Барри Наталья Геннадьевна. Испарение и разрушение метеорного тела в атмосфере : Дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 Москва, 2006 75 с. РГБ ОД, 61:06-1/669

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

**Барри Наталья Геннадьевна**

**ИСПАРЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТЕОРНОГО ТЕЛА В АТМОСФЕРЕ**

01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель д.ф.- м.н., проф. В.П. Стулов



Москва 2006

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#bookmark1)

1. [ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА 16](#bookmark2)
   1. [Модель единого тела 16](#bookmark3)
   2. Определение параметров метеорного тела с помощью метода наименьших квадратов 20
2. [ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ НА ТРАЕКТОРИЮ БОЛИДА 23](#bookmark10)
   1. Модель последовательного дробления (Обзор)
   2. Аппроксимация траекторий наблюдаемых болидов с учетом дробления 27
   3. Болид Бенешов 31
      1. [Краткое описание болида Бенешов 32](#bookmark19)
      2. Решение обратной задачи и результаты 33
3. [ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕННОГО МЕТЕОРНОГО ТЕЛА В ПОТОКЕ 39](#bookmark22)
   1. Модель разлета двух фрагментов разрушенного метеороида 40
   2. Модель разлета фрагментов разрушенного метеороида по слоям 48

56

58

71

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Введение**

Проблема движения в земной атмосфере крупных космических тел, способных пройти сквозь атмосферу и выпасть на поверхность планеты в виде метеоритов, представляет в настоящее время большой интерес.

Известно, что около 70 000000 метеороидов проникают в атмосферу Земли каждый день, из них более 1000 кг (около 1%) метеорного вещества достигает ее поверхности [35]. Для маленьких тел (1 мм — 1 см) большое количество данных получено с помощью методов метеорной астрономии (радиолокация, телевизионные и фотографические наблюдения). Крупные тела (1-10 км и более) обнаруживаются обычными астрономическими наблюдениями (телескопы). Тела “промежуточных” размеров стали наблюдаться сравнительно недавно [40].

Наблюдение за такими телами и интерпретация наблюдательных данных позволяет выяснить, какова вероятность их падения, каковы их свойства, характерные особенности пролета через атмосферу и последствия этих падений. Выяснение этих вопросов позволит более достоверно оценить астероидную опасность.

Для сбора информации о притоке метеорного вещества на Землю был создан ряд болидных сетей в США, Канаде и Чехословакии. К последней присоединились наблюдательные станции ряда Европейских стран, Европейская сеть действует до сих пор. Предполагалось, что оптическая регистрация болидов, их кривых светимости и траекторий будет способствовать нахождению упавших метеоритов, однако, наблюдательными сетями были обнаружены лишь три метеорита (Пршибрам, Лост-Сити, Иннисфри). Тем не менее, был собран уникальный наблюдательный материал, анализ которого продолжается и по сей день.

Кроме наземных наблюдательных сетей существует еще и система наблюдений, базирующаяся на спутниках. Геостационарные спутники США, отмечают яркие вспышки в атмосфере Земли, вызванные внедрением весьма крупных метеороидов. Достоинством нового подхода является независимость от погодных условий, охват широкой территории, а также использование фотоэлектрических датчиков с высоким разрешением по времени, позволяющих зарегистрировать особенности формы импульса излучения и на их основе выявить тонкие особенности происходящих процессов. Однако лишь в единичных случаях определяется угол наклона траектории и начальная скорость.

Одной из фундаментальных проблем метеорной физики служит определение доатмосферной массы болидообразующих тел. Интенсивность метеорного явления определяется кинетической энергией тела при входе к внешней атмосфере планеты. Как известно, скорость тел при входе в атмосферу Земли лежит в относительно узком диапазоне 11,2 < *Ve<* 72,8 км/с, так что разброс значений скоростного вклада в кинетическую энергию не превышает 50 раз. Вместе с тем значение массы метеорного тела может изменяться в существенно более широком диапазоне, от долей грамма (микрометеоры) до сотен тысяч тонн (Тунгусское космическое тело), т.е. на 12-14 порядков. Кроме того, скорость входа сравнительно просто определяется в наблюдениях начального участка атмосферной траектории. Напротив, надежные способы определения массы входа, содержащие оценку точности результата, в настоящее время отсутствуют.

