

УДК: 523.68

Численное моделирование физических процессов, приводящих к разрушению метеороидов в атмосфере Земли

Н. Г. Сызранова^a, В. А. Андрущенко^b

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

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

*Получено 20.12.2021, после доработки — 20.02.2022.
Принято к публикации 21.02.2022.*

В рамках актуальной проблемы кометно-астероидной опасности численно исследуются физические процессы, вызывающие разрушение и фрагментацию метеорных тел в атмосфере Земли. На основе разработанной физико-математической модели, определяющей движение космических объектов естественного происхождения в атмосфере и их взаимодействия с ней, рассмотрено падение трех одних из самых крупных и по некоторым показателям необычных болидов в истории метеоритики: Тунгусского, Витимского и Челябинского. Их необычность заключается в отсутствии каких-либо материальных метеоритных останков и кратеров в районе предполагаемого места падения для двух первых тел и обнаружении, как предполагается, основного материнского тела для третьего тела (из-за слишком малого количества массы выпавших осколков по сравнению с оценочной массой). Изучено воздействие аэродинамических нагрузок и тепловых потоков на эти тела, приводящее к интенсивному поверхностному уносу массы и возможной фрагментации. Скорости изучаемых небесных тел, изменение их масс определяются из модернизированной системы уравнений теории метеорной физики. Важный фактор, который здесь учитывается, — это переменность параметра уноса массы метеорита под действием тепловых потоков (радиационных и конвективных) вдоль траектории полета. Процесс фрагментации болидов в настоящей работе рассматривается в рамках модели прогрессивного дробления на основе статистической теории прочности с учетом влияния масштабного фактора на предел прочности объектов. Выявлены явления и эффекты, возникающие при различных кинематических и физических параметрах каждого из этих тел. В частности, изменение баллистики их полета в более плотных слоях атмосферы, заключающееся в переходе от режима падения к режиму подъема. При этом возможна реализация следующих сценариев события: первый — возврат тела обратно в космическое пространство при его остаточной скорости, большей второй космической; второй — переход тела на орбиту спутника Земли при остаточной скорости, большей первой космической; третий — при меньших значениях остаточной скорости тела возвращение его через некоторое время к режиму падения и выпадение на значительном расстоянии от предполагаемого места падения. Именно реализация одного из этих трех сценариев события объясняет, например, отсутствие материальных следов, в том числе и кратеров в случае Тунгусского болида в окрестности вывала леса. Предположения о возможности таких сценариев события высказывались и ранее другими авторами, а в настоящей работе их реализация подтверждена результатами численных расчетов.

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

UDC: 523.68

Numerical modeling of physical processes leading to the destruction of meteoroids in the Earth's atmosphere

N. G. Syzranova^a, V. A. Andrushchenko^b

Institute for Computer Aided Design of the RAS,
19/18 2-nd Brestskaya st., Moscow, 123056, Russia

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

*Received 20.12.2021, after completion — 20.02.2022.
Accepted for publication 21.02.2022.*

Within the framework of the actual problem of comet-asteroid danger, the physical processes causing the destruction and fragmentation of meteor bodies in the Earth's atmosphere are numerically investigated. Based on the developed physical-mathematical models that determines the movements of space objects of natural origin in the atmosphere and their interaction with it, the fall of three, one of the largest and by some parameters unusual bolides in the history of meteoritics, are considered: Tunguska, Vitim and Chelyabinsk. Their singularity lies in the absence of any material meteorite remains and craters in the area of the alleged crash site for the first two bodies and the non-detection, as it is assumed, of the main mother body for the third body (due to the too small amount of mass of the fallen fragments compared to the estimated mass). The effect of aerodynamic loads and heat flows on these bodies are studied, which leads to intensive surface mass loss and possible mechanical destruction. The velocities of the studied celestial bodies and the change in their masses are determined from the modernized system of equations of the theory of meteoric physics. An important factor that is taken into account here is the variability of the meteorite mass entrainment parameter under the action of heat fluxes (radiation and convective) along the flight path. The process of fragmentation of meteoroids in this paper is considered within the framework of a progressive crushing model based on the statistical theory of strength, taking into account the influence of the scale factor on the ultimate strength of objects. The phenomena and effects arising at various kinematic and physical parameters of each of these bodies are revealed. In particular, the change in the ballistics of their flight in the denser layers of the atmosphere, consisting in the transition from the fall mode to the ascent mode. At the same time, the following scenarios of the event can be realized: 1) the return of the body back to outer space at its residual velocity greater than the second cosmic one; 2) the transition of the body to the orbit of the Earth satellite at a residual velocity greater than the first cosmic one; 3) at lower values of the residual velocity of the body, its return after some time to the fall mode and falling out at a considerable distance from the intended crash site. It is the implementation of one of these three scenarios of the event that explains, for example, the absence of material traces, including craters, in the case of the Tunguska bolide in the vicinity of the forest collapse. Assumptions about the possibility of such scenarios have been made earlier by other authors, and in this paper their implementation is confirmed by the results of numerical calculations.

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

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 835–851 (Russian).

Введение

Ежегодно десятки космических тел метрового и декаметрового размера вторгаются в атмосферу Земли с очень большими гиперзвуковыми скоростями, лежащими в диапазоне от 11 до 72 км/с. Уже начальная стадия входа метеороида в верхние разреженные слои атмосферы сопровождается комбинированным воздействием на него радиационного и конвективного тепловых потоков, приводящих к сильному, до десятков тысяч градусов, нагреву газа у его поверхности, который начинает светиться (эффект болида), и абляцией материала метеороида. При движении в нижних плотных слоях атмосферы происходит резкое торможение тела из-за существенного увеличения скоростного напора. Возникновение значительных перегрузок под действием высоких механических и термических напряжений, а также абляция приводят чаще всего к полному или частичному разрушению метеороида в зависимости от его размера, прочности и скорости.

Исследование движения и разрушения каждого метеороида является сугубо самостоятельной задачей, поскольку невозможно построить строгую теорию движения и разрушения тел произвольной формы и структуры наподобие аэромеханики летательных аппаратов различного назначения определенной конфигурации. Поэтому целесообразно в этой ситуации использовать достаточно простую, но тем не менее многофункциональную математическую модель — теорию метеорной физики, расширяя ее для каждого индивидуального объекта путем учета дополнительных определяющих факторов.

Цель данной работы — исследование как общих закономерностей при падении и взаимодействии с атмосферой космических тел разного масштаба, так и выявление ранее не изученных особенностей для каждого из этих тел, проявляющихся из-за различия их кинематических параметров и физических свойств материала. Здесь анализируются движение и разрушение в атмосфере трех конкретных метеорных тел: Тунгусского (1908 г.), Витимского (2002 г.) и Челябинского (2013 г.) [Vasilyev, 1998; Черногор, 2011; Emel'yanenko et al., 2013]. Разнообразие уникальных событий, связанных с полетом этих метеороидов, указывает на важность комплексного изучения проблемы кометно-астероидной опасности для каждого из них, эффективного мониторинга околоземного пространства с целью раннего обнаружения таких небесных тел из метрового и декаметрового диапазона.

