

УДК 539.3

О РАЗМЕРАХ ОСКОЛКОВ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА¹*Егорова Л. А.², Лохин В. В.³, Тирский Г. А.⁴*

ABOUT THE SIZE OF THE FRAGMENTS THE CHELYABINSK FIREBALL

Egorova L. A., Lokhin V. V., Tirskiy G. A.

The entrance to the Earth's atmosphere bright fireball February 15, 2013 near Chelyabinsk gave the new material for investigations in meteor astronomy. In particular, the new observations data provide an opportunity to test existing models. This article presents estimates for size of fragments of Chelyabinsk fireball, made according to proposed earlier two-stage model of meteoroids crushing in atmosphere. We assume that during the motion in the atmosphere meteoroid repeatedly fragmenting due to the aerodynamic forces of inertia. At the first stage of the progressive fragmentation the fireball becomes a cloud of sufficiently homogeneous large fragments which in the second stage continues to break down, but explosively, into even smaller and the smallest fragments and particles. It is shown that therefore finding quite large fragments at the ground is unlikely.

Keywords: meteoroid, fireball fragmentation, progressive fragmentation, aerodynamic forces, Chelyabinsk fireball.

Введение

Наблюдения полета болидов в атмосфере Земли показывают, что их разрушение в атмосфере — обычное явление. Как это происходит? Известно, что космические тела, двигаясь в атмосфере, подвергаются с её стороны двум воздействиям: аэродинамическому сопротивлению и аэродинамическому нагреванию.

Аэродинамическое сопротивление приводит к нарастающим экспоненциально (за счет увеличения плотности атмосферы) перегрузкам, потере кинетической энергии и возможному дроблению. Дробление происходит в случае достижения скоростным напором (ρV^2 , где ρ — плотность атмосферы, а V — скорость тела) предела прочности материала на разрушение. Одновременно метеороид нагревается, плавится, а его фраг-

менты испаряются [1]. Аэродинамическое нагревание вследствие работы тела над атмосферой и за счет потери кинетической энергии приводит к её нагреву за головной ударной волной до нескольких сот тысяч градусов. Происходит интенсивное конвективно-радиационное нагревание самого метеороида. При достижении соответствующей температуры происходит потеря его массы (плавление, испарение, шелушение, пиролиз [1].

Хотя поверхностный унос массы происходит на всей траектории движения тела в атмосфере, для крупных тел вклад такого разрушения составляет не более 5–6% [2]. Основная причина разрушения достаточно крупного космического тела — превышение сил инерции над упругими напряжениями выше предела прочности тела.

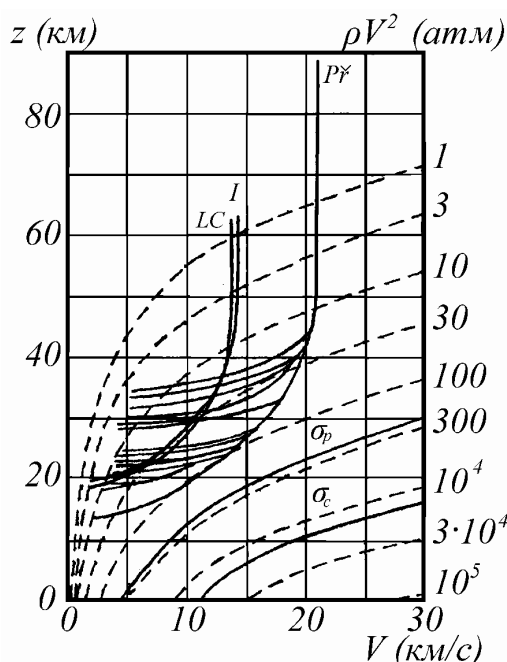
На рисунке [3] показаны изолинии скоростного напора (штриховые) и кривые изме-

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (11-01-00504-а) и при поддержке гранта Правительства РФ по постановлению №220 «О мерах по привлечению ведущих учёных в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования» по договору № 11.G34.31.0072, заключенного между Министерством образования и науки РФ, ведущим учёным и Московским физико-техническим институтом (государственным университетом).