Существует несколько моделей, описывающих движение метеорных тел в атмосфере. Модель единого тела изучалась и использовалась многими авторами: [47] - [49], [53] - [55], [18] - [20], [21], [23]. В работе [29] предложена аппроксимация аналитического решения для этой модели простыми функциями.

Физическая модель последовательного дробления метеороида была предложена в работе [36] и использована там для получения серии численных решений. Согласно этой модели при выполнении условия, когда давление на лобовую поверхность тела достигает величин порядка прочности материала метеороида, тело разрушается на несколько одинаковых фрагментов, которые быстро переходят в режим аэродинамически независимого движения. Поскольку плотность атмосферы быстро нарастает, фрагменты продолжают последовательно дробиться. Такая модель пригодна для описания железных и каменных метеоритов и, возможно, углистых хондритов. В работе [34] эта модель использовалась для восстановления разрушающих нагрузок и параметров траекторий на основе экспериментальных измерений прочностных свойств реальных метеоритов.

Аналитическое решение уравнений торможения и абляции метеорного тела при движении в атмосфере и последовательном дроблении на основе работы [36], а также довольно простая его аппроксимация были получены в работе [27]. Это решение было использовано в работах [28], [3] для определения параметров метеорных тел по данным наблюдений.

Физические свойства модели мгновенного разрушения были впервые сформулированы в известной работе [6]; модель позднее была использована в численных расчетах [43].

В работе [11] весь процесс дробления представляется как серия этапов по удвоению числа осколков, и расчет траектории неаблирующего тела сводился к поэтапным вычислениям, причем количество этапов могло быть больше тридцати. В работе [30] эта физическая модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений, которая решается методом разделения переменных, в том числе с учетом абляции.

Теоретическое исследование дробления на основе интенсивности свечения болида было проведено в диссертации [26]. С помощью метода радиационного радиуса в этой работе установлено, что для ряда крупных болидов Прерийной сети, США (PN - болидов) свечение заметно превышает величину, адекватную значениям массы при входе, полученным ранее чисто динамическими методами на основе теории единого тела, т.е. в отсутствие дробления. Автор [26] предположил, что траекторию в этих случаях образует не единое тело, а рой фрагментов, так что торможение соответствует наиболее крупному фрагменту, а свечение создают все фрагменты, полная масса которых, естественно, может заметно превышать массу одного фрагмента.

В настоящей работе делается попытка определить наличие дробления по форме наблюдаемой траектории, не связывая ее с величиной свечения болида, так как теоретическая связь интенсивности свечения с полной массой роя фрагментов установлена еще не вполне точно. Траектория вычисляется в переменных скорость - высота. Для выявления роли дробления используется метод наименьших квадратов, а в качестве пробных функций - аналитические формулы для траектории, полученные с помощью модели последовательного дробления метеорного тела в атмосфере [27].

Процесс разрушения метеороида в атмосфере, а также влияние этого процесса на строение кратерного поля исследуется в работе [50]. Авторы исследовали несколько известных кратерных полей. С помощью численных расчетов они попытались восстановить картины метеорных падений, результатами которых стали изучаемые поля.

В качестве физической модели для расчета траектории в работе [50] используются обычные уравнения метеорной физики для единого тела. Изучаемые кратеры, образованные в результате падения фрагментов одного метеороида, отличаются размерами. Поэтому модель дробления авторы [50] выбрали следующую: тело разрушается на несколько фрагментов разных размеров, если массу максимального фрагмента обозначить, например, *М,* то массы остальных фрагментов будут равны соответственно *Ml*2, *MIA, M/S* и так далее. Потом, определяются индивидуальные траектории фрагментов при помощи численного интегрирования уравнений метеорной физики для модели единого тела методом Рунге-Кутта. Вычисления прекращаются, когда последний фрагмент достигает поверхности земли, далее определяются разброс метеоритов и диаметры образованных ими кратеров.

