УДК: 523.68

Моделирование полета и разрушения болида Бенешов

В. А. Андрущенко^a, Ф. А. Максимов^b, Н. Г. Сызранова^c

Институт автоматизации проектирования РАН,
Россия, 123056, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 19/18

E-mail: ^a andrusvictor@ya.ru, ^b f_a_maximov@mail.ru, ^c nina-syzranova@ya.ru

Получено 15.05.2018, после доработки — 21.07.2018.

Принято к публикации 21.09.2018.

Астероидно-кометная опасность в течение последних десятилетий признана научными и правительственными кругами всех стран мира одной из самых существенных угроз развития и даже существования нашей цивилизации. Одним из аспектов деятельности по предотвращению этой опасности является изучение вторжения достаточно крупных метеорных тел в атмосферу и их движения в ней, сопровождаемых большим числом физическо-химических явлений. Особый интерес вызывает падение метеорных тел, для которых прослежены их траекторные и прочие характеристики, и найдены сами выпавшие метеориты или их фрагменты. В настоящей работе изучено падение именно такого тела. На основе комплексной физико-математической модели, определяющей движение и разрушение космических тел естественного происхождения в атмосфере Земли, рассмотрены движение и фрагментация очень яркого болида Бенешов (Benešov, EN070591), который был зарегистрирован в Чехии Европейской наблюдательной системой в 1991 г. Для этого болида были получены уникальные наблюдательные данные, включая спектры излучения. В настоящей работе проведено моделирование аэробаллистики метеороида Бенешов и его фрагментов с учетом их сложного характера разрушения под воздействием тепловых и силовых факторов. Скорость метеорного тела, унос массы под действием тепловых потоков определяются из решения системы уравнений классической физической теории метеоров. При этом учитывается переменность параметра уноса массы по траектории. Процесс фрагментации метеороида рассматривается в рамках модели последовательного дробления на основе статистической теории прочности, с учетом влияния масштабного фактора на предел прочности объекта. Проведены расчеты совместного обтекания системы тел (осколков метеорита) при проявлении эффекта интерференции. Для расчета обтекания конгломерата осколков метеороида разработан метод моделирования на системе сеток, который позволяет рассматривать фрагменты различных форм, размеров и масс, а также допускает достаточно произвольное их относительное положение в потоке. Из-за неточностей в расчете траектории ученые 23 года не могли найти осколки этого болида. Благодаря современным методикам и более точным расчетам ученые выявили место падения, которое оказалось существенно удаленным от ожидаемого. После этого были обнаружены четыре небольших обломка метеорита. Проведенные расчеты движения и разрушения болида Бенешов показывают, что на процессы его взаимодействия с атмосферой влияет множество факторов: массовые и прочностные характеристики болида, параметры движения, механизмы разрушения, процессы взаимодействия фрагментов, включая эффекты интерференции, и др.

Ключевые слова: болид, моделирование, движение, фрагментация, тепловой поток, прочность, процессы взаимодействия

UDC: 523.68

Simulation of flight and destruction of the Benešov bolid

V. A. Andrushchenko^a, F. A. Maksimov^b, N. G. Syzranova^c

Institute for Computer Aided Design of RAS,
19/18 Vtoraya Brestskaya st., Moscow, 123056, Russia

E-mail: ^a andrusvictor@ya.ru, ^b f_a_maximov@mail.ru, ^c nina-syzranova@ya.ru

Received 15.05.2018, after completion — 21.07.2018.

Accepted for publication 21.09.2018.

Comets and asteroids are recognized by the scientists and the governments of all countries in the world to be one of the most significant threats to the development and even the existence of our civilization. Preventing this threat includes studying the motion of large meteors through the atmosphere that is accompanied by various physical and chemical phenomena. Of particular interest to such studies are the meteors whose trajectories have been recorded and whose fragments have been found on Earth. Here, we study one of such cases. We develop a model for the motion and destruction of natural bodies in the Earth's atmosphere, focusing on the Benešov bolid (EN070591), a bright meteor registered in 1991 in the Czech Republic by the European Observation System. Unique data, that includes the radiation spectra, is available for this bolid. We simulate the aeroballistics of the Benešov meteoroid and of its fragments, taking into account destruction due to thermal and mechanical processes. We compute the velocity of the meteoroid and its mass ablation using the equations of the classical theory of meteor motion, taking into account the variability of the mass ablation along the trajectory. The fragmentation of the meteoroid is considered using the model of sequential splitting and the statistical stress theory, that takes into account the dependency of the mechanical strength on the length scale. We compute air flows around a system of bodies (shards of the meteoroid) in the regime where mutual interplay between them is essential. To that end, we develop a method of simulating air flows based on a set of grids that allows us to consider fragments of various shapes, sizes, and masses, as well as arbitrary positions of the fragments relative to each other. Due to inaccuracies in the early simulations of the motion of this bolid, its fragments could not be located for about 23 years. Later and more accurate simulations have allowed researchers to locate four of its fragments rather far from the location expected earlier. Our simulations of the motion and destruction of the Benešov bolid show that its interaction with the atmosphere is affected by multiple factors, such as the mass and the mechanical strength of the bolid, the parameters of its motion, the mechanisms of destruction, and the interplay between its fragments.