1. Динамика метеороида до фрагментации

Рассматривается модель, описывающая падение метеороида в атмосфере Земли. Одним из важных аспектов в этой модели является нахождение закона движения центра массы метеорита; другим — определение параметров обтекания тела с учетом эффектов абляции, теплопередачи, излучения, механического разрушения. Изменения скорости метеорита V , массы M , угла наклона вектора скорости к горизонту θ описываются уравнениями физической теории метеоров [Левин, 1956]:

$$M \frac{dV}{dt} = Mg \sin \theta - C_D S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

$$MV \frac{d\theta}{dt} = Mg \cos \theta - \frac{MV^2 \cos \theta}{R_E + z} - C_N S \frac{\rho V^2}{2}, \quad (2)$$

$$H_{eff} \frac{dM}{dt} = -C_H S \frac{\rho V^3}{2}, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = -V \sin \theta. \quad (4)$$

Здесь C_D , C_N , C_H — коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы, теплопередачи к поверхности тела соответственно, S — площадь поперечного сечения тела, R_E — радиус Земли, H_{eff} — эффективная энтальпия испарения материала метеорита, z — высота положения метеорного тела над поверхностью Земли. Изменение плотности воздуха ρ с высотой z задается формулой

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{h}\right), \quad (5)$$

где ρ_0 — плотность атмосферы при $z = 0$, h — характерная шкала высоты.

Площадь Миделя S в общем случае величина переменная, так как масса метеорного тела меняется с высотой:

$$\frac{S_e}{S} = \left(\frac{M_e}{M}\right)^\mu. \quad (6)$$

Индекс e соответствует параметрам входа тела в атмосферу. Величина параметра μ характеризует влияние изменения формы тела из-за уноса его массы. При $\mu = \frac{2}{3}$ 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 — ориентированного движения без вращения — максимальный нагрев и, следовательно, унос массы приходится на окрестность критической точки тела. Этот случай эквивалентен допущению о постоянстве миделевого сечения, то есть $S = \text{const}$, а $\mu = 0$.

Одной из важных характеристик в метеорной физике является потеря кинетической энергии тела на единицу длины в зависимости от высоты полета. Так как метеороиды в большинстве случаев разрушаются и тормозятся в атмосфере Земли, то они передают свою кинетическую энергию окружающему газу. Реальный процесс передачи воздуху кинетической энергии движущегося с гиперзвуковой скоростью в атмосфере тела принято называть в метеоритике метеорным взрывом [Григорян, 1976; Шувалов и др., 2016]. На самом деле, конечно, никакого взрыва не происходит. Ввиду кратковременности передачи энергии метеороида окружающему воздуху возникающие газодинамические явления будут подобны тем, что происходили бы при таком же выделении энергии на соответствующем участке траектории заряда ВВ. Ударная волна на больших расстояниях от места значительного торможения тела похожа на ударную волну от взрыва. Поэтому этот механизм энерговыделения — торможения самого метеороида, его паров и фрагментов — называют метеорным взрывом.

С учетом (1) и (3) можно определить энергию, выделяющуюся в атмосфере на единицу длины, приняв ее равной потере кинетической энергии тела E :

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{d(MV^2)}{2dt} = MV \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt} = -S\rho V^3 \left(C_D + C_H \frac{V^2}{2H_{eff}} \right), \\ \frac{dE}{dz} \frac{dz}{dt} &= -S\rho V^3 \left(C_D + C_H \frac{V^2}{2H_{eff}} \right), \\ \frac{dE}{dz} &= \frac{S\rho V^2}{\sin \theta} \left(C_D + C_H \frac{V^2}{2H_{eff}} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Два слагаемых в скобках в полученном выражении (7) отвечают за выделение кинетической энергии за счет торможения и уноса массы.

Колоссальная скорость метеорных тел приводит к возникновению около них давлений и температур порядка десятков тысяч атмосфер и десятков тысяч градусов. В этих условиях имеют место два механизма передачи тепла от газа к поверхности тела: конвективная теплопередача и перенос тепла излучением.

Основным видом теплообмена при гиперзвуковом движении метеорного тела является радиационный теплообмен. В настоящее время имеется ряд численных решений задачи обтекания в рамках радиационной газовой динамики. В прикладных задачах, как правило, применяются эмпирические формулы для оценки радиационного потока к поверхности тела. Для коэффициента лучистой теплопередачи в критической точке применяется формула, параметры которой представлены в [ReVelle, 1976]:

$$C_H = f \cdot e^{A_1} \rho^{A_2+A_3V-1} R^{A_4+A_5V+A_6V^2} V^{A_7+A_8V+A_9V^2-3}. \quad (8)$$

2. Моделирование дробления метеороида

Статистика падений метеороидов показывает, что большая их часть, в том числе и рассматриваемые здесь тела, падала на Землю раздробленными кусками, поэтому расчет уноса массы требует учета их дробления.

Процесс фрагментации метеороида в настоящей работе рассматривался в рамках модели последовательного дробления с учетом влияния масштабного фактора на предел прочности объекта. Использовалась модель последовательного дробления тела на основе статистической теории прочности [Weibull, 1939], когда фрагментация происходила по дефектам и трещинам, которые присущи таким структурно неоднородным телам, как метеороиды. В результате дробление реализовалось как процесс последовательного устранения дефектов при возрастании нагрузки путем разрушения тела по этим дефектам; таким образом, образовавшиеся фрагменты обладали большей прочностью, чем исходное тело. В связи с этим процесс фрагментации завершался, когда скоростной напор начинал убывать. Подробно такая модель фрагментации представлена в работах [Тирский, Ханукаева, 2008; Сызранова, Андрущенко, 2016]. Задача по движению дробящегося метеорного тела решалась в три этапа. На первом этапе рассматривалось движение единого тела от высоты входа в атмосферу до высоты начала дробления, на втором — движение роя фрагментов от высоты начала дробления до высоты максимального скоростного напора. На третьем этапе, поскольку считалось, что фрагменты имели одинаковый размер, отслеживалось движение только одного фрагмента.

Согласно рассматриваемой модели прочность фрагмента запишется в виде

$$\sigma_f = \sigma_e \left(\frac{M_e}{M_f} \right)^\alpha, \quad (9)$$

где σ_e , M_e — предел прочности и масса метеороида при входе в атмосферу, σ_f , M_f — те же характеристики для фрагмента, α — показатель степени неоднородности материала (для больших α неоднородность выше). Следует отметить, что при $\alpha \rightarrow 0$ метеороид разрушается на мельчайшие фрагменты, которые двигаются в гидродинамическом режиме, как большая масса раздробленного тела, что описывается, например, моделью из работы [Григорян, 1979]. При больших значениях α фрагментации не произойдет, и тело будет двигаться как единое целое. Значение параметра α для каменных метеороидов, как правило, находится в пределах 0,1–0,5 [Svetsov et al., 1995].

Условие начала разрушения болида в атмосфере таково:

$$\rho_* V_*^2 = \sigma^*, \quad (10)$$

где σ^* — одна из прочностных характеристик материала метеороида (прочность на сжатие, растяжение, сдвиг). Параметры со звездочкой относятся к моменту начала дробления.