Все изучаемые кратерные поля имеют некую ширину. Объяснением поперечной протяженности кратерного поля является наличие поперечной горизонтальной составляющей скорости. В работе [50] рассматриваются несколько возможных механизмов, обеспечивающих поперечную компоненту скорости фрагмента метеороида. Это центростремительный разлет фрагментов от вращающегося метеороида, действие поперечной подъемной силы, динамический поперечный разлет осколков вследствие взрывообразного разрушения метеороида, и пересечение двух или нескольких ударных волн непосредственно после разрушения.

Авторы [50] пришли к выводу, что взаимодействие ударных волн является основной причиной поперечного разброса фрагментов. Действие подъемной силы может быть существенным только в случаях, когда масса фрагментов меньше чем 100 кг.

Однако в работе [50] был предложен метод для определения расстояния поперечного разлета, в котором не было учтено, что взаимодействие ударных волн ослабевает с увеличением расстояния между фрагментами. И этот же метод использовался в работах [25], [26]. Расчеты проводились в предположении о том, что расталкивающая сила постоянна. В настоящей работе этот недочет был восполнен, и было получено аналитическое решение для задачи о расхождении двух сферических фрагментов в сверхзвуковом потоке воздуха под действием уменьшающейся поперечной силы.

В работе [50] также было проанализировано влияние угла входа, начальной массы и скорости на продольную протяженность кратерного поля и его строение. Например, по расчетам авторов для тела массой 109 кг и начальным углом траектории с горизонтом 45 ° будет образовываться только один кратер, даже если произойдет дробление. При таких начальных данных разлет возможных фрагментов будет недостаточный. Также отмечается, что для скоростей больше 20 км/с максимальный разлет двух тел массами 109 и 108 кг, обусловленный гравитацией и сопротивлением, будет меньше 20 км, а для более крупных тел будет меньше. Это дает верхний предел длины возможного кратерного поля, которое будет образовано геометрически подобными телами со скоростями больше 20 км/с. А для начальных скоростей между 11.2 и 20 км/с продольный разброс кратеров может быть очень большим (более 100 км) при угле входа меньше 5°.

В работе [24] подробно изучается падение Сихотэ-Алинского метеоритного дождя. Авторами использовалась следующая информация об этом уникальном событии: число и размер образовавшихся кратеров, их расположение на поле рассеяния, прочность образцов метеорита, устные рассказы и зарисовки очевидцев, оценки высот разрушения, наклона траектории и интенсивности свечения. Проведено численное моделирование движения, абляции и светимости, учитывающее возможность нескольких стадий разрушения.

В результате падения Сихотэ-Алинского метеорита образовалось обширное кратерное поле. Было обнаружено около 130 кратеров и воронок, 23 кратера с диаметром, превышающим 9 м [15]. Самые крупные осколки метеорита (массой 1.7 т и 0.7 т) были найдены не в самых больших кратерах. В нескольких больших кратерах (с *D > 9* м) вообще не было найдено крупных фрагментов, а только большое число мелких осколков самих кратерах и вокруг них.

Первая экспедиция собрала около 27 т метеоритного вещества [15], в основном в виде мелких фрагментов. Полная масса, упавшая на Землю, была оценена в 70-100 т [15]. Оценка в работе [24] приводит к увеличению упавшей массы до 120-140 т. Численное моделирование в этой работе показало, что большие фрагменты теряют примерно 30-50 % массы в результате абляции, поэтому авторы оценивают массу тела, распавшегося на крупные фрагменты примерно в 200-300 т.

В работе [24], также как и в работе [50], движение метеороида рассматривается в рамках модели единого тела до тех пор, пока давление на лобовую поверхность не достигнет некоторого критического значения, ведущего к дроблению тела. После чего движение каждого отдельного фрагмента описывается также в рамках этой модели.

Реальные нагрузки, испытываемые метеорными телами при движении в атмосфере, оказываются меньше пределов прочности [34], но, тем не менее, вызывают их разрушение, поскольку метеорные тела прочностно неоднородны. Небольшие образцы разрушаются в основном вдоль границ между кристаллами, которые слабее связаны между собой. Структурно неоднородные тела могут быть описаны с помощью статистической теории прочности [52], [4], из которой следует, что крупные дефекты встречаются реже незначительных, и вероятность их появления возрастает с увеличением объема тела. После разрушения образовавшиеся фрагменты оказываются прочнее раздробившегося тела. Поэтому для оценки прочности метеорита массой *М* можно воспользоваться степенным законом увеличения прочности с уменьшением размера, зная прочность образца. Такой метод использовался в работе [24].