Keywords: bolide, modeling, motion, fragmentation, heat flow, strength, interplay process

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 605–618 (Russian).

Введение

В 1991 году в Чехии упал один из крупнейших болидов, зарегистрированных Европейской сетью (EN070591) [Spurny, 1994] и занесенный в базу метеоритных явлений [Meteoritical Bullitin Database, 2016]. Он принадлежал к промежуточному и сравнительно слабо изученному классу космических тел, которые практически полностью «сгорали» (а точнее, испарялись) в атмосфере [Kondaurov et al., 1998; Wasson, Boslough, 2000]. В работе [Шувалов, Трубецкая, 2007] было предложено называть их гигантскими болидами. В отличие от метеороидов, сопровождаемых кратерообразующими ударами, у тел этого класса почти вся энергия выделяется в атмосфере, а не в грунте. Излучение, испускаемое «огненным шаром», образовавшимся от воздушного взрыва такого болида, может привести к пожарам [Svetsov, 2002], а ударная волна — к разрушениям на земной поверхности [Шувалов, Трубецкая, 2007; Collins et al., 2017]. В данном случае этого не случилось, так как завершающий взрыв произошел на достаточно большой высоте (см. ниже). Из-за неточностей в расчете траектории ученые 23 года не могли найти осколки этого болида, получившего название Бенешов. Благодаря современным методикам и более точным расчетам ученые выявили место падения, которое оказалось существенно удаленным от ожидаемого. В ходе поиска были обнаружены четыре небольших обломка метеорита [Spurny et al., 2014]. Все четыре осколка, безусловно, принадлежали болиду Бенешов, однако они имели различный минералогический состав, в результате чего был сделан вывод, что этот метеороид за свой жизненный период в главном поясе астероидов часто сталкивался с другими, что и привело к такому разнообразию в его минералогическом составе. Следует отметить, что подобная ситуация, когда траектория и место падения осколков метеороида изначально были определены неправильно, из-за чего их поиски затягивались на годы и даже десятилетия, не редкость. Так, фрагменты даже самого крупного метеоритного каменного дождя в России и третьего в мире — Царев, — поиски которого после выпадения 6 декабря 1922 г. велись в Ашхабадской области, были обнаружены только через 57 лет в Волгоградской области [Бронштэн, 1999]. А фрагменты многих других космических тел, несмотря на многочисленные поисковые экспедиции, не обнаружены и по сей день [Андрущенко, Шевелев, 2013].

Болид Бенешов был одним из наиболее ярких болидов. Его светимость, по данным [Borovička, Spurny, 1996; Немчинов, Попова, 1998], достигала 21m звездной величины (для сравнения: блеск Луны примерно 13m, Солнца — 26m), а начальная скорость при почти вертикальном вхождении в атмосферу составляла ~ 21 км/с. Начиная с высоты 42 км наблюдалось отделение фрагментов от основного тела; так, до достижения высоты 24 км отделилось 4 фрагмента, один из которых дополнительно разделился надвое. На высоте 24 км произошло отделение еще трех крупных обломков и последующее дробление на множество мелких. Окончательное угасание болида состоялось на высоте ~ 19 км.

В работе [Borovička et al., 1998] проанализированы данные наблюдений фрагментации этого болида, обсуждены различные модели, позволившие оценить массу входа. Динамическая модель гросс-фрагментации [Ceprecha et al., 1993], учитывавшая дробление основного тела, дала значение для массы входа 80–300 кг. Использование модели радиационного радиуса [Попова, 1997] привело к значениям 3000–4000 кг. Фотометрическая же масса болида, согласно оценкам наблюдателей [Borovička, Spurny, 1996], составила 13000 кг. Такое существенное расхождение оценок массы болида, рассчитанных с помощью вышеуказанных моделей, в [Borovička et al., 1998] было объяснено следующим образом. Аномально высокое свечение болида было обусловлено движением не единого тела, а компактного роя фрагментов с большой суммарной площадью светящейся поверхности. Причем предполагалось, что процесс фрагментации болида начался уже на высотах $H = 60\text{--}50$ км при давлениях $(1\text{--}5) \cdot 10^5$ Н/м². Вследствие небольшой поперечной скорости разлета обломков от основной траектории (расстояние между фрагментами составляло не более 20 м) фрагментация не была зарегистрирована на этих высотах. Динамическая масса определялась по лидирующему фрагменту, в то время как суммарная масса фрагментов была намного больше, чем его масса. Наилучшая оценка начальной массы болида,

как утверждается в [Borovička et al., 1998], составила 2000–4000 кг при равенстве его плотности 2 г/см^3 . Существенным моментом в исследовании процесса разрушения этого болида явилась его ранняя фрагментация на больших высотах, не зарегистрированная инструментально.

