети, поскольку во второй главе было показано, что данные Прерийной болидной сети низкого качества и могут давать существенную погрешность при расчетах.

Поскольку неизвестно, присутствует ли вращение у малых метеорных тел при движении, то были рассмотрены два предельных случая. В первом случае вращение отсутствует и унос массы происходит только с лобовой поверхности. Этому соответствует значение параметра изменения формы  $\mu = 0$ . Во втором случае тело вращается быстро и хаотично, а значение параметра изменения формы принимается равным максимально возможному:  $\mu = 2/3$ . Отдельно рассматривались тела, движущиеся в атмосфере Земли с торможением, и без торможения.

Результаты расчетов нетормозящихся тел показывают, при отсутствии вращения материалом, из которого состоят малые метеорные тела, могут являться камень или углистый хондрит примерно с одинаковой вероятностью; с учетом вращения наиболее вероятным материалом являются лед или углистый хондрит. Наиболее вероятным материалом, из которого состоят малые метеорные тела, тормозящиеся в атмосфере, могут являться лед, камень или углистый хондрит.

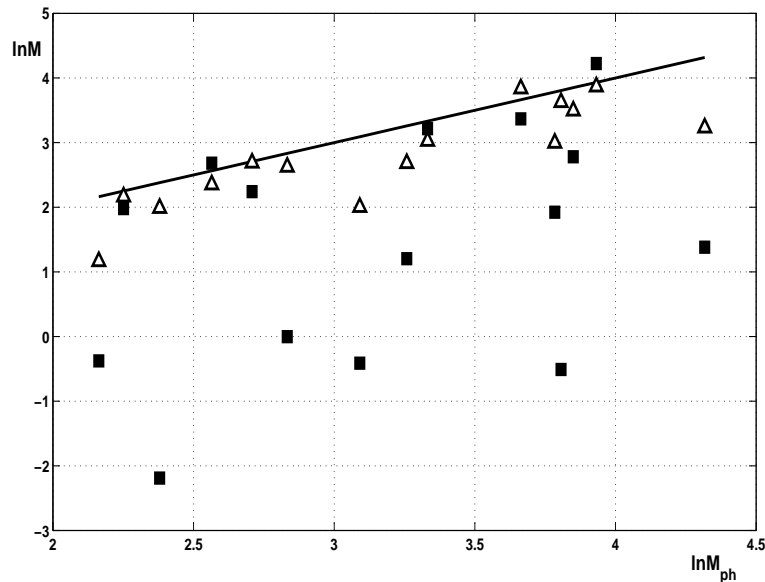


Рисунок 2. Сравнение фотометрических и динамических масс.

На рисунке 2 показано сравнение фотометрической массы (прямая линия) и динамических масс, полученных методом  $Q_3$  (обозначены квадратами) и определенных по высоте погасания (обозначены треугольниками). По оси абсцисс отложены значения фотометрической массы, по оси ординат - значения фотометрической и динамической масс. Видно, что величины динамических масс, полученные по высоте погасания, находятся гораздо ближе к значениям фотометрических масс, чем массы, определенные с помощью метода  $Q_3$ . Таким образом, расчеты новым методом подтверждают корректность фотометрических оценок. Для любого из рассмотренных тормозящихся и нетормозящихся малых метеорных тел с учетом вращения можно подобрать один из предлагаемых выше материалов тела так, чтобы значения внеатмосферной и фотометрической масс были близки. Для крупных тел такое невозможно.

Было рассмотрено влияние принудительного задания величин температуры и эффективной энтальпии при расчетах. Значения температуры в критической точке на поверхности малых метеорных тел, полученные в процессе расчетов, лежат в диапазоне  $1900K \leq T \leq 2600K$  для хондритов, что согласуется с величинами  $T = 2200K$  и  $T = 2400K$ , рекомендованными в работе (Н. Allen, В. Baldwin "A



method for computing luminous efficiencies from meteor data". NASA TN D-4808. 1968.). Однако принудительное задание температуры при расчетах может изменить внеатмосферную массу метеорного тела на 18%.

