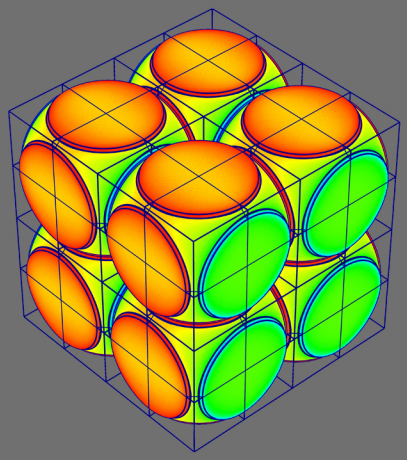
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г. Моделирование Тунгусского явления 1908 года в рамках двух возможных гипотез. Математическое моделирование и численные методы, 2023, № 3, с. 42–61.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/315/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.140
11.11.2026 10:05:00

УДК 523.6+533.6 DOI: 10.18698/2309-3684-2023-3-4261

Моделирование Тунгусского явления 1908 года в рамках двух возможных гипотез

© В.А. Андрущенко, Н.Г. Сызранова

ИАП РАН, г. Москва, 123056, Россия

В рамках актуальной проблемы кометно-астероидной опасности численно исследуются физические процессы, вызывающие разрушение и фрагментацию метеорных тел в атмосфере Земли, в данном случае Тунгусского болида. Число всевозможных версий и гипотез, связанных с Тунгусским явлением, чрезвычайно велико и продолжает возрастать, поэтому необходим анализ и обобщений всех известных фактов, присущих этому нестандартному катастрофическому событию, и только после этого приступить к выдвижению тех или иных гипотез, его объясняющих. На основе разработанной физико-математической модели, определяющей движение космических объектов естественного происхождения в атмосфере и их взаимодействия с ней, нами предложены две гипотезы, объясняющие процессы, происходящие при падении Тунгусского тела в 1908г. Первая гипотеза связана с дроблением тела, представляющего собой каменный метеороид, на большое количество фрагментов, которые разрушились в плотных слоях атмосферы под действием термических напряжений до размера мелкой пыли. Трудности выявления мелких частиц, выпавших именно в результате Тунгусского события, объясняются в основном следующим обстоятельством - сроки начала первичных поисков следов падения тела были отдалены от момента события на целых двадцать лет, в течение которых на этой территории могло произойти весьма значительное количество других геофизических процессов. Вторая гипотеза связана с явлениями, возникающими при малых углах входа тела в атмосферу Земли. В этом случае происходит изменение баллистики его полета в атмосфере, заключающееся в переходе от режима падения к режиму подъема. Этот эффект приводит к реализации следующих возможных сценариев события: возврат тела обратно в космическое пространство при его остаточной скорости большей второй космической; переход тела на орбиту спутника Земли при остаточной скорости большей первой космической; при меньших значениях остаточной скорости тела возвращение его через некоторое время к режиму падения и достижение им земной поверхности на значительном расстоянии от предполагаемого места падения. Предложенные гипотезы объясняют, например, отсутствие материальных следов, в том числе и кратеров в ходе поисков останков Тунгусского болида в окрестности вывала леса.

Ключевые слова: *Тунгусский метеороид, математическая модель, тепловые потоки, термические напряжения, фрагментация, прочность, сквозные траектории*

Введение. Существует много гипотез, пытающихся объяснить Тунгусское событие 1908г. Самыми надежно установленными последствиями падения Тунгусского тела являются вывал леса на территории более 2000 км^2, термические повреждения растительности, в первую очередь деревьев (общая площади ожога превысила 200 км^2), а также отсутствие кратера и метеоритных обломков в предполагаемом месте

падения. Тунгусский феномен поставил, наверное, рекорд по количеству гипотез и публикаций, посвященных этому космическому телу за более чем столетнюю историю обсуждения его падения.

Например, в работе [1] излагаются две рабочие гипотезы для этого события:

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

Обе эти гипотезы, по мнению автора, объясняют взрывной распад тела над поверхностью Земли в отсутствие выпадения массы вещества, которую возможно было бы выявить.

Сторонники гипотезы кометного происхождения Тунгусского тела основываются на отсутствие осколков в предполагаемом месте падения и соответствующих метеоритных кратеров.

Численное моделирование последствий «взрыва» ледяного космического тела (считается, что параметры тела соответствуют Тунгусскому телу), проводилось в работах [2,3], в которых с помощью единой трехмерной численной методики моделировались процессы, начиная с момента взрыва до проникновения продуктов распада тела в нижние слои атмосферы и их взаимодействия с поверхностью Земли. С помощью проведенных расчетов [2] были получены области критических значений динамического давления в воздушном потоке за ударной волной, которые могли привести к вывалу леса на земной поверхности. Полученные результаты по распределения давления на земной поверхности неплохо согласуются с данными наблюдений по вывалу леса.

В работе [4] было сделано предположение, что Тунгусское явление было вызвано входом в атмосферу каменного астероида. Такая же гипотеза была выдвинута в работе [5], в которой считалось, что крупное каменное тело раздробилось на огромное количество мелких осколков, которые, вероятно, испарились при полете в плотных слоях атмосферы.

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, пронзив атмосферу, улетел обратно в космос [6, 7].

В работе [7] были изучены условия прохождения астероидами диаметром 200, 100 и 50 м, состоявшими из трех типов материалов – железа, камня и водяного льда, атмосферы Земли с минимальной высотой траектории, лежавшей в диапазоне 10-15км. Найдены условия такого прохождения с последующим выходом в космическое простран-

ство при сохранении значительной доли начальной массы. В этой работе утверждалось, что Тунгусское событие было вызвано железным астероидом, который прошел через атмосферу Земли и продолжил движение по околосолнечной орбите. С помощью расчетов установлено, что, если железное тело входило в атмосферу на высоте 160 км с углами входа $\leq 11.5^{o}$, то было возможно его движение по такой сквозной траектории.