В данной работе на основе расширенных уравнений метеорной физики путем учета дополнительных физических факторов проведено численное исследование полета и разрушения болида Бенешов. Параметры аэробаллистики болида Бенешов и его осколков рассчитывались с учетом сложного характера разрушения под воздействием тепловых и силовых нагрузок и совместного обтекания системы тел (осколков метеороида) при проявлении фактора интерференции.

1. Постановка задачи. Основные уравнения

Рассматривается движение метеорного тела в атмосфере Земли. За исходные уравнения принимаются уравнения физической теории метеоров [Андрущенко и др., 2013] при движении в экспоненциальной атмосфере $\rho = \rho_0 \exp(-z/h)$ (z — высота положения метеорного тела над поверхностью Земли, ρ_0 — плотность атмосферы при $z = 0$, h — характерная шкала высоты):

$$\begin{aligned} M \frac{dV}{dt} &= Mg \sin \theta - C_D S_{mid} \frac{\rho V^2}{2}, \\ V \frac{d\theta}{dt} &= g \cos \theta - \frac{V^2 \cos \theta}{R_3 + z}, \\ H_{eff} \frac{dM}{dt} &= -C_H S_{mid} \frac{\rho V^3}{2}, \\ \frac{dz}{dt} &= -V \sin \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где V , M , θ — скорость тела, его масса и угол наклона траектории падения к горизонту; R_3 — радиус Земли; C_D , C_H , H_{eff} — коэффициенты сопротивления, теплопередачи к поверхности тела и эффективной энтальпии испарения метеорного тела; S_{mid} — площадь поперечного сечения тела. Площадь мицеля S_{mid} в общем случае величина переменная, так как масса метеорного тела с высотой меняется:

$$\frac{S_{mide}}{S_{mid}} = \left(\frac{M_e}{M} \right)^\mu.$$

Индекс e соответствует параметрам входа тела в атмосферу. Величина параметра μ характеризует влияние изменения формы тела вследствие уноса массы. При $\mu = 2/3$ унос происходит равномерно по всей поверхности и коэффициент формы тела сохраняется. Необходимым условием для этого является быстрое и беспорядочное вращение метеорного тела, обеспечивающее равномерный унос массы со всей поверхности. В другом предельном случае ($\mu = 0$) ориентированного движения без вращения максимальный нагрев и, следовательно, унос массы приходится на окрестность критической точки. Этот случай эквивалентен допущению о постоянстве миделевого сечения. Одной из трудностей в рассматриваемой задаче является неопределенность формы летящего метеороида. Космические тела имеют различную форму, как правило, несимметричную. К тому же они могут быть произвольно ориентированы в полете или хаотично вращаться. Опытных данных о вращении метеорных тел мало, однако изучение выпавших метеоритов показывает, что подавляющее большинство из них имеет признаки взаимодействия с атмосферой, равномерно распределенные по всей поверхности тела [Бронштэн, 1995]. В данной работе полагается, что форма рассматриваемого метеорного тела — сферическая (простейшая форма из класса плохобтекаемых тел), а показатель уноса массы μ равен $2/3$.

В высокотемпературном газовом потоке имеет место два механизма передачи тепла от газа к поверхности тела: конвективная теплопередача и перенос тепла излучением. Формулы для расчета для конвективного и лучистого потока к поверхности болида с учетом интенсивного испарения материала объекта представлены в [ReVelle, 1976; Андрущенко и др., 2007].

Расчет уноса массы требует также учета процесса дробления болида. Механизм дробления болида Бенешов в настоящей работе интерпретируется следующим образом. Существенным моментом в исследовании процесса разрушения этого болида предположительно является его ранняя фрагментация (на высотах 60–50 км) [Попова, 1997]. Поэтому, начиная с высоты ~ 60 км, уже рассматривается процесс фрагментации болида. Используется модель последовательного дробления на основе статистической теории прочности [Weibull, 1939; Weibull, 1951], когда фрагментация происходит по дефектам и трещинам, которые присущи таким структурно неоднородным телам, как метеороиды. В результате фрагментация представляется как процесс последовательного устранения дефектов при возрастании нагрузки путем разрушения тела по этим дефектам; таким образом, появляющиеся фрагменты обладают большей прочностью, чем исходное тело. Подробно эта модель представлена в работах [Тирский, Ханукаева, 2008; Сызранова и др., 2017]. В этом случае прочность фрагмента запишется в виде

$$\sigma_f^* = \sigma_e \left(M_e / M_f \right)^\alpha, \quad (2)$$

где σ_e , M_e — предел прочности и масса метеороида до входа в атмосферу; σ_f^* , M_f — те же характеристики для фрагмента; α — показатель степени неоднородности материала (для больших α неоднородность выше).

Условие начала разрушения болида в атмосфере таково:

$$\rho_* V_*^2 = \sigma^*, \quad (3)$$

где слева — величина скоростного напора, а σ^* — одна из прочностных характеристик материала метеороида (прочность на сжатие, растяжение, сдвиг).