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

$$z_* = h \ln \left(\frac{\rho V_e^2}{\sigma^*} \right). \quad (11)$$

Начиная с этой высоты, вместо единого тела падал уже рой дробящихся осколков со всё увеличивающимся их количеством N . При предположении, что образовавшиеся фрагменты — сферы с одинаковой массой M_f ($M_f = \frac{M}{N}$), из (9)–(11) получались их количество (в зависимости от текущих величин скоростного напора и суммарной массы всех фрагментов) и площадь миделя (определяемая в предположении, что осколки не перекрывались):

$$N = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/\alpha} = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\sigma^*} \right)^{1/\alpha},$$

$$S = S_* \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/3\alpha}. \quad (12)$$

То есть, согласно этой модели, начиная с высоты z_* будет двигаться рой раздробленных осколков, окруженный общей ударной волной, с прогрессивно увеличивающимся числом фрагментов. Поэтому если исследовать баллистику роя осколков, то можно использовать уравнения движения как бы для единого тела, но с переменной площадью миделя, определяемой по формуле (12).

Таким образом, для исследования движения дробящихся метеороидов численно определялось решение системы (1)–(5) с учетом изменения эффективной площади миделя по формуле (12) для различных параметров неоднородности материала α на этапе, с учетом переменного параметра теплопередачи C_H .

В данной работе рассматривалась идеальная модель для процесса дробления метеороида: во-первых, считалось, что образующиеся фрагменты имели одинаковую массу и форму (в более корректной постановке необходимо задаваться законом распределения получившихся фрагментов по массам); во-вторых, не учитывалось взаимодействие образовавшихся фрагментов между собой на заключительном этапе полета. Понятно, что возможно множество сценариев в зависимости от количества разлетающихся фрагментов, их форм, размеров и масс, а также от их относительного положения в потоке. Для расчета обтекания конгломерата осколков метеороида в работе [Андрущенко и др., 2018] разработан метод моделирования с помощью системы сеток, который позволяет проводить расчеты совместного обтекания группы тел (осколков метеорита) при проявлении эффекта интерференции и рассматривать фрагменты различных размеров и масс, а также допускает достаточно произвольное их относительное положение в потоке.

3. Результаты расчетов

3.1. Тунгусский феномен

Несмотря на более чем столетний срок Тунгусского события 1908 г., природа этого явления до сих пор окончательно не установлена. На протяжении многих десятилетий это событие является предметом исследований, в результате которых было высказано много гипотез, однако до сих пор нет общепризнанного объяснения этому явлению. В окрестности лесоповала не было найдено ни малейших фрагментов этого небесного тела, ни кратера, образующегося при его падении, то есть никаких материальных подтверждений приповерхностного взрыва или импакта крупного объекта.

Некоторые исследователи, как, например, авторы [Whipple, 1930], считают, что этот феномен проявился из-за взаимодействия ядра кометы с атмосферой Земли.

В работе [Коробейников, 1996] излагаются две рабочие гипотезы:

- 1) в атмосферу влетел фрагмент ядра кометы, окруженный пылегазовой атмосферой (комой);
- 2) вторгся большой рыхлый метеороид типа углистого хондрита.

Обе эти гипотезы, по мнению автора, объясняют взрывной распад тела над поверхностью Земли при отсутствии выпадения значительных масс вещества.

Численное моделирование последствий «взрыва» ледяного космического тела (считается, что параметры тела соответствуют Тунгусскому телу) проводится в работах [Руденко, Утюжников, 1999, 2002], в которых с помощью единого трехмерного численного расчета проведено моделирование всех процессов, начиная с момента взрыва до проникновения продуктов распада тела в нижние слои атмосферы и их взаимодействия с поверхностью Земли. С помощью проведенных расчетов [Руденко, Утюжников, 1999] получены области критических значений динамического давления в воздушном потоке за ударной волной, которые могут привести к вывалу леса на земной поверхности. Полученные результаты по распределению давления на земной поверхности неплохо согласуются с данными наблюдений в предполагаемом месте падения Тунгусского тела.

В работе [Chyba et al., 1993] делается вывод, что Тунгусское явление могло быть вызвано входом в атмосферу каменного астероида. Такая же гипотеза излагается в работе [Светцов, 1996], в которой считается, что крупное каменное тело раздробилось на огромное количество мелких осколков, которые испарились в полете.

Некоторые исследователи придерживаются мнения, что Тунгусское небесное тело было не кометой, а крупным болидом, который войдя, в атмосферу Земли под малым углом к земной поверхности, не упал на нее, а улетел обратно в космос [Мурзинов, 2015; Khrennikov et al., 2020].

В настоящей работе рассматривались варианты падения Тунгусского тела, состоявшего из различных веществ, соответствовавших кометному, каменному и железному его составу. Сначала полагалось, что тело имело сферическую форму, его начальная масса составляла $M_e = 1 \cdot 10^6$ т, а угол и скорость входа в атмосферу были равны $\theta = 30^\circ$ и $V_e = 30$ км/с. В таблице 1 приведены плотность ρ_b , эффективная энтальпия разрушения H_{eff} и прочностная характеристика σ^* для трех типов веществ.

Таблица 1

Состав вещества тела	ρ_b , кг/м ³	H_{eff} , Дж/кг	σ^* , Н/м ²
кометное	1000	$2,5 \cdot 10^6$	10^5
каменный хондрит	3300	$8,0 \cdot 10^6$	10^7
железное	7800	$8,0 \cdot 10^6$	10^8

На рис. 1, а представлены расчетные значения уноса массы Тунгусского тела в зависимости от высоты полета для трех типов этого тела, состоявшего из кометного, каменного и железного веществ. Эти расчеты были выполнены в рамках модели единого тела (без учета фрагментации). Из рис. 1, а видно, что кометное тело полностью сгорело в атмосфере, тогда как от каменного осталась примерно четверть от первоначальной массы, а от железного — половина. Этот факт объясняется относительно низкой энтальпией разрушения вещества у кометного тела, а также разницей в плотности рассматриваемых тел (первоначальная масса у всех тел одинакова, а размеры и, следовательно, радиационные потоки были разные).

На рис. 1, б продемонстрирован унос массы в зависимости от высоты полета для трех типов вещества дробящихся метеороидов. Видно, что значения уноса массы для этой модели

имели большие значения по сравнению с соответствующими данными рис. 1, а за счет увеличения испаряющейся поверхности в потоке. При учете процесса фрагментации показатель степени неоднородности материала принимался равным 0,25. Расчеты показали разные значения высот начала и завершения фрагментации и числа образовавшихся фрагментов для рассмотренных типов метеороидов. Так, кометное тело начало разрушаться на высоте $z = 67$ км, процесс фрагментации завершился на высоте ~ 35 км с образованием $\sim 1,5 \cdot 10^7$ мелких фрагментов, которые могут почти мгновенно испариться в атмосфере. Каменное тело начало разрушаться на высоте 35 км, фрагментация закончилась на высоте 12 км, максимальное число фрагментов составило $4,2 \cdot 10^4$, а конечная масса выпавших фрагментов по расчетам получилась равной одной десятой от первоначальной массы астероида. Железное тело начало фрагментироваться на низких высотах, ~ 19 км, и этот процесс продолжался почти до самой поверхности Земли (до 2 км). Количество образовавшихся фрагментов составило около 2000, а конечная выпавшая масса составила одну треть от первоначальной массы метеороида.