В настоящей работе на основе решения уравнений торможения, уноса массы и модели последовательного дробления тела рассматривались две гипотезы движения Тунгусского болида:

1) произошло дробление каменного Тунгусского метеороида в атмосфере на большое количество фрагментов, разрушившихся затем под действием термических напряжений до размера мелкой пыли, которая в виде облака частиц с единой ударной волной привела к наблюдаемому вывалу леса;

2) в атмосферу Земли вторглось Тунгусское тело (каменное или железное) под малым углом к земной поверхности, в результате чего оно не упало в предполагаемом месте, а улетело обратно в космос или далеко от предполагаемого места падения, тем не менее, нанеся вызванной им баллистической ударной волной, наблюдаемый вывал леса.

Постановка задачи. Основные уравнения. За исходные принимаются уравнения физической теории метеоров [8]:

$$
\begin{aligned}
M\frac{dV}{dt} &= Mg\sin\theta - C_D S_{mid}\frac{\rho V^2}{2} \\
V\frac{d\theta}{dt} &= g\cos\theta - \frac{V^2\cos\theta}{R_E + z} \\
H_{eff}\frac{dM}{dt} &= -C_H S_{mid}\frac{\rho V^3}{2} \\
\frac{dz}{dt} &= -V\sin\theta \\
\rho &= \rho_0 \exp(-z/h)
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где V, M, θ — скорость тела, его масса и угол наклона траектории падения к горизонту; R_E — 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; z — высота его положения над поверхностью Земли; ρ_0 — плотность атмосферы при $z = 0$; h — характерная шкала высоты.

Площадь Миделя S_{mid} в общем случае величина переменная, так как масса метеорного тела меняется с высотой:

$$\frac{S_{mide}}{S_{mid}} = \left(\frac{M_e}{M} \right)^{\mu}. \qquad (2)$$

Индекс «*e*» соответствует параметрам входа тела в атмосферу. Величина параметра μ характеризует влияние изменения формы тела из-за уноса его 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 – 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 $S_{mid} = const$, а $\mu = 0$.

Если предположить, что метеороид имеет форму, близкую к шарообразной, то $C_D \approx 1$.

В высокотемпературном газовом потоке имеет место два механизма передачи тепла от газа к поверхности тела: конвективная теплопередача и перенос тепла излучением.

Для конвективного теплового потока в критической точке сферической поверхности метеорита используется формула [9]:

$$q_{k0} \approx 3.3 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\rho_\infty}{R} \right)^{1/2} V_\infty^{3.2}, \text{ Вт/м}^2. \qquad (3)$$

Здесь R — в *м*, ρ_∞ — в *кг/м*^{3}, V_∞ — в *м/с*. Индекс «∞» соответствует параметрам набегающего потока.

Для коэффициента лучистой теплопередачи в критической точке используется формула ReVelle, параметры которой представлены в [10]:

$$C_{Hr} = f \cdot e^{A_1} \rho^{A_2 + A_3 V^{-1}} R^{A_4 + A_5 V + A_6 V^2} V^{A_7 + A_8 V + A_9 V^2 - 3}. \qquad (4)$$

Соответственно тепловой поток в критической точке запишется как $q_{r0} = 0.5 \rho_\infty V_\infty^3 C_{Hr}$.

Распределение теплового потока вдоль сферической поверхности для конвективного теплового потока аппроксимируется формулой [11]:

$$q_k = q_{k0} \left(0.55 + 0.45 \cos 2\beta \right), \qquad (5)$$

где β — угол меридионального сечения, отсчитываемого от направления на критическую точку; а для радиационного потока [12] —

$$q_r = q_{r0}\cos^n\beta,\ n = 1/\left(0.051V - 0.43\right) + 1.811. \qquad (6)$$

Суммарный тепловой поток к поверхности тела определяется как

$$q = q_k + q_r. \qquad (7)$$

Зная распределения лучистого и конвективного тепловых потоков по образующей сферического тела, можно вычислить соответствующий коэффициент теплоотдачи.

В рамках модели единого тела (не дробящегося метеороида) его баллистика определяется из численного решения системы уравнений (1) с учетом формул (2) - (7). Статистика падений метеороидов показывает, что большая часть их падало на Землю в виде осколков, поэтому расчет уноса массы требует также учета этого дробления.

Процесс фрагментации метеороида в настоящей работе рассматривается в рамках модели последовательного дробления с учетом влияния масштабного фактора на предел прочности объекта. Используется модель последовательного дробления тела на основе статистической теории прочности [13], когда фрагментация происходит по дефектам и трещинам, которые присущи таким структурно неоднородным телам как метеороиды. В результате дробление реализуется как процесс последовательного устранения дефектов при возрастании нагрузки путем разрушения тела по этим дефектам, таким образом образующиеся фрагменты обладают большей прочностью, чем исходное тело. В связи с этим процесс фрагментации завершается, когда скоростной напор начинает убывать. Подробно такая модель фрагментации представлена в работах [14, 15].

Задача по движению дробящегося метеорного тела решается следующим образом. Метеороид проникает в атмосферу как единое тело до тех пор, пока скоростной напор не сравняется с величиной предела прочности его материала на разрушение, т.е. условие начала разрушения болида в атмосфере таково:

$$\rho_* V_*^2 = \sigma^* \qquad (8)$$

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

Согласно рассматриваемой модели, прочность образующегося фрагмента запишется в виде:

$$\sigma^*{}_f = \sigma_0\left(M_0/M_f\right)^\alpha, \qquad (9)$$

где σ_0, M_0 — предел прочности и масса метеороида до входа в атмосферу, σ_f^*, M_f — те же характеристики для фрагмента. Показатель степени α, называемый масштабным фактором, характеризует степень неоднородности разрушающегося материала. Чем неоднороднее материал, тем больше его значение.