Высота начала дробления z_* в экспоненциальной атмосфере определяется при предположении, что к этому моменту тело не успело затормозиться, и его скорость равна начальной скорости входа в атмосферу V_e :

$$z_* = h \ln \left(\rho_e V_e^2 / \sigma^* \right). \quad (4)$$

Если рассматривать модель прогрессивного дробления, то, начиная с этой высоты, вместо единого тела падает уже рой дробящихся осколков со всё увеличивающимся их количеством N . При предположении, что образовавшиеся фрагменты — сферы одинаковой массой M_f ($M_f = M / N$), из уравнений (2)–(4) получается их количество в зависимости от текущих величин скоростного напора и суммарной массы всех фрагментов и площадь миделя (определяемая в предположении, что осколки не перекрываются):

$$N = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/\alpha} = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\sigma^*} \right)^{1/\alpha}; \quad S_{mid} = S_{mid*} \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/3\alpha}. \quad (5)$$

Исследование движения не единого тела, а компактного роя фрагментов с большой суммарной площадью светящейся поверхности позволяет объяснить аномально высокое свечение болида.

В данной работе рассматриваются также сценарии, когда происходит обтекание роя фрагментов метеорного тела с учетом эффекта интерференции. В этом случае рассматривается сопряженная задача о полете системы тел, когда аэродинамическая и баллистическая задачи решаются параллельно. Преимущество подобного подхода при моделировании заключается

в возможности рассмотрения обтекания группы тел различных размеров и форм с достаточно произвольной конфигурацией их взаимного расположения.

Фрагментация болида Бенешов регистрировалась начиная с высоты 42 км. Как показали данные наблюдений [Spurny, 1994], в диапазоне высот $24 < H < 42$ км от основного тела отделялись относительно мелкие фрагменты (рис. 1). На высоте 24 км произошло окончательное дробление болида на три крупных и множество мелких осколков, а его полное угасание состоялось на высоте ~ 19 км.

Рис. 1. Схема разлета фрагментов болида Бенешов; Y — боковое отклонение; 1–8 — номера наблюдаемых фрагментов [Borovička et al., 1998]

2. Методы расчетов

Для расчета обтекания конгломерата осколков метеороида разработан метод моделирования на системе сеток [Максимов, 2013], который позволяет рассматривать фрагменты различных форм, размеров и масс, а также допускает достаточно произвольное их относительное положение в потоке. Реализуется сопряжение аэродинамического и баллистического расчетов. Сложность решения задачи и громоздкость вычислений заключаются в учете взаимной интерференции тел — фрагментов метеороида в системе при их обтекании сверхскоростным потоком.

Метод моделирования обтекания такой системы осуществляется с помощью многосеточного алгоритма. На регулярную сетку с прямоугольными ячейками накладывается система криволинейных сеток, связанных с обтекаемыми объектами. Внешняя регулярная сетка не позволяет адекватно описать вязкие эффекты в следе из-за недостаточного сгущения узлов в соответствующих областях, и моделирование на этой сетке осуществляется посредством уравнений Эйлера. Около поверхности обтекаемых тел строится специальная криволинейная сетка, включающая в себя нормаль к поверхности тела и обеспечивающая сгущение узлов к ней для представления газодинамических функций в вязком слое около нее. Здесь используются уравнения Навье–Стокса в приближении тонкого слоя, в рамках которых учитываются как члены уравнений Эйлера, так и члены пограничного слоя [Maksimov et al., 2011]. В приближении пограничного слоя учитываются основные диссипативные процессы, для правильной оценки которых необходимо сгущение узлов по нормали к поверхности тела, что и обеспечивается используемой сеткой. Решения на внешней регулярной и на наборе криволинейных сеток около тел сравниваются с помощью обмена информацией о газодинамических функциях посредством интерполяции [Максимов, 2013; Лукашенко, Максимов, 2017]. Преимущество подобного подхода

проявляется в возможности рассмотрения обтекания системы тел различных размеров и форм с достаточно произвольной ее конфигурацией.

После решения задачи обтекания рассчитываются аэродинамические силы, действующие на каждое из тел, по найденному распределению давления.

На следующем шаге решаются уравнения движения (1) и проводится перерасчет состояния системы (координат и скорости тел) за некоторый малый интервал времени. Аэродинамические коэффициенты при этом определяются из решения аэродинамической задачи, а значения баллистических параметров — по текущим значениям для каждого из тел. Далее тела перемещаются на сетке решения задачи обтекания — каждое из них на расстояние, соответствующее относительному смещению тел в системе (т. е. за исключением смещения всей системы в среднем). Шаг интегрирования по времени выбирается из условия так, чтобы максимальное смещение тел на сетке для расчета обтекания составляло не более некоторого задаваемого значения. Такое условие необходимо для обеспечения хорошего начального приближения для решения задачи с помощью метода установления и, соответственно, более быстрого установления течения. Причем все газодинамические расчеты проводятся при фиксированном числе Маха. В случае изменения скорости набегающего потока на каждом шаге интегрирования применение метода установления требовало бы дополнительных вычислений и, как следствие, больших временных затрат.