Модель катастрофической фрагментации [41] использовалась в работе [24]. В ней предполагается, что метеорное тело разрушается на фрагменты разных размеров и с ростом массы осколка их число уменьшается. Затем выбирались один или несколько максимальных фрагментов, остальные разбивались на несколько групп и рассматривалась средняя масса группы.

Далее в работе [24] оценивалось рассеяние образовавшихся фрагментов в направлении, перпендикулярном движению, таким же методом, как и в работе [50] без учета уменьшения расталкивающей силы. Кроме того, в работе [24] предполагается, что, если число фрагментов значительно больше двух, расталкивание осколков меняется благодаря их взаимодействию и влиянию облака мелких фрагментов и паров между ними. Осколки могут двигаться, окруженные общей ударной волной. Это может увеличить расстояние поперечного разброса осколков в 2 — 3 раза, по оценке авторов до 160-240м, что по ряду величины согласуется с размером основного кратерного поля Сихотэ-Алинского метеорита (0.3><0.5 км). Размер же всей области, покрытой фрагментами метеорита, включающий и вторичный эллипс рассеяния обычно полагают равным 0.9x1 км.

В работе [24] проведено численное моделирование Сихотэ-Алинского события. Основываясь на описанной выше модели, авторы подобрали такие значения параметров, определяющих картину падения, которые дают наибольшее сходство реального кратерного поля и теоретического.

Фрагменты небольшого размера тормозятся довольно сильно и достигают земли с небольшой скоростью за счет действия веса тела. Поэтому вблизи поверхности планеты для этих фрагментов необходимо учитывать вес, чего не было сделано в работе [24].

Преимущества аналитических решений перед численными общеизвестны. Эти преимущества особенно акцентированы в метеорной физике, так как возможности получения численных решений высокой точности весьма ограничены из-за неточной постановки исходной задачи.

Целями настоящей работы являются:

* оценка влияния процесса дробления на траекторию болида, основанная на анализе наблюдаемой траектории
* решение задачи о расхождении двух сфер, линия центров которых лежит поперек потока, под действием поперечной силы, полученной в результате численного эксперимента

-- построение новой модели разлета фрагментов разрушенного метеорного тела.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений, списка литературы и содержит 75 стр. Список литературы содержит 56 библиографических ссылок.

В главе 1 описана известная модель единого тела и решение уравнений торможения и абляции, содержащее эллиптические интегралы, а также довольно простая аппроксимация этого решения.

В первом разделе решение для модели единого тела представлено в новых координатах - время, высота и проекция траектории на горизонталь.

Во втором разделе описаны две схемы метода наименьших квадратов для решения обратной задачи - нахождения параметров метеорных тел по данным наблюдений.

В главе 2 проводится исследование для выяснения степени влияния процесса дробления на форму кривой торможения болида.

В первом разделе излагаются основные положения физической модели последовательного дробления, а также описано известное решение уравнений торможения и абляции, соответствующее данной модели. Учет дробления в ней сводится к увеличивающейся площади миделева сечения роя фрагментов.

Во втором разделе изучаются траектории четырех болидов Прерийной сети США. Для анализа были выбраны болиды, для которых отмечалось наибольшее превышение массы входа, определенной фотометрическим способом, над массой, определенной чисто динамическим способом в соответствии с моделью единого тела. Предполагалось, что этот факт связан с наличием дробления. Для этих болидов методами, описанными в первой главе, решается обратная задача метеорной физики - определяются основные параметры, при которых модель наилучшим образом аппроксимирует данные наблюдений, результаты расчетов занесены в таблицу. В качестве пробных функций использовались решения для моделей единого тела и последовательного дробления с учетом абляции и без. Результаты аппроксимации траекторий четырех болидов в координатах “скорость - высота” представлены в виде графиков и приведены в разделе приложений. Показано, что наилучшую аппроксимацию наблюдаемой траектории дает формула, соответствующая модели единого тела с учетом абляции.