Высота начала дробления z_* в экспоненциальной атмосфере определяется при предположении, что к этому моменту тело не успело затормозиться, и его скорость равна и начальной скорости входа в атмосферу V_0:

$$z_* = h \ln\left(\rho_0 V_0^2 / \sigma^*\right). \tag{10}$$

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 (8)-(10) получается их количество в зависимости от текущих величин скоростного напора, суммарной массы всех фрагментов и площади миделя (определяемой в предположении, что осколки не перекрываются):

$$N = \frac{M}{M_*}\left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2}\right)^{1/\alpha} = \frac{M}{M_*}\left(\frac{\rho V^2}{\sigma^*}\right)^{1/\alpha},$$
$$S_{mid} = S_{mid*}\frac{M}{M_*}\left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2}\right)^{1/3\alpha}. \tag{11}$$

То есть, согласно этой модели, начиная с высоты z_* будет двигаться рой раздробленных осколков, окруженный общей ударной волной, с прогрессивно увеличивающимся числом фрагментов. Лавинное разрушение метеороида будет продолжаться до тех пор, пока число фрагментов, определяемое формулой (11), не достигнет своего максимального значения.

Прочность каменных хондритов меняется в широких пределах: 10^5-10^7 Н/м^2, от этой величины, степени неоднородности материала и параметров входа тела в атмосферу зависит количество образовавшихся фрагментов.

Численный алгоритм решения задачи. При рассмотрении движения метеороида в рамках модели единого тела система уравнений (1) численно интегрируется с учетом задаваемых на высоте 100 км начальных данных: размера, предполагаемой формы и массы тела; эффективной энтальпии разрушения материала тела и его баллистических параметров — скорости V_e и угла входа θ_e. При интегрировании

уравнений учитывается изменение массы и размеров тела под действием конвективных и радиационных тепловых потоков в зависимости от времени полета и текущих параметров обтекания.

Задача по движению дробящегося метеороида в атмосфере решается в три этапа. На первом этапе рассматривается движение единого тела от высоты входа в атмосферу до высоты начала дробления, на втором — движение роя фрагментов с учетом рассмотренной модели фрагментации от высоты начала дробления до высоты максимального скоростного напора. На третьем этапе, поскольку считается, что образующиеся фрагменты одинакового размера, отслеживается движение одного фрагмента. На каждом этапе движения тела учитывается процесс уноса массы под действием тепловых потоков, а также изменение размера тела в зависимости от времени полета.

Следует отметить, в данной работе рассматривается приближенная модель для процесса дробления метеороида: во-первых, считается, что образующиеся фрагменты имеют одинаковую массу и форму (в более корректной постановке необходимо задаваться законом распределения получившихся фрагментов по массам); во-вторых, не учитывается взаимодействие образовавшихся фрагментов между собой на заключительном этапе полета. Однако эта модель позволяет качественно спрогнозировать процесс разрушения тела под действием силовых нагрузок. Процесс дробления тела на равные фрагменты, наверное, здесь следует считать среднестатистическим.

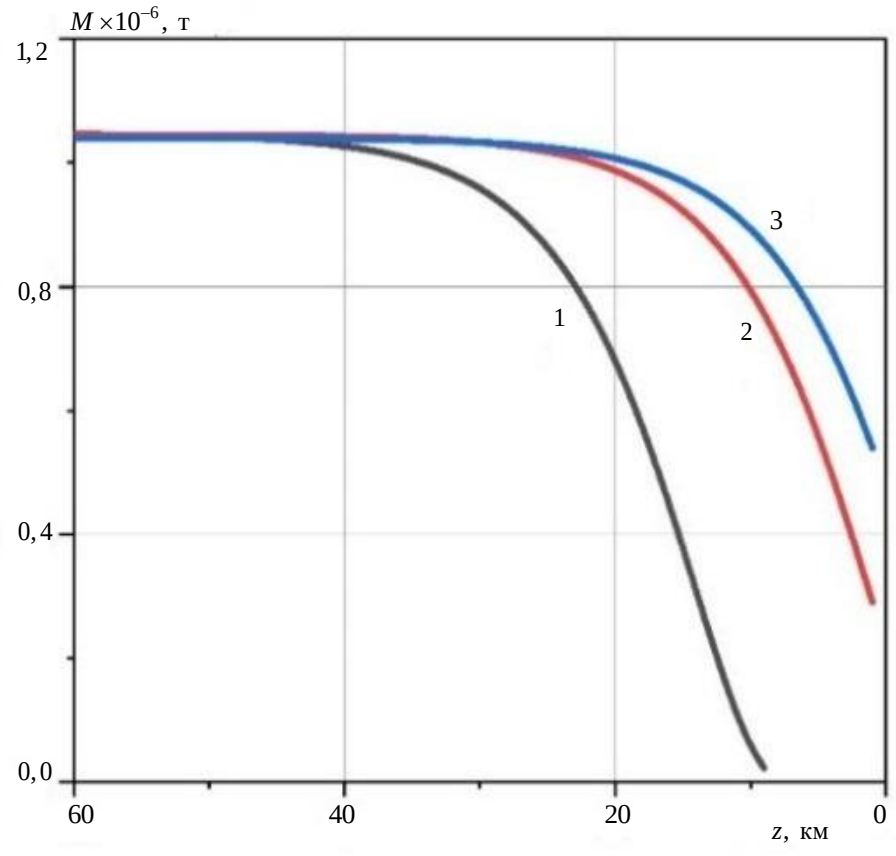
Результаты расчетов. Рассматривались варианты падения Тунгусского тела, состоявшего из различных веществ, соответствовавших кометному, каменному и железному его составу. Полагалось, что тело имело сферическую форму, его начальная масса составляла $M_e = 10^6$ т, а угол и скорость входа в атмосферу были равны $\theta_e = 30^0$ и $V_e = 30$ км/с. В табл. 1 приведены плотность тела ρ_b, эффективная энтальпия его разрушения H_{eff} и прочностная характеристика σ^* для трех типов веществ.