В общем случае скорости разных тел в системе имеют различные значения. Предполагается, что первоначально тела движутся почти с одинаковой скоростью или есть направление, в котором практически и происходит движение конгломерата тел с некоторой средней скоростью. Скорость каждого отдельного элемента может иметь некоторое относительно небольшое отклонение от среднего значения. Именно при среднем значении скорости осуществляется аэродинамический расчет. Если какое-то тело имеет значительно отличающуюся скорость, то оно будет заведомо быстро удаляться от системы, и тогда его движение можно рассматривать независимо от остальных тел системы.

3. Результаты расчетов

При проведении расчетов, оценивающих параметры движения и разрушения болида Бенешов, принимались следующие исходные данные [Borovička et al., 1998]: масса болида при входе в атмосферу — 3000 кг, плотность — 2 г/см^3 , скорость входа — 21.11 км/с, угол входа — 81° . На рис. 2 представлены изменение скорости метеороида Бенешов в зависимости

Рис. 2. Изменение скорости вдоль траектории полета:
1 — данные наблюдений [Барри, 2006], 2 — расчетные данные

от высоты полета H в рамках модели единого тела (без учета дробления, но с учетом абляции). Расчетные данные (кривая 2) сравниваются с данными наблюдений, которые приводятся в работе [Барри, 2006] (кривая 1). В рамках расчета модели единого тела наблюдается сильное расхождение представленных данных.

В работе [Барри, Стулов, 2003] делается вывод, что для приближенного описания всей траектории разрушающегося болида Бенешов можно использовать модель единого тела. В этой работе расчетная кривая изменения скорости болида в зависимости от высоты полета хорошо согласуется с данными наблюдений. Этот факт авторы объясняют тем, что массы отделяющихся фрагментов много меньше массы основного тела. При этом параметры, полученные в [Барри, Стулов, 2003], дают начальную массу болида сферической формы, равную $M_e = 28$ кг, что явно не согласуется с параметрами светимости болида.

Для корректного исследования параметров движения и разрушения в настоящей работе используется модель, учитывающая дробление болида. Космическое тело может разрушиться на несколько крупных фрагментов, которые летят затем автономно, или раздробиться на облако мелких осколков, объединенных общей ударной волной и летящих как единое целое. Это облако обычно быстро расширяется и тормозится во время полета, вызывая яркую вспышку излучения. При разрушении крупного метеорного тела могут реализовываться одновременно оба сценария фрагментации. В обоих случаях осколки тела приобретают скорости в направлении, перпендикулярном траектории, что приводит к поперечному рассеянию фрагментов. Анализ динамики болида и его излучения позволяет предположить, что этот метеороид начал дробиться на большой высоте, около 60 км [Попова, 1997]. Благодаря относительно низкой скорости в направлении, перпендикулярном основной траектории, фрагменты расходятся на расстояние не более, чем точность фотографических измерений. Если фрагменты после разрушения летят отдельно, но компактно, то наблюдаемая траектория относится к лидирующему фрагменту, а суммарная масса фрагментов больше, чем масса лидера.

В настоящей работе критическое значение прочностного параметра болида считалось равным 10^5 Н/м², в этом случае высота начала его фрагментации, согласно формуле (4), составила 62 км.

На первом этапе движения (от высоты начала дробления 62 км до высоты, когда начала регистрироваться фрагментация) проводилось исследование движения роя фрагментов с учетом модели прогрессивного дробления [Ханукаева, 2002; Тирский, Ханукаева, 2008]. На рис. 3 представлены расчетные данные по изменению числа образующихся фрагментов и массы каждого из них в зависимости от высоты полета при разных значениях показателя степени неоднородности материала α . При расчетах полагалось, что образующиеся фрагменты имеют одинаковый размер. Важным фактором, который здесь учитывается, — переменность параметра

Рис. 3. Число образующихся фрагментов N и масса отдельного фрагмента M_f в зависимости от высоты полета при разных значениях показателя α : 1 — $\alpha = 0.8$, 2 — 0.5, 3 — 0.3

уноса массы метеорита под воздействием тепловых потоков вдоль траектории полета. В некоторых работах других авторов, например [Стулов, Титова, 2001], этот параметр полагался постоянным. Из данных рис. 3 видно, что при $\alpha = 0.8$ к высоте 42 км может образоваться ~ 35 фрагментов массой около 70 кг каждый, при $\alpha = 0.5$ — около 280 фрагментов массой 9 кг каждый, при $\alpha = 0.3$ — ~ 7000 фрагментов массой около 300 г каждый. Как показывают данные рис. 3, число и масса фрагментов сильно зависят от степени неоднородности материала болида.