Значения эффективной энтальпии, полученные при расчетах для льда, хондритов, астероидного камня и железа, несколько отличаются от рекомендованных в работах (Бронштэн В.А. "Физика метеорных явлений". М.: Наука, 1981. 416с.) и (Christopher F. Chyba, etc. "The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid" Nature, V.361, 1993. p. 40-44.) констант. Однако, диапазон, в котором эффективная энтальпия изменяется, не вносит существенного изменения в величину внеатмосферной массы. Ее изменение не превышает 11%. Принудительное задание температуры, и эффективной энтальпии может вносить существенную погрешность в расчеты.

В четвертом разделе произведены оценки объемной плотности малых метеорных тел и приведено сравнение полученных оценок с оценками других исследователей. Для малых тел с небольшим торможением фотометрический подход позволяет определить массу тела по его свечению. С другой стороны, масса тела определяется динамическими методами по наблюдаемой траектории торможения. Из условия равенства фотометрической и динамической масс можно определить объемную плотность при заданной форме тела.

Для рассмотренных в главе 2 тел была вычислена объемная плотность. Полученные значения объемной плотности находятся в диапазоне  $0,22 \leq \rho_m(Q_3) \leq 3,32$  г/см<sup>3</sup>. Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в работе (Babadzhanov P.V., Kokhinova G.I. "Densities and porosities of meteoroids" Astronomy and Astrophysics, V. 495, 2009. p. 353-358). Величина средней объемной плотности составляет  $\rho_{m_{cp}} = 1,4$ , что близко к значениям  $\rho_{m_{cp}} = 0,9$ , полученным для меньших тел (с массами от  $10^{-7}$  г. до  $10^{-3}$  г.) в работе (Drew K., etc. "Meteoroid Bulk Density Determination Using Radar Head Echo Observations" Springer. Earth, Moon, and Planets, V. 95. No. 1-4, December 2005. p. 639-645).

Полученные в результате расчетов значения объемной плотности находятся в диапазоне  $0,7 \leq \rho_m \leq 12,3$  г/см<sup>3</sup> без учета вращения и  $0,35 \leq \rho_{m_{rot}} \leq 3,5$  г/см<sup>3</sup> с учетом вращения. Полученные с

учетом вращения значения объемной плотности хорошо согласуются с работой (Babadzhanov P.B., Kokhinova G.I. "Densities and porosities of meteoroids" Astronomy and Astrophysics, V. 495, 2009. p. 353-358). Средние значения объемной плотности нетормозящихся малых метеорных тел, полученные без учета вращения, составляют  $\rho_{m_{cp}} = 4,28$ , а с учетом вращения –  $\rho_{m_{rotcp}} = 1,8$ .

Для тел, тормозящихся в атмосфере, вычисленные значения объемной плотности находятся в диапазоне  $1,7 \leq \rho_m \leq 10,3$  г/см<sup>3</sup> без учета вращения и  $0,6 \leq \rho_{m_{rot}} \leq 5,6$  г/см<sup>3</sup> с учетом вращения. В большинстве случаев объемные плотности  $\rho_m(Q_3)$  близки к величинам плотности, полученных с учетом вращения, и только в одном случае - к величине плотности, полученной без учета вращения. Во всех остальных случаях объемная плотность  $\rho_m(Q_3)$  несколько меньше, чем  $\rho_{m_{rot}}$ , полученная с учетом вращения. При этом величины объемной плотности соответствуют реально существующим материалам. Средняя объемная плотность тормозящихся метеорных тел, полученная с учетом вращения, составляет  $\rho_{m_{rotcp}} = 2,13$ , что неплохо согласуется со значением  $\rho_{m_{cp}} = 2,8$ , полученным для меньших тел ( $0,083 \leq M_e \leq 3,3$  г) в работе (Н. Allen, В. Baldwin "A method for computing luminous efficiencies from meteor data". NASA TN D-4808. 1968).