Таблица 1.

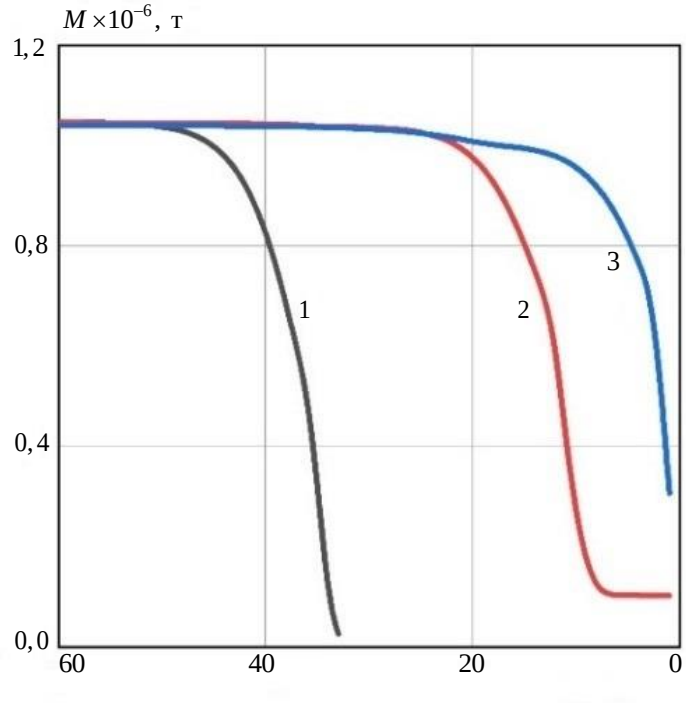
Характерные параметры для трех типов веществ

Состав вещества тела	ρ_b, кг/м^3	H_{eff}, Дж/кг	σ^*, Н/м^2
кометное	1000	2.5×10^6	10^5
каменный хондрит	3300	8.0×10^6	10^7
железное	7800	8.0×10^6	10^8

На рис. 1а представлены расчетные значения уноса массы Тунгусского метеороида 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. 1а видно, что «кометное» тело полностью разрушилось и сгорело в атмосфере, тогда как от каменного осталась примерно четверть 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, тепловые потоки были разные). На рис.1б продемонстрирован унос массы в зависимости от высоты полета для трех типов вещества, дробящихся метеороидов. Видно, что значения уноса массы для модели с учетом фрагментации имели большие значения по сравнению с соответствующими данными рис. 1а за счет увеличения испаряющейся поверхности в потоке. При учете процесса фрагментации показатель степени неоднородности материала принимался равным $\alpha = 1/4$.



а)



б)

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

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 ~ 1.5×10^7 мелких фрагментов, которые могли почти мгновенно испариться в атмосфере. Каменное тело начало разрушаться на высоте 35 км, фрагментация закончилась на высоте 12 км, максимальное число фрагментов составило 4.2×10^4, а конечная масса выпавших фрагментов по расчетам получилась равной одной десятой от первоначальной массы астероида. Железное тело начало фрагментировать на значительно более низких высотах ~ 19 км и этот процесс продолжался почти до самой поверхности Земли (до 2км). Количество образовавшихся фрагментов составило около 2000, а конечная выпавшая масса составила одну треть от первоначальной массы метеороида.

Полученные результаты показали, что под действием тепловых и силовых нагрузок для рассмотренных исходных данных и использованных моделей расчета кометное тело потеряло полностью разрушилось к высоте 30 км и, следовательно, не привело бы к вывалу

леса на огромной территории. Масса выпавших обломков каменного метеороида составила 10^5 т, железного — ~ 3×10^5 т, что привело бы к катастрофическим последствиям, а также к выпадению множества фрагментов – метеоритов на земную поверхность и к появлению многочисленных кратеров.

В связи с полученными результатами этих расчетов были предложены следующие гипотезы падения Тунгусского тела.

1 гипотеза. Полагалось, что это тело состояло из низкопрочного каменного вещества ($\sigma^* = 10^5 - 10^6$ Н/м^2), его начальная масса составляла $M_e = 10^6$ т, скорость входа в атмосферу на высоте 100 км была равна $V_e = 30$ км/с, а угол входа составлял $\theta_e = 45^0$.

В табл. 2 и 3 представлены рассчитанные на основе этих исходных данных максимальные количества образующихся фрагментов $N_{\max}$, соответствующие высоты их образования $z_{\max}$ и размеры отдельных фрагментов R_f для тел с прочностными параметрами $\sigma^* = 10^5$ и 10^6 Н/м^2 и разной степенью неоднородности материала α.

Таблица 2

Максимальное количество образующихся фрагментов для σ^*=10^5 Н/м^2

α	$N_{\max}$	$z_{\max}$, км	R_f, м
1/2	8.52×10^4	23	0.63
1/4	3.34×10^7	34	0.09
1/8	1.48×10^{10}	45	0.01

Таблица 3

Максимальное количество образующихся фрагментов для σ^*=10^6 Н/м^2

α	$N_{\max}$	$z_{\max}$, км	R_f, м
1/2	5.32×10^3	17	1.78
1/4	6.19×10^5	25	0.34
1/8	9.07×10^7	33	0.06

То есть для низкопрочного каменного астероида при малых значениях параметра масштабного показателя $\alpha = 1/4$, 1/8, происходило его быстрое дробление на большое количество фрагментов сантиметровых размеров на высотах 25-45км. Так, например, при $\sigma^* = 10^5$ Н/м^2 и $\alpha = 1/8$ на высоте 45 км образовалось примерно, 1.5×10^{10} фрагментов сантиметрового размера.