В третьем разделе проведен анализ траектории болида Бенешов. Для него имеются довольно подробные данные наблюдений, они изложены в данном разделе. Кроме того, дробления этого болида явно наблюдалось. Для аппроксимации наблюдаемой траектории болида Бенешов использовалось модифицированное решение, соответствующее модели последовательного дробления, учитывающее то, что болид разрушился уже после значительного торможения. Для него, как и для четырех изученных болидов оказалось, что фотометрическая масса существенно превышает значения массы входа, определенные чисто динамическим методом. Кроме того, и в случае болида Бенешов модель дробления дает заметное отклонение от данных наблюдения, это представлено на графике в разделе приложений.

В главе 3 изучается взаимодействие фрагментов разрушенного метеорного тела в сверхзвуковом потоке.

В первой части описан метод определения расстояния поперечного разлета сферических фрагментов разрушенного метеороида, использующийся в литературе. Этот метод основан на предположении о том, что расталкивающая сила, действующая на фрагменты в поперечном направлении, постоянна и исчезает, когда фрагменты разойдутся на определенное расстояние. Однако по мере увеличения расстояния между фрагментами уменьшается сила их взаимодействия, расталкивающая сила. Этот факт учтен в предложенной в данной главе модели разлета фрагментов разрушенного метеороида. Получено аналитическое решение уравнения динамики фрагмента без учета сопротивления. Получена формула, определяющая поперечную скорость осколков в последний момент их взаимодействия. В разделе приложений на графике дается сравнение решений уравнения динамики с постоянной и уменьшающейся расталкивающей силой. Показано, что индуцируемая поперечная скорость сферического фрагмента существенно меньше значений, опубликованных ранее другими авторами.

Кроме того, численно решено уравнение динамики фрагмента, учитывающее возникающее сопротивление воздуха. Показано, что решение задачи о разлете двух фрагментов сферической формы с учетом сопротивления и без него практически совпадают. Оценен характер уменьшения поперечной скорости под действием силы сопротивления после прекращения взаимодействия фрагментов. Показано, что поперечная скорость разлета осколков убывает очень медленно. Результаты расчетов занесены в таблицу, а также представлены в виде графика в разделе приложений.

Во второй части предложена новая модель разрушения метеороида по слоям. В ней более подробно по сравнению с существующими моделями дробления описан разлет фрагментов в поперечном направлении. Модель разрушения по слоям опирается на результаты главы 2 о взаимодействии двух сфер в сверхзвуковом потоке, а также на результаты численных экспериментов по обтеканию группы сфер. Они говорят о том, что расталкивающая сила, действующая на тела, находящиеся во внешнем слое, существенно больше силы, действующей на остальные тела.

Разрушенное тело представляется в виде роя (компактной совокупности) фрагментов сферической формы. Предлагаются к рассмотрению две формы исходного тела, а далее роя фрагментов — цилиндрическая и сферическая. Дробление метеороида происходит по этапам. На каждом этапе изучается взаимодействие фрагмента внешнего слоя и центральной части, которая считается неподвижным целым. Это взаимодействие длится до тех пор, пока внешний слой не отойдет на расстояние, равное радиусу центральной части. Тогда следующий слой становится внешним.

Описана геометрия слоев для предложенной модели разрушения. Для описания движения фрагментов внешнего слоя используется уравнение динамики главы 2. Проведены расчеты в соответствии с предложенной моделью дробления для тела с некоторыми заданными параметрами. Определено время разрушения метеороида в зависимости от количества образующихся фрагментов, высоты дробления, размера и формы исходного тела. Результаты расчетов занесены в таблицы. Получено, что время разрушения много меньше времени движения метеороида в атмосфере и практически не зависит от количества фрагментов, на которое тело дробится в соответствии с предложенной моделью разрушения по слоям.