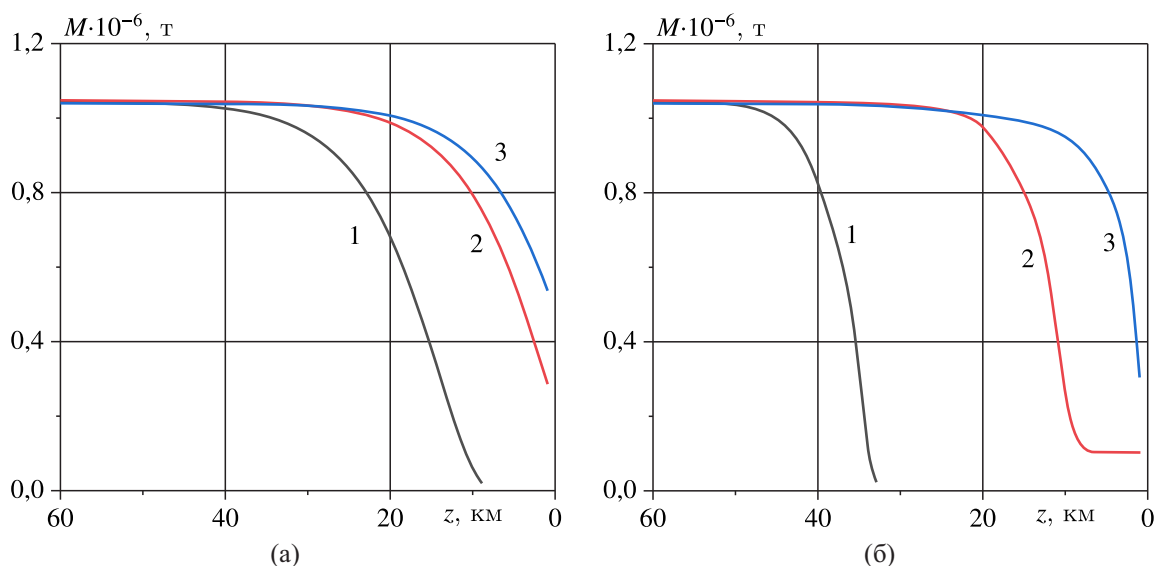


Рис. 1. Изменение массы Тунгусского тела без учета его фрагментации (а) и с учетом фрагментации (б) в зависимости от высоты полета для трех типов метеорного вещества: 1 — кометного, 2 — каменного, 3 — железного состава

Полученные результаты показали, что под действием тепловых и силовых нагрузок для рассмотренных исходных данных и использованных моделей расчета кометное тело потеряло полностью свою массу к высоте 30 км, масса выпавших обломков каменного метеороида составила $1 \cdot 10^5$ т, железного — $\sim 3 \cdot 10^5$ т. В последних двух случаях это привело бы к катастрофическим последствиям, а также к появлению кратеров и выпадению множества фрагментов — метеоритов — на земную поверхность.

На рис. 2 представлены значения потери кинетической энергии на единицу длины для Тунгусского фрагментирующего тела, состоящего из разных веществ. Видно, что максимум потери кинетической энергии, то есть так называемый взрыв по определению [Григорян, 1976], для кометного тела приходится на высоту 35 км, для каменного — 12 км, для железного — 2 км. В литературных источниках по Тунгусскому метеороиду, например в работе [Korobeinikov et al., 1998], было получено, что его взрыв произошел на высоте 7–10 км. В этой работе решалась обратная задача по подбору параметров небесного тела, дающих удовлетворительное совпадение вычисленного размера области вывала леса при взрыве с реальной площадью вывала.

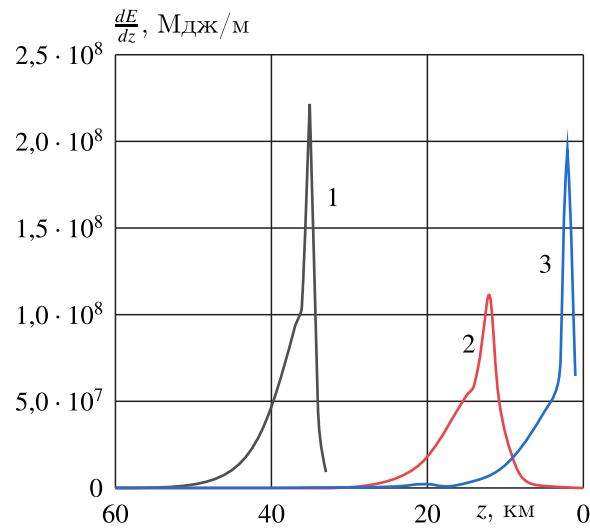


Рис. 2. Потеря кинетической энергии на единицу длины в зависимости от высоты полета Тунгусского фрагментирующего тела для трех типов метеорного вещества: 1 — кометного, 2 — каменного, 3 — железного состава

Как показали численные исследования, траектория полета метеорного тела сильно зависит от угла вектора скорости к горизонту θ . При достаточно малых углах входа в атмосферу метеороид вообще мог не упасть на Землю, а пронзить атмосферу и выйти из нее в межпланетное пространство (кривая 1 на рис. 3).

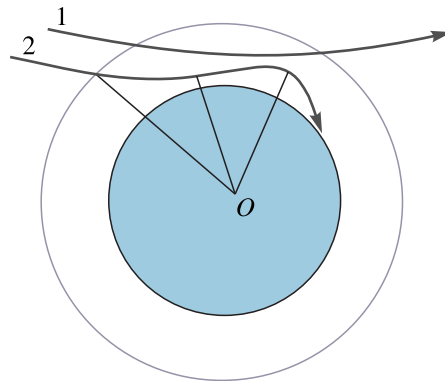


Рис. 3. Нестандартные траектории полета небесных тел: 1 — сквозная траектория, 2 — траектория с чередованием нисходящего и восходящего режимов движения

На рис. 4 представлены результаты расчетов высоты полета для каменного метеороида в зависимости от времени при угле входа тела в атмосферу $\theta_e = 8^\circ$. Результаты получены для разных значений показателя неоднородности материала дробящегося метеороида α (кривые 2–4) и для случая нефрагментирующего метеороида. Из графиков на рис. 4 видно, что для рассматриваемых вариантов падения метеороида на Землю не происходит, т. е. все траектории получаются сквозными. При $\alpha = 0,5$ максимальное значение образующихся фрагментов равно 11, при $\alpha = 0,25$ — 47, при $\alpha = 0,125$ — 240. Естественно, чем больше фрагментов образуется при дроблении метеороида, тем меньше размер образующихся обломков и тем с меньшей скоростью эти фрагменты движутся по восходящей траектории.