Известно (см., например, [15]), что на завершающем этапе движения метеорных тел процесс разрушения фрагментов может продолжиться за счет температурных напряжений. Термические напряжения не играют большой роли для крупных метеорных тел, но, если размер обломка достигнет нескольких сантиметров, то возникшие градиенты температуры могут разрушать его в дальнейшем небольшие обломки до размеров крупной пыли, которая быстро расплавляется и испаряется в высокотемпературном воздухе. В работе [15] оценивалось время, необходимое для достижения критического значения напряжения каменного фрагмента: в частности, с учетом полученных соотношений для тела радиуса 1 см время достижения критических напряжений составит $t^* \sim 0.04$ с, то есть, такое тело моментально подвергнется разрушению из-за возникающих температурных напряжений.

Таким образом, если в процессе дробления образовалось большое количество мелких фрагментов, то весь рой камней мог полностью разрушиться до размеров мелкой пыли, что, возможно, произошло и в Тунгусском явлении. Задача исследования интенсивного взаимодействия облака пыли с земной атмосферой была рассмотрена, например, в работе [16]. При прохождении плотных слоев атмосферы начинался активный процесс испарения пылевых частиц, происходило выделение большого количества газа, что усиливало ударную волну, идущую вниз к земной поверхности. Такая интенсивная ударная волна была способна вызвать вывал леса на огромной территории, а мелкие метеоритные частицы остались незамеченными при поисках крупных метеоритных фрагментов.

2 гипотеза. Как показали численные исследования, траектория полета метеорного тела существенно зависела от угла вектора скорости к горизонту θ. При достаточно малых углах входа в атмосферу космическое тело вообще могло не упасть на Землю, а пронзить атмосферу и выйти из нее в межпланетное пространство (см. рис.2).

В работе [17] с помощью вычислительного эксперимента на основе модифицированной физической теории метеоров были исследованы сквозные (пролетные) траектории полета крупных метеороидов в атмосфере Земли, отличавшиеся от стандартных траекторий «звездопада» (кривая 1 на рис.2). При этом рассматривалась проблема разрушения метеорных тел под действием тепловых и силовых нагрузок в атмосфере. Были выявлены также сложные траектории полета метеорных тел с чередованием стадий нисходяще-восходящего движения (кривая 2 на рис.2).

В работе [17] было получено, что если рассматривать задачу в приближении единого тела (без учета фрагментации), то при углах входа в атмосферу $\theta_e > 9^\circ$ (на высоте 100 км) рассматриваемый метеороид

выпадал на Землю, а при $\theta_e \le 9^o$, начиная с определенной высоты, его траектория становилась восходящей.

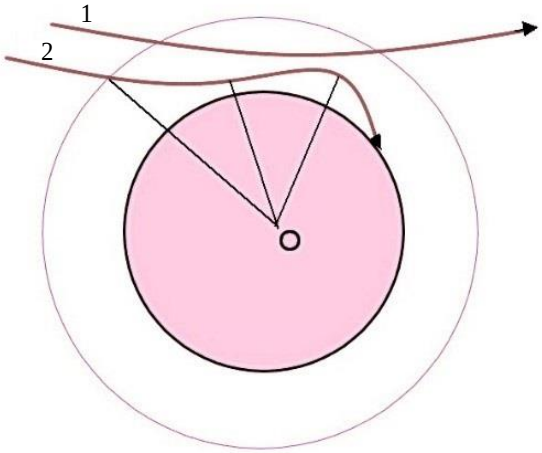


Рис 2. Нестандартные траектории полета небесных тел.
1 — сквозная траектория; 2 — траектория с чередованием нисходящего и восходящего режимов движения.

Отметим, что критическое значение угла входа для модели единого тела $\theta_e = 9^o$, при котором траектории становились сквозными, подтверждалось также оценками, приведенными в работе [6]. Проанализируем подробнее пологую траекторию движения крупного метеорного тела в атмосфере Земли с учетом результатов этой работы. Изменение угла входа тела в атмосферу представлено вторым уравнением движения в системе уравнений (1). В работе [6] не рассматривались процессы тепловой абляции и фрагментации метеороида и полагалось, что тело имеет сферическую форму, т.е. $C_N = 0$. Тогда для пологой траектории $\cos(\theta) \approx 0$ уравнение движения (2) запишется в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V} - \frac{V}{R_E}. \qquad (12)$$

Далее считалось, что на высотах более 40 км скорость постоянна и равна скорости входа $V = V_e$.

Заметим, что правая часть уравнения (12) обращается в ноль, когда $V_e \sim 8$ км/с, то есть, когда скорость входа близка к первой космической скорости. С увеличением V_e растет второй член в правой части уравнения (12), а первый убывает, угол наклона траектории в этом случае не является постоянным, то есть движение тела происходит не по прямой линии. В работе [6] интегрируются уравнения (12) и уравнение

$\frac{dz}{dt} = -V\sin\theta$. С учетом малой величины угла входа получаются следующие аналитические зависимости для изменения угла наклона траектории к земной поверхности и высоты от времени полета тела:

$$\theta = \theta_e + \left(\frac{g}{V} - \frac{V}{R_E}\right)t,$$
$$z = z_e - V_e\theta_e t + \frac{at^2}{2},\ a = \left(\frac{V_e^2}{R_E} - g\right). \qquad (13)$$

Результаты расчета траектории движения тела по формуле (13) при углах входа $\theta_e = 5^\circ,\ 7^\circ,\ 9^\circ$ рассматриваемого тела представлены на рис. 3 (квадраты, треугольники, ромбы соответственно). Здесь же приводятся результаты численного интегрирования рассматриваемой системы уравнений (1) без учета процессов абляции и фрагментации (сплошные линии).

Из графиков на рис. 3 видно хорошее совпадение точного численного и приближенного решений для углов входа $\theta_e = 5^\circ,\ 7^\circ$ и расхождение результатов на восходящей ветви траектории при $\theta_e = 9^\circ$. Это объясняется, по-видимому, тем, что для этого угла входа движение тела происходит уже в достаточно плотных слоях атмосферы, где оно заметно тормозится, поэтому условие постоянства скорости в приближенных зависимостях [6] для $\theta_e = 9^\circ$ уже является грубым приближением.