Научная новизна результатов диссертации состоит в следующем:

* решение для модели единого тела представлено в новых координатах - время, высота и проекция траектории на горизонталь
* на основе анализа траекторий пяти болидов (в том числе болида Бенешов) выявлено, что наилучшую аппроксимацию наблюдаемой траектории дает формула, соответствующая модели единого тела с учетом абляции, т.е. форма светящегося участка траектории не обнаруживает явного влияния дробления метеорного тела
* решена задача о расхождении двух сфер, линия центров которых лежит поперек потока, под действием поперечной силы, полученной в результате численного эксперимента
* показано, что индуцируемая поперечная скорость сферического фрагмента существенно меньше значений, опубликованных ранее другими авторами
* выявлено, что влияние силы сопротивления, действующей в поперечном направлении столь мало, что при описании поперечного разлета фрагментов ее можно не учитывать
* предложена новая модель разрушения метеороида по слоям
* получено, что время разрушения много меньше времени движения метеороида в атмосфере и практически не зависит от количества фрагментов, на которое тело дробится в соответствии с предложенной моделью разрушения по слоям

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для решения задачи об оценке метеоритных и кратерных полей для модели дробления, а также для совершенствования теории, изучающей дробление метеороида под действием аэродинамической нагрузки.

Результаты диссертации опубликованы в работах [1]-[3], докладывались и обсуждались в школе - семинаре “Современные проблемы аэрогидродинамики”, Туапсе, “Буревестник” МГУ, 2001 г., на конференции - конкурсе молодых ученых, Москва, НИИ Механики, 2003, 2004, 2005 гг., на научных семинарах под руководством проф. В.П. Стулова.

**Заключение**

В результате выполненных автором исследований изучены и реализованы методы решения обратной задачи для наблюдаемой траектории болида, получено более ясное представление о динамике и термодинамике прохождения атмосферы метеорного тела.

Основные результаты и выводы работы:

1. Известное решение для модели единого тела представлено в новых координатах: время, высота над поверхностью планеты, проекция траектории на горизонталь. Решение в таком виде удобно использовать для оценки метеоритных и кратерных полей.
2. Проведен анализ траекторий пяти болидов «40151 А», «40590» (Lost City, 2,5), «40405», «38737\*» и EN070591 (Benesov) для оценки влияния процесса дробления на траекторию метеорного тела, в результате которого:

а) решена обратная задача, т.е. определены значения основных параметров для каждого болида

б) получено, что значение коэффициента абляции для болида Бенешов *а* = 0.0067с2/км2 (/? = 1.5), определенное в данной работе, соответствует результатам расчетов работы [51], полученным другим способом (сг = 0.006 ± 0.001с2/км2)

в) определено значение доатмосферной массы для каждого болида и выявлено, что значение массы, полученное фотометрическим методом, существенно превышает значение, определенное чисто динамическим способом, например, для болида Бенешов *Ме=* 28 кг, *Мph* =13000 кг

согласно данным наблюдателей

г) получено, что практически для всех изученных болидов наилучшую аппроксимацию наблюдаемой траектории обеспечивает модель единого тела с учетом абляции, т.е. форма светящегося участка траектории не обнаруживает явного влияния дробления метеорного тела. В случае болида Бенешов это можно объяснить тем, что масса, потерянная за счет абляции (15.8 кг) почти в два раза больше суммарной начальной массы фрагментов (7.19 кг)

1. Проведено исследование задачи о взаимодействии сферических фрагментов разрушенного метеорного тела в сверхзвуковом потоке, в результате которого:

а) предложена аппроксимация численных данных для коэффициента расталкивающей силы

б) получено аналитическое решение задачи о расхождении двух сфер, линия центров которых лежит поперек потока под действием уменьшающейся расталкивающей силы без учета сопротивления

в) выявлено, что поперечная скорость фрагмента в последний момент взаимодействия примерно в 2.4 раза меньше значений опубликованных ранее другими авторами

г) численно решена задача о расхождении двух сфер, линия центров которых лежит поперек потока под действием уменьшающейся расталкивающей силы с учетом сопротивления

д) обнаружено, что поперечная скорость фрагмента практически не убывает под действием силы сопротивления

е) предложена новая модель разрушения метеороида по слоям, в которой каждый фрагмент рассматривается как отдельное тело

ж) получено, что в соответствии с предложенной моделью разрушения метеороида по слоям время разрушения метеорного тела много меньше времени его движения в атмосфере и практически не зависит от количества фрагментов, на которое оно дробится.