Был проведен также расчет баллистики железного тела массой $M = 10^6$ т, вошедшего в атмосферу ($z_e = 100$ км) со скоростью $V_e = 30$ км/с, с углом входа $\theta_e = 9^\circ$. Критическое значение

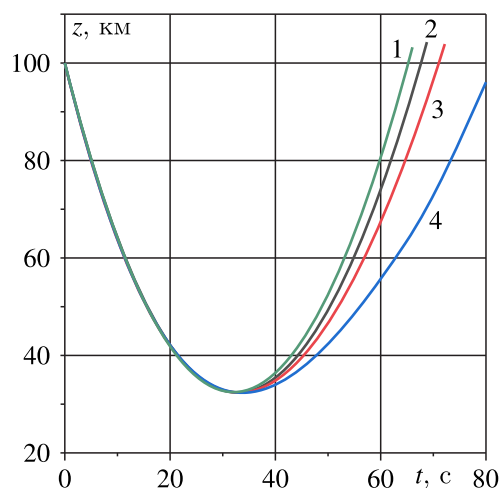


Рис. 4. Зависимость высоты полета z от времени t для угла входа в атмосферу $\theta_e = 8^\circ$ и при $\sigma^* = 10^6 \text{ Н/м}^2$: 1 — без учета фрагментации; 2–4 — с учетом фрагментации: 2 — показатель степени неоднородности материала $\alpha = 0,5$, 3 — $0,25$, 4 — $0,125$

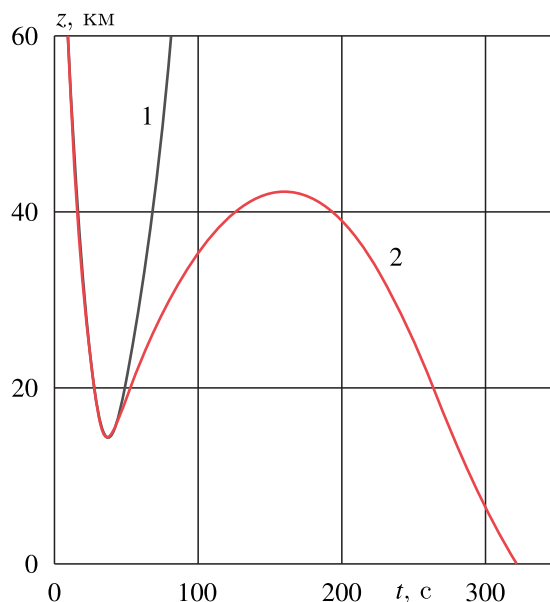


Рис. 5. Зависимость высоты полета z от времени t железного астероида для угла входа в атмосферу $\theta_e = 9^\circ$ при $\sigma^* = 10^8 \text{ Н/м}^2$: 1 — без учета фрагментации; 2 — с учетом фрагментации, показатель степени неоднородности материала $\alpha = 0,25$

прочностного параметра принималось равным $\sigma^* = 10^8 \text{ Н/м}^2$. Результаты расчета показаны на рис. 5.

Кривая 1 на рис. 5 соответствует движению тела без учета его дробления в атмосфере, но с учетом разрушения его поверхности за счет абляции. Траектория в этом случае получается сквозной, с минимумом высоты 14 км. Если учитывать дробление метеороида, то при $\sigma^* = 10^8 \text{ Н/м}^2$ процесс фрагментации начинается на высоте 18 км и заканчивается на высоте 17 км. Число образующихся осколков с учетом рассматриваемой модели фрагментации оказывается равным двум. После завершения фрагментации происходит сложное движение фрагментов с чередованием восходящего и нисходящего режимов, и в итоге фрагменты падают на землю (кривые 2 на рис. 5 и на рис. 3). Дальность полета этих обломков составляет ~ 2800 км.

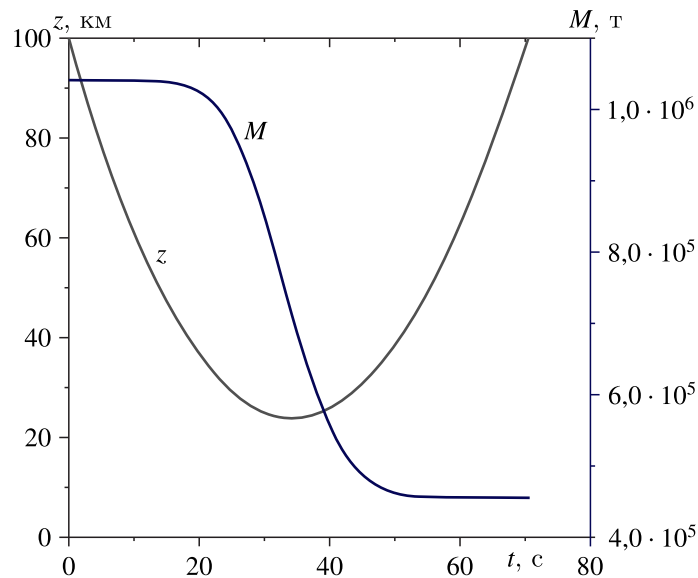


Рис. 6. Зависимость высоты полета z и массы M от времени t железного астероида для угла входа в атмосферу $\theta_e = 8,5^\circ$ и при $\sigma^* = 10^8 \text{ Н/м}^2$

В случае железного метеороида траектория будет пролетной (рис. 6) для угла входа $8,5^\circ$, причем в этом случае тело не будет фрагментировать, так как скоростной напор при движении тела не превзойдет критическое значение прочностного параметра $\sigma^* = 10^8 \text{ Н/м}^2$. На рис. 6 представлено изменение массы метеороида во время полета. В результате прохождения в атмосферных слоях у тела остается примерно 45 % от первоначальной массы.

Полученные результаты позволяли объяснить многие проявления Тунгусского феномена 1908 г. Так, если Тунгусское тело вторглось в атмосферу под малым углом наклона к горизонту ($\theta_e \leq 8,5^\circ$), то оно могло оказаться пролетным, что не исключало бы его фрагментацию со взрывами некоторых его осколков в атмосфере, приводившими к вывалу леса, а остальные достаточно крупные фрагменты могли бы выпасть далеко от эпицентра взрыва или уйти в космическое пространство, в случае если их остаточная скорость превышала бы вторую космическую скорость. Это предположение подтверждается также оценками других авторов, например, приведенными в [Мурзинов, 2015; Khrennikov et al., 2020]. Эта гипотеза позволяет объяснить ранее непонятные результаты «предполагаемого места падения», исследованного многими экспедициями: отсутствие кратера и каких-либо материальных останков метеоритного вещества на Земле.

3.2. Витимский болид

25 сентября 2002 г. в окрестности г. Бодайбо Иркутской области наблюдался яркий болид. ВВС США зафиксировали появление светящегося объекта на высоте 62 км. Его сопровождение велось до высоты 30 км, на которой он взорвался. Мощность взрыва была оценена специалистами в 200 т тринитротолуола. Ни одной из трех экспедиционных групп не удалось обнаружить следов выпадения этого тела или его осколков: кратеров или метеоритов, вдоль трассы полета были обнаружены лишь зоны сломанных и поваленных деревьев. В пробах материала снежного покрова вдоль трассы полета удалось обнаружить микрочастицы, предположительно связанные с космогенным веществом из метеоритного абляционного следа [Антипин и др., 2005].

Свое название этот метеороид получил по названию реки и ближайшего поселка — Витимский. В работе [Черногор, 2011] по величине свечения болида были оценены его кинетическая энергия, масса и диаметр. По данным, приведенным в [Черногор, 2011], его начальная масса составляла около 50 т, диаметр — 3,2 м, скорость входа в атмосферу — 20 км/с, а угол входа — 30° .