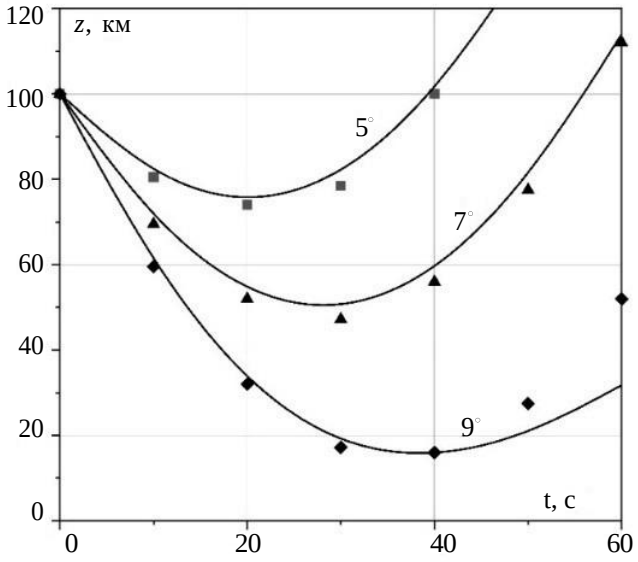


Рис 3. Изменение высоты полета тела массой $M_e = 10^6$ т в зависимости от времени для углов входа в атмосферу $\theta_e = 5^\circ,\ 7^\circ,\ 9^\circ$ и скорости входа $V_e = 30$ км/с

Как показывают результаты численных исследований, учет процессов абляции и фрагментации рассматриваемого каменного метеороида приводит к уменьшению критического значения угла входа: $\theta_e = 8^o$. На рис. 4 представлены результаты расчетов высоты полета для каменного метеороида в зависимости от времени при угле входа тела в атмосферу $\theta_e = 8^o$ для критического значения прочностного параметра $\sigma^* = 10^6$ Н/м^2. Результаты получены для разных значений показателя неоднородности материала дробящегося метеороида α (кривые 2-4) и для случая не фрагментирующего метеороида (кривая 1). 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; $\alpha = 0.125$ – 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. Следует отметить, при пологих траекториях, т.е. малом угле входа в атмосферу, существенно сокращается количество образующихся фрагментов по сравнению с более крутыми траекториями Это связано с тем, что, когда тело движется под малым углом к земной поверхности, процесс фрагментации затормаживается: возрастание скоростного напора не такое стремительное, как при крутых траекториях, а появление новых фрагментов, согласно рассматриваемой модели дробления, существенно зависит от величины скоростного напора.

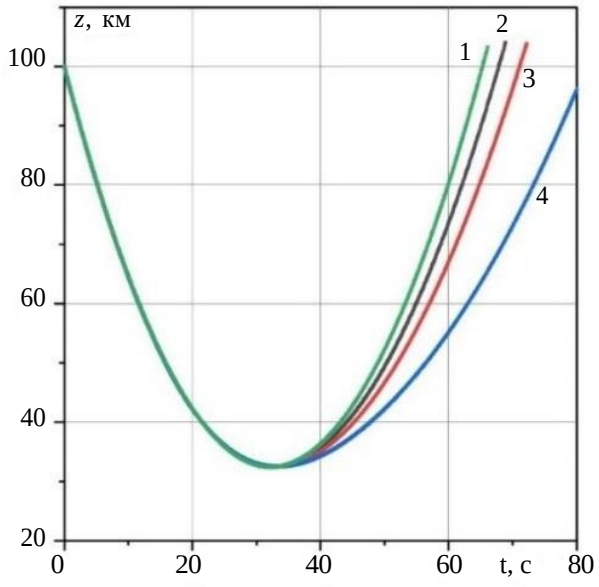


Рис 4. Схема обозначения дуг сетки:
а) для расчета нормальных напряжений и перемещений в криволинейном элементе;
б) для расчета касательных напряжений

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

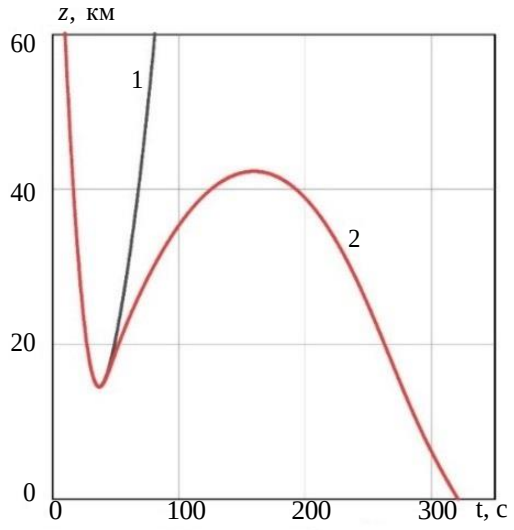


Рис 5. Зависимость высоты полета z от времени t железного астероида для угла входа в атмосферу $\theta_e = 9^\circ$ при $\sigma^* = 10^8$ Н/м^2: 1 – без учета фрагментации; 2 – с учетом фрагментации, показатель степени неоднородности материала $\alpha = 0.25$

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 $\sigma^* = 10^8$ Н/м^2 процесс фрагментации начинается на высоте 18 км и заканчивается на 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. 2). Дальность полета этих обломков составляет ~ 2800 км.

В случае железного метеороида траектория будет пролетной (рис.6) для угла входа 8.5°, причем в этом случае тело не будет фрагментировать, т.к. скоростной напор при движении тела не превзойдет критическое значение прочностного параметра $\sigma^* = 10^8$ Н/м^2. На рис. 6 представлено также изменение массы метеороида во время полета. В результате прохождения в атмосферных слоях у тела остается примерно 45 % от первоначальной массы.