Проводились оценки возможного разлета фрагментов на больших высотах. Как показывают расчеты, на этих высотах из-за низкой плотности воздуха образовавшиеся фрагменты приобретают лишь небольшую боковую скорость, то есть практически не разлетаются. Так, например, время разлета двух тел массой 100 кг каждое на высоте $H = 62$ км составляет 0.13 с, при этом они приобретают боковую скорость 5.8 м/с. С учетом этой скорости за 4 км пролета по траектории расстояние между телами увеличивается всего с 0.55 м до 2.2 м. Расчет взаимодействия двух тел сильно различающимися массами (2900 кг и 100 кг) на этой же высоте показывает, что они летят долгое время вместе, несмотря на разные баллистические свойства, и в итоге маленькое тело затягивается в след большего (рис. 4).

Рис. 4. Разлет тел массой 2900 и 100 кг на высоте 62 км.
Изолинии давления в моменты времени: 0.0 (а), 0.1 (б), 0.2 (в), 0.3 (г) и 0.4 с (д)

То есть расчетные данные подтверждают тот вывод работы [Borovička, Spurný, 1996; Немчинов, Попова, 1998], что аномально высокое свечение болида на высоте 42 км, начиная с которой регистрировалось дробление болида, обусловлено движением не единого тела, а компактного роя фрагментов с большой суммарной площадью светящейся поверхности. Фрагменты летят автономно, торможение определяется лидирующим фрагментом, а полная масса метеороида гораздо больше, чем масса лидера. То есть излучение фрагментов суммируется, соответствуя практически всей общей массе.

Рассмотрим подробнее картину разлета трех фрагментов от лидирующего фрагмента на высоте 24 км (рис. 1). На этой высоте уже наблюдаются сравнительно большие поперечные скорости разлета обломков. На рис. 5–6 продемонстрированы расчетные данные для двух сценариев: первый — масса лидера 100 кг, от него отделяются три осколка по 10 кг каждый; второй — масса лидера 10 кг, от него отделяются три фрагмента по 0.5 кг каждый. Показаны картины разлета, изолинии давления и приведены графики изменения боковой скорости от времени для этих сценариев. На рис. 5, кривая 0 соответствует большому телу; 1 — фрагменту, первоначально расположенному чуть выше большего тела и приобретающему за 0.015 с боковую скорость около 140 м/с и выходящему из области влияния последнего; 2 — фрагменту,

Рис. 5. Картина разлета трех тел массой 10 кг и тела массой 70 кг на высоте 24 км.
Изолинии давления в моменты времени: 0.0 (а), 0.01 (б), 0.02 (в) и 0.03 (г).
Изменение боковой скорости от времени (д), 0 — основное тело, 1–3 — фрагменты

Рис. 6. Картина разлета трех тел массой 0.5 кг и тела массой 10 кг на высоте 24 км.
Изолинии давления в моменты времени: 0.002 (а), 0.004 (б), 0.006 (в) и 0.008 (г). 0.01 с (д).
Изменение боковой скорости от времени (е), 0 — основное тело, 1–3 — фрагменты

первоначально расположенному чуть впереди большого тела, отлетающему с максимальной боковой скоростью около 160 м/с; 3 — фрагменту, первоначально расположенному чуть сзади большого тела и отлетающему с минимальной боковой скоростью около 110 м/с. Из рис. 6 видно, что первый фрагмент медленно набирает боковую скорость, но остается в следе основного тела. Второй фрагмент, который первоначально был чуть впереди лидера, отлетает с боковой скоростью ~ 150 м/с. Третий фрагмент, первоначально расположенный сзади, так и остается непосредственно за основным телом. Понятно, что возможно множество сценариев в зависимости от количества разлетающихся фрагментов, их форм, размеров и масс, а также от их относительного положения в потоке.

Моделирование разлета тел с учетом всевозможных углов отклонения при дроблении дает трубку траекторий осколков с оценкой площади выпадения. Как показывают расчеты, максимальное расстояние между выпавшими фрагментами для двух представленных вариантов разлета составляет ~ 300 м. Следует отметить, что чешским ученым удалось обнаружить четыре небольших обломка метеорита, когда они сместили линию предполагаемого падения метеорита на 330 метров (Источник: Чешское Радио-7, URL: <https://www.radio.cz/ru/rubrika/novosti/cheshskie-astronomy-razgadali-zagadku-bolida-beneshev>).

Так как наблюдаемая масса отделившихся фрагментов в диапазоне высот $42 > H > 24$ км много меньше массы основного тела (лидера) [Borovička, Spurný, 1996], его траекторные параметры на этом участке траектории можно оценить с помощью модели единого тела. Рассматриваются два варианта. В первом варианте считается, что начиная с высоты 42 км наблюдается траектория одного из достаточно крупных фрагментов ~100 кг — лидера, образовавшегося на большой высоте, от которого отделяются более мелкие осколки, во втором — траектория фрагмента лидера массой 50 кг. На рис. 7 представлены данные наблюдений (кривая 1), а также расчетные данные для этих двух вариантов (кривые 2, 3).

Видно, что результаты расчета по параметрам траектории удовлетворительно согласуются с данными наблюдений.