На рис. 7 представлены расчетные данные по изменению массы Витимского метеорного тела при учете и без учета фрагментации.

Следует отметить, что при фрагментации Витимского болида унос его массы сначала возрастал за счет увеличения площади испаряющейся поверхности в потоке, что приводило к увеличению торможения дробящегося тела, то есть к уменьшению скорости метеорного тела и его обломков, и, в свою очередь, уменьшало тепловой поток к поверхности и замедляло процесс абляции дробящегося тела. Естественно, на этот процесс влияли также начальные параметры входа в атмосферу и размеры метеорного тела. В результате конечная масса с учетом фрагментации превысила конечную массу без его учета.

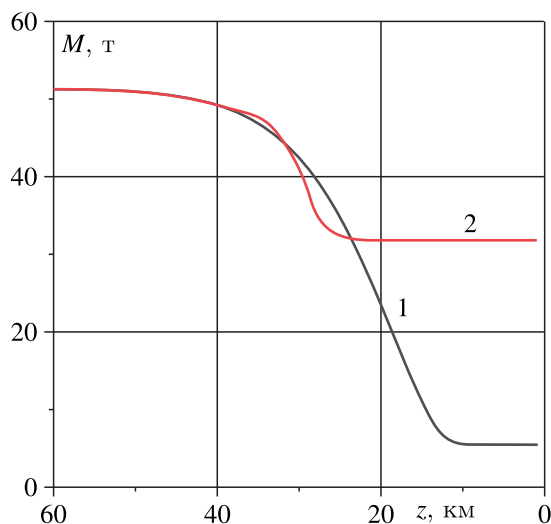


Рис. 7. Изменение массы Витимского метеорного тела без учета (1) и с учетом (2) дробления

Как показали расчеты, тело начало фрагментироваться на высоте 39 км, а с учетом модели прогрессивного дробления на высоте 30 км оно распалось на множество фрагментов порядка 10 000 радиусом ~ 7 см. На завершающем этапе движения процесс разрушения этих обломков мог продолжиться за счет температурных напряжений [Андрущенко и др., 2016]. Термические напряжения не играют большой роли для крупных метеорных тел, но если размер обломка достигнет нескольких сантиметров, то возникшие градиенты температуры могут разрушать в дальнейшем небольшие обломки до размеров крупной пыли, которая быстро расплавляется и испаряется в высокотемпературном воздухе.

На рис. 8 представлено изменение кинетической энергии в зависимости от высоты полета. Видно, что максимальное значение этой характеристики приходилось на высоту полета 30 км.

Таким образом, по всей видимости, взрыв Витимского болида на относительно большой высоте привел к образованию множества мелких фрагментов, которые испарились в воздухе.

3.3. Челябинский метеороид

В работе [Emel'yanenk et al., 2013] приводятся следующие данные наблюдений за Челябинским метеоритом: тело вошло в атмосферу Земли под углом $\sim 18^\circ$ к горизонту со скоростью $\sim 19,2$ км/с; размер метеорита был равен $\sim 19,8 \pm 4,6$ м, завершающий взрыв произошел на высоте около 23 км. Собранные фрагменты имели обыкновенную хондритовую структуру, эффективная энтальпия испарения такого материала полагалась равной $H_{eff} = 8$ кДж/г. Тело разрушалось в несколько этапов: разрушение началось на высоте 45 км, завершающий взрыв произошел на высоте около 23 км. Значение прочностного параметра, соответствовавшего высоте начала дробления, в этом случае составляло $\sigma^* = 10^6$ Н/м². Если предположить, что метеорит

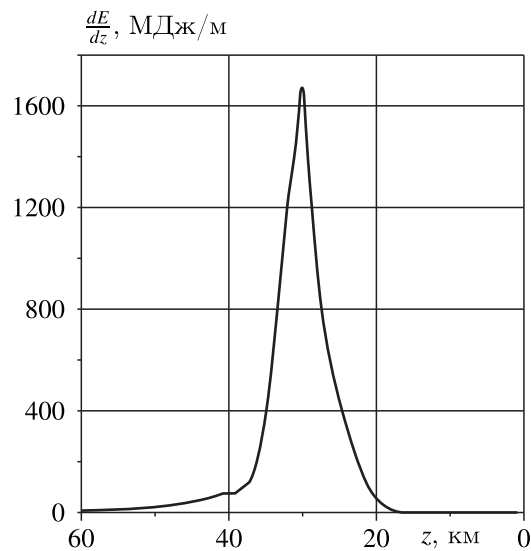


Рис. 8. Потеря кинетической энергии на единицу длины в зависимости от высоты полета Витимского метеороида

был шаром радиусом $R \sim 9,8$ м, то при учете плотности, характерной для каменного хондрита — $3,3$ г/см³, его масса составляла около 13 000 тонн. Эти данные использовались в настоящей работе при моделировании полета и разрушения Челябинского метеорита в атмосфере. Моделирование падения Челябинского метеорита подробно рассмотрено, например, в работе [Андрущенко и др., 2013].

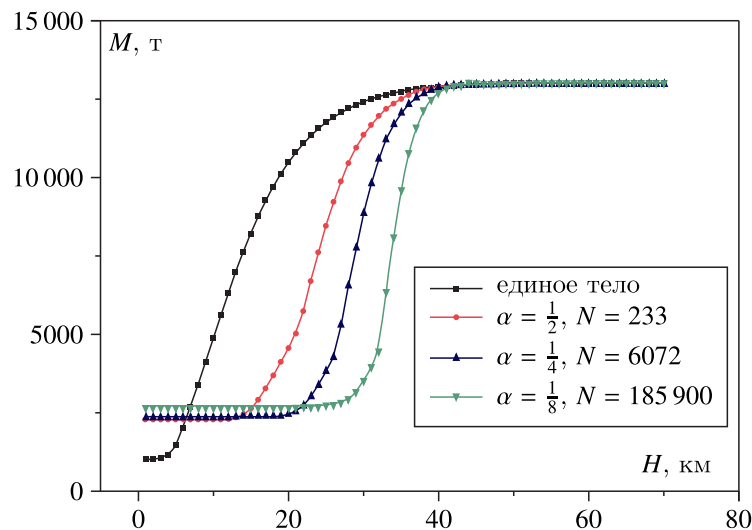


Рис. 9. Изменение общей массы Челябинского болида в зависимости от высоты полета при разных значениях параметра α

Изменения суммарной массы метеорного тела в зависимости от высоты полета в рамках модели единого тела и для дробящегося метеорита приведены на рис. 9. Данные на рис. 9 представлены для разных значений параметра α , характеризующего степень неоднородности материала. Видно, что суммарная масса фрагментов метеорита в достаточно широком диапазоне изменения параметра α у поверхности Земли составила около 2000 т, тогда как масса найденных фрагментов Челябинского метеорита не превысила 1 т. Встал вопрос о том, как можно

объяснить ничтожную массу найденных фрагментов при такой огромной первоначальной массе Челябинского небесного тела. Например, в работе [Fortov et al., 2013] это объяснялось невысокой исходной прочностью материала метеороида, в результате чего при взрыве на высоте порядка 23 км он разлетелся в основном на очень мелкие обломки, одна часть из которых, еще более измельчившись за счет абляции, задерживалась в стратосфере, другая сгорала под воздействием термических напряжений в нижних слоях тропосферы, третья в виде пылевых частиц разлеталась на очень большие расстояния от траектории падения. И только наиболее крупные фрагменты сантиметрового или (редко) метровых размеров, были собраны в ходе поисков.