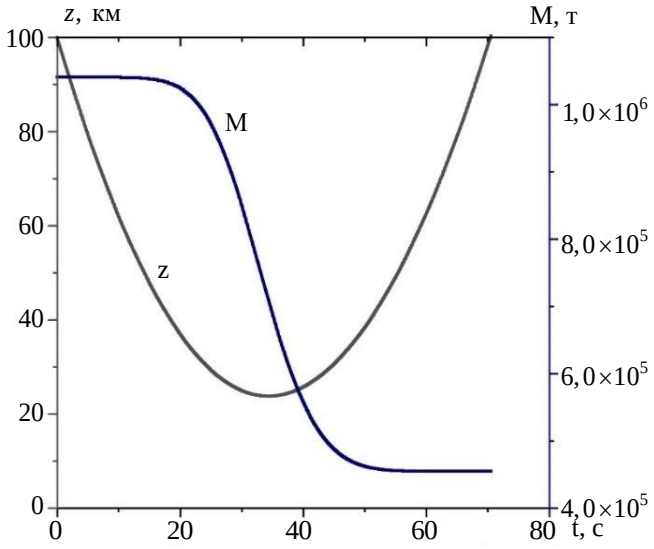


Рис. 6. Зависимость высоты полета z и массы M от времени t железного астероида для угла входа в атмосферу $\theta_e = 8.5^\circ$ и при $\sigma^* = 10^8$ Н/м^2

Полученные результаты позволили объяснить многие проявления Тунгусского феномена 1908г. Так, если Тунгусское тело вторглось в атмосферу под малым углом наклона к горизонту ($\theta_e \le 8.5^\circ$), 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 [6, 7]. Эта гипотеза позволяет объяснить ранее непонятные результаты «предполагаемого места падения», исследованного многими экспедициями: отсутствие кратера и каких-либо материальных останков метеоритного вещества на Земле

Выводы. На основе разработанной физико-математической модели, определяющей движение метеороидов в атмосфере Земли рассмотрены две гипотезы, объясняющие процессы, происходившие при падении Тунгусского тела в 1908г. Первая гипотеза связана с дроблением тела, представляющего собой низкопрочный каменный метеороид на большое количество фрагментов, которые разрушались в плотных слоях атмосферы под действием термических напряжений до размера мелкой пыли. Взаимодействие облака пыли с земной атмосферой и инициировало интенсивную ударную волну, идущую вниз к

земной поверхности и способную вызвать вывал леса на огромной территории.

Вторая гипотеза связана с явлениями, возникавшими при малых углах входа тела в атмосферу Земли. Так, если Тунгусское тело (каменное или железное) вторглось в атмосферу под малым углом наклона к горизонту ($\theta_e \le 8.5^o$), 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.

Эти гипотезы объясняют отсутствие материальных следов, в том числе и кратеров в ходе поисков останков в окрестности вывала леса.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Коробейников В.П. *Принципы математического моделирования.* Владивосток, Дальнаука, 1996, 180с.

[2] Руденко Д.В., Утюжников С.В. Газодинамические последствия взрыва Тунгусского космического тела. *Математическое моделирование*, 1999, т. 11, № 10, с. 49-61.

[3] 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.

[4] 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, pp. 40-44.

[5] Светцов В.В. Куда делись осколки Тунгусского метеороида? *Астрономический вестник. Исследование солнечной системы*, 1996, т. 30, № 5, с. 427-441.

[6] Мурзинов И.В. Проблема века: куда улетел Тунгусский метеорит. *Космонавтика и ракетостроение,* 2015, №4 (83), с. 65-72.

[7] 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, pp. 1344-1351.

[8] Левин Б.Ю. *Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе*. Москва, АН СССР, 1956, 293 с.

[9] 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, № 5, с. 827-836.

[10] Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г., Шевелев Ю.Д. Моделирование падения Челябинского метеорита. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2013, т. 5, № 6, с. 927-940.

[11] Мурзинов И.Н. Ламинарный пограничный слой на сфере в гиперзвуковом потоке равновесно диссоциирующего воздуха. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1966, № 2, с. 184-188.

[12] Апштейн Э.З., Вартанян Н.В., Сахаров В.И. О распределении лучистых тепловых потоков по поверхности пространственных и осесимметричных тел при сверхзвуковом обтекании их идеальным газом. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1986, № 1, с. 92-97.

[13] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(3), pp. 293 - 297.

[14] 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.

[15] Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г., Шевелев Ю.Д., Головешкин В.А. О механизмах разрушения метеорных тел и теплопередаче к их поверхности. *Матемематическое моделирование*, 2016, т. 28, № 2, с. 31-39.

[16] Плотников В.А., Шуршалов Л.В. О взаимодействии космического пылевого облака с атмосферой. *Журнал вычислительная математика и математическая физика*, 1994, т. 34, № 1, с. 117-129.

[17] Syzranova, N.G., Andrushchenko, V.A. *Unconventional Trajectories of Meteoroids in the Earth's Atmosphere. Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore, Springer, 2022, 274, pp. 179–193.

Статья поступила в редакцию 18.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г. Моделирование Тунгусского явления 1908 года в рамках двух возможных гипотез. *Математическое моделирование и численные методы*, 2023, № 3, с. 42–61.