Рис. 7. Изменение скорости вдоль траектории полета: 1 — данные наблюдений [Барри, 2006], 2 — расчетные данные для фрагмента лидера массой 100 кг, 3 — расчетные данные для фрагмента лидера массой 50 кг

Заключение

Численно на основе расширенных уравнений физической теории метеорных тел совместно с уравнениями Эйлера и Навье–Стокса для сжимаемого газа изучены основные процессы, сопровождавшие падению болида Бенешов в атмосфере Земли. Учитывались его разрушения

под воздействием конвективных и радиационных тепловых потоков, фрагментация из-за скоростного напора, превышавшего его прочностные характеристики, влияние взаимодействия осколков при их совместном обтекании, вызванном эффектом интерференции и др. Проведенная оценка возможного разлета фрагментов на высотах ~ 60–40 км показала, что из-за низкой плотности воздуха осколки не разлетаются на большие расстояния, а летят компактно с большой суммарной площадью светящейся поверхности. Это подтверждает установленный факт, что наблюдаемое торможение болида относится к лидирующему фрагменту. С понижением высоты полета разлет отдельных фрагментов может быть существенным — до 300 м. Сравнение траекторных характеристик болида, полученных в ходе вычислительного эксперимента, с данными наблюдений показало хорошее коррекционное согласие. Еще раз подтвердился факт того, что исследование движения, разрушения и фрагментации каждого конкретного метеороида является самостоятельной задачей.

Список литературы (References)

- Андрущенко В. А., Сызранова Н. Г., Шевелев Ю. Д. Оценка тепловых потоков к поверхности затупленных тел при движении с гиперзвуковой скоростью в атмосфере // Прикладная математика и механика. — 2007. — Т. 71, вып. 5. — С. 827–836.
Andrushchenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D. An estimate of heat transfer to blunt bodies moving with hypersonic velocity in the atmosphere // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 2007. — Vol. 71. — P. 747–754.
- Андрущенко В. А., Сызранова Н. Г., Шевелев Ю. Д. Моделирование падения Челябинского метеорита // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 927–940.
Andrushchenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D. Modelirovanie padeniia Cheliabinskogo meteorita // Komp'iuternye issledovaniia i modelirovanie. — 2013. — Vol. 5, No. 6. — P. 927–940 (in Russian).
- Андрущенко В. А., Шевелев Ю. Д. Обстрел Земли из космоса — хроника столетия // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 907–916.
Andrushchenko V. A., Shevelev Yu. D. Obstrel Zemli iz kosmosa. Khronika stoletia // Komp'iuternye issledovaniia i modelirovanie. — 2013. — Vol. 5, No. 6. — P. 907–916 (in Russian).
- Барри Н. Г. Испарение и разрушение метеорного тела в атмосфере: дисс. канд. физ.-мат. наук. — МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006. — 75 с.
Barri N. G. Isparenie i razrushenie meteorного tela v atmosphere: diss. kand. fiz.-mat. nauk. — MGU im. M. V. Lomonosova, 2006. — 75 p. (in Russian).
- Барри Н. Г., Стулов В. П. Особенности движения болида Бенешов // Астрономический вестник. — 2003. — Т. 17, № 4. — С. 332–335.
Barri N. G., Stulov V. P. Osobennosti dvizhenia bolida Beneshov // Astronomicheskii vestnik. — 2003. — Vol. 17, No. 4. — P. 332–335 (in Russian).
- Бронштэн В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере // Астрономический вестник. — 1995. — Т. 29, № 5. — С. 450–458.
Bronshten V. A. Droblenie i razrushenie krupnykh meteorных tel // Astronomicheskii vestnik. — 1995. — Vol. 29, No. 5. — P. 450–458 (in Russian).
- Бронштэн В. А. Гигантские метеориты XX в. // Природа. — 1999. — № 3. — С. 62–68.
Bronshten V. A. Gigantskie meteority XX veka // Priroda. — 1999. — No. 3. — P. 62–68 (in Russian).
- Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А. Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2017. — № 9 (69). — С. 1–14.
Lukashenko V. T., Maksimov F. A. Matematicheskai model razleta oskokov meteorного tela posle razrusheniia // Inzhenernyi zhurnal: nauka i inovatzii. — 2017. — No. 9 (69). — P. 1–14 (in Russian).
- Максимов Ф. А., Чураков Д. А., Шевелев Ю. Д. Разработка математических моделей и численных методов для решения задач аэродинамического проектирования на многопроцессорной вычислительной технике // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. — 2011. — Т. 51, № 2. — С. 303–328.
Maksimov F. A., Churakov D. A., Shevelev Yu. D. Development of mathematical models and numerical methods for aerodynamic design on multiprocessor computers // Comput. Math. and Math. Phys. — 2011. — Vol. 51. P. 284.