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы о плотностях малых метеорных тел. Во-первых, использование фотометрических оценок для малых метеорных тел приводит к получению реальных значений объемной плотности. Во-вторых, для большинства малых метеорных тел характерно вращение. Этот вывод сделан на основе слишком больших значений объемной плотности, полученных без учета вращения. В некоторых случаях они очень велики ( $7,37 \leq \rho_m \leq 12,3$  г/см<sup>3</sup>). Метеоритов с подобной плотностью ни разу обнаружено не было, хотя если бы такие тела существовали, они с большой долей вероятности смогли бы не разрушиться при движении в атмосфере и выпасть на поверхность планеты. В-третьих, нетормозящиеся малые метеорные тела имеют объемную плотность меньше, чем малые метеорные тела, тормозящиеся в атмосфере.

В методе определения параметров метеорных тел по высоте погасания мы можем задавать только форму тела (она принимается квазисферической). Все остальные величины могут быть определены в

процессе вычислений. В том числе и объемная плотность. Для этого после определения материала тела, для которого выявлено наибольшее сходство с фотометрической оценкой, выбираются термодинамические константы. Далее вместо принудительного задания плотности записывается следующее уравнение:

$$\rho_m = \frac{M_{ph}}{\frac{4}{3}\pi R^3}. \quad (15)$$

В совокупности с уравнениями (13) или (14), уравнениями для вычисления коэффициентов сопротивления, теплообмена и эффективной энтальпии разрушения с использованием данных таблиц наблюдений, мы можем получить уточненное значение радиуса метеорного тела и его объемную плотность. Таким образом, мы можем получить более точные значения параметров метеорного тела за счет меньшего количества принудительно задаваемых величин.

### **Основные результаты и выводы**

Показано, что для малых метеорных тел возможно применение динамического метода  $Q_3$  определения параметров метеорных тел при больших значениях параметра уноса массы.

Разработан новый метод определения параметров малых метеорных тел по высоте погасания. Он имеет ряд преимуществ перед существующими на данный момент динамическими методами:

- требует данные наблюдений всего в двух точках: в первой и последней точке светящегося участка атмосферной траектории, поэтому позволяет обрабатывать наблюдения низкого качества без большой потери точности;
- для вычисления параметров метеорных тел необходимо принудительное задание только формы тела, остальные параметры определяются в процессе расчетов;
- позволяет обрабатывать данные наблюдений метеорных тел с незначительным торможением, которые ранее могли быть обработаны только фотометрическим методом;
- использует теорию теплообмена, не присутствующую в динамических методах определения параметров метеорных тел.

Впервые определена масса нетормозящихся малых метеорных тел динамическим методом. Также впервые для таких тел вычислена

объемная плотность. Полученные величины объемной плотности хорошо согласуются с оценками, рассчитанными другими методами.

Результаты расчетов показывают, что сочетание динамического подхода с учетом процессов теплообмена позволяет получить корректные оценки внеатмосферных масс и плотностей малых метеорных тел.

Подтверждена возможность использования фотометрических оценок для малых метеорных тел с небольшим торможением.

Показано, что для малых метеорных тел характерно вращение при движении в атмосфере.