Андрущенко Виктор Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института автоматизации проектирования РАН. e-mail: andrusviktor@ya.ru

Сызранова Нина Геннадьевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Ученый секретарь Института автоматизации проектирования РАН. e-mail: nina-syzranova@ya.ru

Modeling of the Tunguska phenomenon in 1908 within the framework of two possible hypotheses

© V.A. Andrushchenko, N.G. Syzranova

ICAD RAS, Moscow, 123056, Russia

Within the framework of the actual problem of comet-asteroid danger, the physical processes that cause the destruction and fragmentation of meteoric bodies in the Earth's atmosphere, in this case the Tunguska bolide, are numerically studied. The number of possible versions and hypotheses related to the Tunguska phenomenon is extremely large and continues to increase, therefore, an analysis and generalization of all known facts inherent in this non-standard catastrophic event is necessary, and only then proceed to the nomination of certain hypotheses explaining it. Based on the developed physical and mathematical model that determines the movement of space objects of natural origin in the atmosphere and their interaction with it, we have proposed two hypotheses explaining the processes occurring during the fall of the Tunguska body in 1908. The first hypothesis is

related to the fragmentation of the body, which is a stone meteoroid into a large number of fragments, which collapsed in the dense layers of the atmosphere under the action of thermal stresses to the size of fine dust. The difficulties in identifying small particles that fell out as a result of the Tunguska event are mainly explained by the following circumstance: the timing of the initial search for traces of the fall of the body was removed from the moment of the event by as much as twenty years, during which a very significant number of other geophysical processes could occur in this area. The second hypothesis is related to phenomena that occur at small angles of entry of a body into the Earth's atmosphere. In this case, there is a change in the ballistics of its flight in the atmosphere, consisting in a transition from the fall mode to the ascent mode. This effect leads to the realization of the following possible scenarios of the event: the return of the body back to outer space at its residual velocity greater than the second cosmic one; the transition of the body to the orbit of the Earth satellite at a residual velocity greater than the first cosmic one; at lower values of the residual velocity of the body, its return after some time to the fall mode and reaching the earth's surface at a considerable distance from the intended crash site. The proposed hypotheses explain, for example, the absence of material traces, including craters, during the search for the remains of the Tunguska bolide in the vicinity of the forest collapse.

***Keywords**: Tunguska meteoroid, mathematical model, heat flux, thermal stresses, fragmentation, strength, through trajectories*

REFERENCES

[1] Korobeinikov V.P. *Printsipy matematicheskogo modelirovaniya* [The Principles of Mathematical modeling]. Vladivostok, Dalnauka. 1996, 180 p.

[2] Rudenko D.V., Utyuzhnikov S.V. Gazodinamicheskiye posledstviya vzryva Tungusskogo kosmicheskogo tela [Gasdynamic consequences of the explosion of the Tunguska cosmic body]. *Mathematical modeling*, 1999, vol. 11, no. 10, pp. 49-61.

[3] Rudenko D.V., Utyuzhnikov S.V. Primeneniye dinamicheski adaptivnykh k resheniyu setok dlya modelirovaniya prostranstvennykh nestatsionarnykh techeniy gaza s bol'shimi gradiyentami [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, pp. 377-390.

[4] 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, pp. 40-44.

[5] Svettsov V.V. Kuda delis' oskolki Tungusskogo meteoroida? [Where have the debris of the Tunguska meteoroid gone?] *Solar System Research*, 1996, vol. 30, no. 5, pp. 378-390.

[6] Murzinov I.V. Problema veka: kuda uletel Tungusskiy meteori [The problem of the century: where the Tunguska meteorite flew]. *Kosmonavtika i raketostroen'ie [Cosmonautics and rocket science]*, 2015, no. 4 (83), pp. 65-72.

[7] 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, pp. 1344-1351.

[8] Levin B. Yu. *Fizicheskaya teoriya meteorov i meteornoye veshchestvo v Solnechnoy sisteme [Physical Theory of Meteors and Meteoric Matter in the Solar System]*. Moscow, Akademia Nauk SSSR, 1956, 293 p.

[9] Andrushchenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D. Ocenka teplovyh potokov k poverhnosti zatuplennyh tel pri dvizhenii s giperzvukovoj skorost'yu v

atmosfere [An estimate of heat transfer to blunt bodies moving with hypersonic velocity in the atmosphere]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, vol. 71, no. 5. pp. 747-754.

[10] Andruschenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D. Modelirovaniye padeniya Chelyabinskogo meteorite [Modeling of Chelyabinsk meteorite fall]. *Computer Research and Modeling* 2013, vol. 5, no. 6. pp. 927–940.

[11] Murzinov I.N. Laminar boundary layer on a sphere in hypersonic flow on a equilibrium dissociating air]. *Fluid Dynamics*, 1966, vol.1, no. 2, pp. 131-132.

[12] Apshtein E.Z. Vartanyan N.V., Sakharov V.I. Distribution of radiant heat flux over the surface of three-dimensional and axisymmetric bodies in a supersonic ideal-gas flow. *Fluid Dynamics*, 1986, vol. 21, no. 1, pp. 78-83.

[13] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(3), pp. 293 - 297.

[14] Tirskiy, G.A., Khanukaeva, D.Y. Ballistics of a fragmenting meteor body with allowance made for ablation in the non-isothermal atmospher [Ballistics of a fragmenting meteor body with allowance made for ablation in the non-isothermal atmosphere]. *Kosmicheskiye issledovaniya [Space research]*, 2008, vol. 46, no. 2, pp. 120-132.

[15] Andrushchenko V. A., Syzranova N. G., Shevelev Yu. D., Goloveshkin V. *A.* Destruction mechanisms of meteoroids and heat transfer to their surfaces. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2016, vol. 28, no. 2, pp. 506–512.

[16] Plotnikov P.V., Shurshalov L.V. The interaction of a cloud of interplanetary dust with the atmosphere. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1994, vol. 34, no. 1, pp. 97-106.

[17] Syzranova, N.G., Andrushchenko, V.A. *Unconventional Trajectories of Meteoroids in the Earth's Atmosphere. Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore, Springer, 2022, 274, pp. 179–193.

Andrushchenko V. A., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Chief Researcher at the Institute for Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences. e-mail: andrusviktor@ya.ru

Syzranova N.G., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Scientific Secretary at the Institute for Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences. e-mail: nina-syzranova@ya.ru