Этот вопрос обсуждался также в работе [Барелко и др., 2015], в которой предлагалась своя оригинальная гипотеза для объяснения малой массы найденных осколков. Авторы этой работы считали, что причину взрыва метеорита следовало искать среди газодетонационных механизмов образования сверхзвукового фронта ударной волны, и предложили рассмотреть парогазовую детонационную концепцию взрыва болида. Если твердое космическое тело входило с огромными скоростями в плотные слои атмосферы, то на его поверхности формировался адиабатически сжатый до высоких давлений горячий пограничный слой. Объект перегревался много выше температуры кипения образовавшего его вещества, и по мере торможения болида и снижения сжимающего его давления за ультракороткий промежуток времени происходило вскипание массы тела. Переведенное в газопаровое состояние и пока еще сжатое до высоких давлений вещество взрывоподобно распалось, то есть происходил объемный паровой взрыв, который и формировал ударную волну с катастрофическими последствиями. Ударная волна рассеивала газопаровое облако вещества от взорвавшегося метеорита в атмосфере на большой площади, поэтому и не удалось собрать с поверхности Земли более или менее значительный объем его фрагментов. К сожалению, как отмечается в [Барелко и др., 2015], теоретические основы, объясняющие явление парового взрыва, еще не созданы, а его математические модели не построены. С этой целью необходимы развитие теоретических представлений о природе паровых взрывов, создание моделей процессов, протекающих в реальных условиях.

Заключение

В ходе численных экспериментов получены результаты, объясняющие основные, ранее не вполне понятные последствия движения и разрушения в атмосфере Земли трех крупных метеорных тел — Тунгусского, Витимского и Челябинского.

Во-первых, получено, что одной из реалистичных версий Тунгусского события 1908 г. может являться вход в атмосферу каменного или железного метеороида под малым углом к поверхности Земли ($\leq 8,5^\circ$ на высоте 100 км). Крупное метеорное тело, вторгнувшееся в атмосферу под малым углом, в плотных слоях могло распасться на фрагменты и в перигейной точке траектории вызвать обширный вывал леса воздействием интенсивных ударных волн. Образовавшиеся фрагменты могли частично сгореть в атмосфере, частично рассеяться вдоль траектории полета далеко от предполагаемого места падения, а наиболее крупные осколки метеороида — уйти обратно в космическое пространство, если их скорость превышала вторую космическую, либо выпасть на значительном расстоянии от предполагаемого места падения при меньшей скорости. Эта гипотеза позволяет объяснить ранее непонятные результаты «предполагаемого места падения», исследованного многими экспедициями: отсутствие кратера и каких-либо материальных останков метеоритного вещества на Земле.

Во-вторых, это высотный взрыв каменного Витимского метеороида. Его разрушение предположительно началось на высоте около 40 км, а на высоте 30 км метеороид взорвался. С учетом процесса прогрессивного дробления тело, по-видимому, распалось на мелкие обломки, которые окончательно оплавившись и испарились под воздействием термических напряжений над земной

поверхностью, что также объясняет отсутствие каких-либо материальных останков на поверхности и в то же время наличие зон повреждений лесных массивов слабыми ударными волнами высотных взрывов, что было выявлено в ходе нескольких экспедиций.

В-третьих, если придерживаться гипотезы о паровом взрыве каменного Челябинского метеороида, в ходе которого он разлетелся на мелкие осколки, распространившиеся на большие расстояния от точки взрыва, то также становится объяснимым обнаружение в окрестности его траектории на земной поверхности метеоритов с общей массой, намного меньшей расчетной.

Список литературы (References)

- Андрущенко В. А., Сызранова Н. Г., Шевелев Ю. Д. Моделирование падения Челябинского метеорита // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 6. — С. 927–940.
Andruschenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D. Modelirovaniye padeniya Chelyabinskogo meteorita [Modeling of Chelyabinsk meteorite fall] // Computer Research and Modeling. — 2013. — Vol. 5, No. 6. — P. 927–940 (in Russian).
- Андрущенко В. А., Сызранова Н. Г., Шевелев Ю. Д., Головешкин В. А. О механизмах разрушения метеорных тел и теплопередаче к их поверхности // Математическое моделирование. — 2016. — Т. 28, № 2. — С. 31–39.
Andrushchenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D., Goloveshkin V. A. Destruction mechanisms of meteoroids and heat transfer to their surfaces // Math. Models Comput. Simul. — 2016. — Vol. 8. — P. 506–512. (Original Russian paper: Andrushchenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D., Goloveshkin V. A. O mekhanizmax razrusheniya meteornykh tel i teploperedache k ikh poverkhnosti // Matematicheskoye modelirovaniye. — 2016. — Vol. 28, No. 2. — P. 31–39.)
- Андрущенко В. А., Максимов Ф. А., Сызранова Н. Г. Моделирование полета и разрушения болида Бенешов // Компьютерные исследования и моделирование. — 2018. — Т. 10, № 5. — С. 605–618.
Andrushchenko V. A., Maksimov F. A., Syzranova N. G. Modelirovaniye poleta i razrusheniya bolida Beneshov [Simulation of flight and destruction of the Benešov bolid] // Computer Research and Modeling. — 2018. — Vol. 10, No. 5. — P. 605–618 (in Russian).
- Антипин В. С., Язев С. А., Перепелов А. Б. и др. Витимский метеорит (25 сентября 2002 года) — результаты комплексных исследований // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46, № 10. — С. 1050–1064.
Antipin V. S., Yazev S. A., Perepelov A. B. et al. Vitimskiy meteorit (25 sentyabrya 2002 goda) — rezul'taty kompleksnykh issledovaniy [The 25 September 2002 Vitim meteorite: results of complex research] // Geologiya i Geofizika. — 2005. — Vol. 46, No. 10. — P. 1050–1064 (in Russian).
- Барелко В. В., Кузнецов М. В., Быков Л. А. К вопросу о роли механизма «парового взрыва» в природных катастрофах. Взрывы метеоритов и извержения вулканов // Технологии гражданской безопасности. — 2015. — Т. 12, № 2 (44).
Barelko V., Kuznetsov M., Bykov L. K voprosu o roli mekhanizma «parovogo vzryva» v prirodnykh katastrofakh. Vzryvy meteoritov i izverzheniya vulkanov [To the Question about the Role of «Steam Explosion» Mechanism in the Natural Catastrophes] // Explosions Civil Security Technology. — 2015. — Vol. 12, No. 2 (44) (in Russian).
- Григорян С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита // Доклады Академии наук СССР. — 1976. — Т. 231, № 1. — С. 57–60.
Grigoryan S. S. Nature of the Tungus meteorite // Soviet Physics. Doklady. — 1976. — Vol. 21. — P. 603. (Original Russian paper: Grigoryan S. S. K voprosu o prirode Tungusskogo meteorita // Doklady Akademii nauk SSSR. — 1976. — Vol. 231, No. 1. — P. 57–60.)
- Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. — 1979. — Т. 17, № 6. — С. 875–893.
Grigorian S. S. O dvizhenii i razrushenii meteoritov v atmosferakh planet [On the movement and destruction of meteorites in the atmospheres of the planets] // Kosm. Issled. — 1979. — Vol. 17. — P. 875–893 (in Russian).
- Коробейников В. П. Принципы математического моделирования. — Владивосток: Дальнаука, 1996. — 180 с.
Korobeinikov V. P. Printsipy matematicheskogo modelirovaniya [The Principles of Mathematical modeling]. — Vladivostok: Dalnauka, 1996. — 180 p. (in Russian).
- Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. — М.: Из-во АН СССР, 1956. — 293 с.
Levin B. Yu. Fizicheskaya teoriya meteorov i meteornoye veshchestvo v Solnechnoy sisteme [Physical Theory of Meteors and Meteoric Matter in the Solar System]. — Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1956 (in Russian).