### **Публикации по теме диссертации:**

1. Попеленская Н.В. Зависимость высоты погасания малых метеорных тел от их параметров // Вестник МГУ. Сер. 16 Математика, механика. № 4, 2010. с. 65-68.
2. Стулов В.П., Барри Н.Г., Грицевич М.И., Попеленская Н.В. Новые методы интерпретации оптических наблюдений метеоров и болидов // Сборник статей "Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины". Вып. 1. Изд-во МГУ, 2010, стр.102-129.
3. Попеленская Н.В., Стулов В.П. Внеатмосферная масса малых метеороидов Прерийной и Канадской болидных сетей // Астрономический вестник. Т. 42. № 2, 2008. с. 119-125.
4. Грицевич М.И., Попеленская Н.В. Траектории метеоров и болидов при больших значениях параметра уноса массы // ДАН, Т. 418. № 4, 2008. с. 477-481.
5. Попеленская Н.В. Исследование свойств, характеристик и эволюции метеорных тел, взаимодействующих с атмосферами планет // Сборник инновационных проектов механико-математического факультета и института механики МГУ, Москва 2009, с.73-74.
6. Попеленская Н.В. Особенности определения параметров малых метеорных тел при неизвестном режиме обтекания // Труды

конференции - конкурса молодых ученых, 11-14 октября 2009г. Изд-во МГУ, 2010, стр. 160-167.

7. Попеленская Н.В. Внеатмосферные массы малых метеорных тел при незначительном торможении // Труды конференции - конкурса молодых ученых, 8-10 октября 2008г. Изд-во МГУ, 2009. с. 190-195.
8. Попеленская Н.В. Определение параметров нетормозящихся метеорных тел // Труды конференции - конкурса молодых ученых, 10-12 октября 2007г. Изд-во МГУ, 2008, с. 166-170.
9. Попеленская Н.В. Сравнительный анализ динамической и фотометрической масс для малых метеорных тел // Труды конференции - конкурса молодых ученых, 11-16 октября 2006г. Изд-во МГУ, 2007, с. 239-245.
10. Попеленская Н.В. Средние плотности малых метеорных тел // Материалы конференции "Ломоносовские чтения 2009 секция механики, изд-во МГУ, 2009. с.133.
11. Попеленская Н.В. Анализ аппроксимаций для определения параметров теплообмена крупных тел при движении в атмосфере // Материалы конференции "Ломоносовские чтения 2009 секция механики, изд-во МГУ, 2009. с.133.
12. Попеленская Н.В. Динамические методы в задаче определения параметров малых метеорных тел // Материалы конференции "Ломоносовские чтения 2008 секция механики, изд-во МГУ, 2008. с.146-147.
13. Попеленская Н.В. Оценка параметров малых метеорных тел по данным наблюдений болидных сетей // Материалы конференции, посвященной 70-летию Садовниченко, М.: Изд-во "Университетская книга 2009, с.295.
14. Попеленская Н.В. Свойства малых метеоров Канадской и Прерийной болидных сетей // Современные проблемы аэрогидродинамики. Тезисы докладов XV школы-семинара 5-15 сентября 2007, Сочи, "Буревестник" МГУ. Изд-во Мгу, 2007, с.64.

15. Popelenskaya N. The average densities value of small meteoric bodies // Bolides and Meteorite Falls, Abstracts. Prague, 2009, p.16.
16. Popelenskaya N. The analysis of approximations for determination of heat exchange parameters for large meteoric bodies // Bolides and Meteorite Falls, Abstracts. Prague, 2009, p.16.
17. Popelenskaya N. The determination of the small meteoric body's parameters by the altitude of disappearance // The European Planetary Science Congress, Munster, Germany, September 2008. CD
18. Popelenskaya N. The determination of the small meteoric body's parameters // Asteroids, Comets, Meteors. Baltimore, Maryland, USA. 2008. тезисы доклада на веб-сайте:  
<http://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8267.pdf>
19. Popelenskaya N. The extra-atmospheric masses of small meteoric fireballs from the Prairie and the Canadian camera networks // The European Planetary Science Congress 2, Potcdam, Germany, August 2007. Abstracts, CD.
20. Попеленская Н.В. Определение размеров малых метеорных тел // Международная Конференция "100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее" Материалы конференции. Москва, 2008 г., с.144-145.
21. Попеленская Н.В. Нестационарные явления при быстром торможении тел в гиперзвуковом потоке // Юбилейная научная конференция "95 лет Тунгусской проблеме". М.: Изд-во МГУ, 2003, с. 239-245