- Максимов Ф. А. Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 961–971.
Maksimov F. A. Sverkhzvukovoe obtekanie sistemy tel // Kompiuternye issledovaniia i modelirovanie. — 2013. — Vol. 5, No. 6. — P. 961–971 (in Russian).
- Немчинов И. В., Попова О. П. Суперболиды // Природа. — 1998. — № 7. — С. 20–28.
Nemchinov I. V., Popova O. P. Superbolids // Priroda. — 1998. — No. 7. — P. 20–28 (in Russian).
- Попова О. П. Определение параметров крупных метеорных тел по набл. данным: дисс. канд. физ.-мат. наук. — Ин-т динамики геосфер, 1997. — 198 с.
Popova O. P. Opredelenie parametrov krupnykh tel po nabl. dannym: diss. kand. fiz.-mat. nauk. — In-t dinamiki geosfer, 1997. — 198 p. (in Russian).
- Стулов В. П., Титова Л. Ю. Сравнительный анализ моделей дробления метеорных тел // Астрономический вестник. — 2001. — Т. 35, № 4. — С. 345–349.
Stulov V. P., Titova L. Yu. Sravnitelnyi analiz modeley drobleniya meteornykh tel // Astronomicheskii vestnik. — 2001. — Vol. 35, No. 4. — P. 345–349 (in Russian).
- Сызранова Н. Г., Андрущенко В. А., Головешкин В. А. О разрушении метеорных тел в атмосфере Земли // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2017. — Т. 23, № 1. — С. 104–116.
Syzranova N. G., Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A. O razrushenii meteornykh tel v atmosphere Zemli // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktzii. — 2017. — Vol. 23, No. 1. — P. 104–116 (in Russian).
- Тирский Г. А., Ханукаева Д. Ю. Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере // Космические исследования. — 2008. — Т. 46, № 2. — С. 122–134.
Tirskiy G. A., Khanukaeva D. Yu. Ballistics of a fragmenting meteor body with allowance made for ablation in the non-isothermal atmosphere // Cosmic Research. — 2008. — Vol. 46, No. 2. — P. 120–132.
- Ханукаева Д. Ю. Аэротермобаллистика единого и дробящегося метеороида в неизотермической атмосфере: дисс. канд. физ.-мат. наук. — МФТИ, 2002. — 162 с.
Khanukaeva D. Yu. Aerotermoballistika edinogo b drobiashchegosia meteoroid v neizotermicheskoi atmosphere: diss. kand. fiz.-mat. nauk. — MFTI, 2002. — 162 p. (in Russian).
- Шувалов В. В., Трубецкая И. А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрономический вестник. — 2007. — Т. 41, № 3. — С. 241–251.
Shuvalov V. V., Trubetzkaya I. A. Gigantskie bolidsy v atmosphere Zemli // Astronom. vest. — 2007. — Vol. 41, No. 3. — P. 241–251 (in Russian).
- Borovička J., Popova O. P., Nemtchinov I. V., Spurny P., Ceplecha Z. Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: comparison of theory with observations I. Benešov bolide dynamics and fragmentation // Astron. Astrophys. — 1998. — Vol. 334. — P. 713–728.
- Borovička J., Spurny P. Radiation study of two very bright terrestrial bolides and an application to the Comet S-L 9 Collision with Jupiter // Icarus. — 1996. — Vol. 121. — P. 484–510.
- Ceplecha Z., Spurny P., Borovička J., Kecklová J. Atmospheric fragmentation of meteoroids // Astron. Astrophys. — 1993. — Vol. 279. — P. 615–626.
- Colins G. S., Lynch E., McAdam R., Davison T. M. A numerical assessment of simple airblast models of impact airburst // Meteor. & Planet. Sci. — 2017. — Vol. 52, No. 8. — P. 1542–1560.
- Kondaurov V. I., Konyukhov A. V., Polukhin V. V., Utyuzhnikov S. V. Mathematical simulation of gas cloud motion following the atmospheric explosion of a meteoroid // Fluid Dynamics. — 1998. — Vol. 33, No. 1. — P. 24–30.
- Meteoritical Bulletin Database / URL: <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>
- ReVelle D. O. Dynamics and thermodynamics of large meteor entry: a quasi-simple ablation model. — Planetary Sci. SR-76-1, 1976.
- Spurny P. Recent fireballs photographed in central Europe // Planet. and Space Sci. — 1994. — Vol. 42, No. 2. — P. 157–162.

- Spurny P., Haloda J., Borovička J., Shrubeny L. et al.* Reanalysis of the Benešov bolide and recovery of polymictic breccias meteorites — old mystery solved after 20 years // *Astron. and Astrophys.* — 2014. — Vol. 570. — P. A39/1-A39/14.
- Svetsov V. V.* Grazing meteoroids could ignite continental scale fires / *Catastrophic events and mass extinctions: impact and beyond*. Geological Soc. Amer. Spec. Paper 356. — 2002. — P. 685–694.
- Wasson J. T., Boslough M. B. E.* Large Aerial Bursts: An Important Class of Terrestrial Accretionary Events, Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impact and Beyond. LPI Contrib. no. 1053, Houston: Lunar and Planet. Inst., 2000. — P. 239–240.
- Weibull W. A.* A statistical theory of the strength of materials // *Proc. Roy Swedish Inst. Eng. Res.* — 1939. — No. 151. — P. 1–45.
- Weibull W.* A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* — 1951. — Vol. 10. — P. 140–147.