- Мурзинов И. В.* Проблема века: куда улетел Тунгусский метеорит // Космонавтика и ракетостроение. — 2015. — № 4 (83). — С. 65–72.
Murzinov I. V. Problema veka: kuda uletel Tungusskiy meteorit [The problem of the century: where the Tunguska meteorite flew] // Cosmonautics and rocket science. — 2015. — No. 4 (83). — P. 65–72 (in Russian).
- Руденко Д. В., Утюжников С. В.* Газодинамические последствия взрыва Тунгусского космического тела // Математическое моделирование. — 1999. — Т. 11, № 10. — С. 49–61.
Rudenko D. V., Utyuzhnikov S. V. Gazodinamicheskiye posledstviya vzryva Tungusskogo kosmicheskogo tela [Gas-dynamic consequences of the explosion of the Tunguska cosmic body] // Mathematical modeling. — 1999. — Vol. 11, No. 10. — P. 49–61 (in Russian).
- Руденко Д. В., Утюжников С. В.* Применение динамически адаптивных к решению сеток для моделирования пространственных нестационарных течений газа с большими градиентами // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2002. — Т. 42, № 3. — С. 395–409.
Rudenko D. V., Utyuzhnikov S. V. Use of dynamically adaptive grids for modeling three-dimensional unsteady gas flows with high gradients // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2002. — Vol. 42, No. 3. — P. 377–390. (Original Russian paper: *Rudenko D. V., Utyuzhnikov S. V.* Primeneniye dinamicheskii adaptivnykh k resheniyu setok dlya modelirovaniya prostranstvennykh nestatsionarnykh techeniy gaza s bol'shimi gradiyentami // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. — 2002. — Vol. 42, No. 3. — P. 395–409.)
- Светцов В. В.* Куда делись осколки Тунгусского метеороида? // Астрономический вестник. — 1996. — Т. 30, № 5. — С. 427–441.
Svetstov V. V. Where have the debris of the Tunguska meteoroid gone? // Solar System Research. — 1996. — Vol. 30, No. 5. — P. 378–390. (Original Russian paper: *Svetstov V. V.* Kuda delis' oskolki Tungusskogo meteoroida? // Astronomicheskii vestnik. — 1996. — Vol. 30, No. 5. — P. 427–441.)
- Сызранова Н. Г., Андрущенко В. А.* Моделирование движения и разрушения болидов в атмосфере Земли // Теплофизика высоких температур. — 2016. — Т. 54, № 3. — С. 328–335.
Syzranova N. G., Andrushchenko V. A. Simulation of the motion and destruction of bodies in the Earth's atmosphere // High Temperature. — 2016. — Vol. 54, No. 3. — P. 308–315. (Original Russian paper: *Syzranova N. G., Andrushchenko V. A.* Modelirovaniye dvizheniya i razrusheniya bolidov v atmosfere Zemli // Teplofizika vysokikh temperatur. — 2016. — Vol. 54, No. 3. — P. 328–335.)
- 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 Res. — 2008. — Vol. 46. — P. 120. (Original Russian paper: *Tirskiy G. A., Khanukaeva D. Yu.* Ballistika drobyashchegosya meteoroida s uchetom unosa massy v neizotermicheskoy atmosfere // Kosmicheskkiye issledovaniya. — 2008. — Vol. 46, No. 2. — P. 122–134.)
- Черногор Л. Ф.* Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрномия. — 2011. — Т. 51, № 1. — С. 119–132.
Chernogor L. F. Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of Vitim bolide on September 24, 2002 // Geomagnetism and Aeronomy. — 2011. — Vol. 51, No. 1. — P. 116–130. (Original Russian paper: *Chernogor L. F.* Kolebaniya geomagnitnogo polya, vyzvannyye proletom Vitimskogo bolida 24 sentyabrya 2002 g. // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2011. — Vol. 51, No. 1. — P. 119–132.)
- Шувалов В. В., Попова О. П., Светцов В. В., Трубецкая И. А., Глазычев Д. О.* Определение высоты «метеорного взрыва» // Астрономический вестник. — 2016. — Т. 50, № 1. — С. 3–14.
Shuvalov V. V., Popova O. P., Svetstov V. V., Trubetskaya I. A., Glazachev D. O. Determination of the height of the «meteoric explosion» // Solar System Research. — 2016. — Vol. 50, No. 1. — P. 1–12. (Original Russian paper: *Shuvalov V. V., Popova O. P., Svetstov V. V., Trubetskaya I. A., Glazachev D. O.* Opredeleniye vysoty meteorogo vzryva // Astronomicheskii vestnik. — 2016. — Vol. 50, No. 1. — P. 3–14.)
- Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J.* The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature. — 1993. — Vol. 361, No. 6407. — P. 40–44.
- Emel'yanenko V. V., Chugai N. N., Shelyakov M. A. et al.* Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event // Solar System Research. — 2013. — Vol. 47, No. 4. — P. 240–254.
- Fortov V. E., Sultanov V. G., Shustov A. V.* Chelyabinsk superbolide explosion in the Earth's atmosphere: A common phenomenon or unique coincidence? // Geochemistry International. — 2013. — Vol. 51, No. 7. — P. 549–567.
- Khrennikov D. E., Titov A. K., Ershov A. E. et al.* On the possibility of through passage of asteroid bodies across the Earth's atmosphere // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Vol. 493, Iss. 1. — P. 1344–1351.

-
- Korobeinikov V. P., Shurshalov L. V., Vlasov V. I., Semenov I. V.* Complex modeling of the Tunguska catastrophe // *Planet Space Sci.* — 1998. — Vol. 46, No. 2/3. — P. 231–244.
- ReVelle D. O.* Dynamics and thermodynamics of large meteor entry: a quasi-simple ablation model // *Planetary Sci.* — 1976. — SR-76-1.
- Svetsov V. V., Nemtchinov E. V., Teterev A. V.* Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: theoretical models // *Icarus.* — 1995. — Vol. 116. — P. 131–153.
- Vasilyev N. V.* The Tunguska meteorite problem today // *Planet. Space Sci.* — 1998. — Vol. 46. — P. 129–150.
- Weibull W.* A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* — 1951. — Vol. 10. — P. 140–147.
- Whipple F. J. W.* The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced // *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society.* — 1930. — Vol. 56 (236). — P. 287–301.