²Егорова Лидия Александровна, научный сотрудник НИИ механики Московского государственного университета; e-mail: egorova@imec.msu.ru.

³Лохин Валерий Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИИ механики Московского государственного университета; e-mail: valeriy.lokhin@yandex.ru.

⁴Тирский Григорий Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры вычислительной математики Московского физико-технического института; e-mail: tirskiy@imec.msu.ru.



Изолинии скоростного напора (штриховые) и кривые изменения скорости метеоритов Лост-Сити (LC), Иннисфри (I) и Пршибрам (Pш) [3]

нения скорости метеоритов Лост-Сити (LC), Иннисфри (I) и Пршибрам (Pш). Именно для этих трех болидов, зарегистрированных болидными сетями (системами наземных станций наблюдений) были найдены осколки, выпавшие на поверхность Земли. Штриховыми линиями нанесены кривые скоростного напора в атмосферах. Видно, что для трех этих случаев разрушение произошло в момент, когда скоростной напор составлял от 10 до 300 атм.

Моделирование разрушения метеороидов в атмосфере до сих пор вызывает споры между приверженцами различных концепций. Модели разрушения метеороидов можно условно отнести к двум классам — теория прогрессивного дробления [4] и катастрофического (квазиджидкого, гидродинамического) [5]. В первом случае предполагается, что тело распадается на несколько крупных кусков за счет случайных дефектов прочности. Во втором случае тело предполагается однородным и при многократном превышении аэродинамической нагрузки предела прочности тела оно превращается в некоторый связный объем бесконечно малых уже не связанных между собой частиц, которые продолжают двигаться совместно.

Работы, посвященные прогрессивному дроблению, описывают схему последователь-

ного дробления космических тел на несколько фрагментов, в соответствии с которыми распадается большинство наблюдаемых метеороидов. Однако, они не дают удовлетворительного объяснения наблюдающихся концевых всплесков мелких и теплового взрыва крупных метеороидов, в частности, взрыва Тунгусского космического тела.

1. Уравнения физической теории метеоров

В метеорной физике основной математической моделью является физическая теория метеоров, состоящая из уравнения движения центра масс метеороида с переменной массой и площадью миделя с заданным коэффициентом сопротивления и уравнения потери массы с заданным в нем коэффициентом теплопередачи и эффективной энтальпией уноса массы с поверхности метеороида (элементарная физическая теория метеоров, ФТМ) [7]

$$M \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} A C_D \rho V^2, \quad (1.1)$$

$$Q \frac{dM}{dt} = -\frac{1}{2} A C_H \rho V^3,$$

где V , M , A , Q — скорость, масса метеороида, площадь его миделя и эффективная эн-

тальпия уноса массы с поверхности метеороида за счет действия аэродинамических сил и аэродинамического нагрева, C_D и C_H — коэффициенты сопротивления и теплопередачи, ρ — плотность газа.

2. Максимальный размер фрагмента, не испытывающего упругого дробления

Как показано выше, основной механизм разрушения крупных тел — дробление за счет критически высоких нормальных упругих напряжений. Однако, двигаясь в атмосфере, тело тормозится. И в какой-то момент сила, действующая на него, будет недостаточна для такого разрушения. Если величина скоростного напора не возрастает (проходит максимум), то тело уже не будет разрушаться за счет упругих напряжений.

Оценим величину осколков, которые уже не подвержены упругому разрушению, предполагая не возрастание скоростного напора [8]

$$\frac{d}{dt}(\rho V^2) \leq 0.$$

Так как форма метеороида нам неизвестна, будем полагать его шарообразным. Фрагмент не будет испытывать дальнейшего дробления на высоте z^* , если функция скоростного напора $\rho(z)V^2(z)$ имеет максимум на этой высоте. Здесь $V(z)$ — скорость фрагмента, определяющая аэродинамическое давление и, следовательно, напряженное состояние внутри фрагмента.

Пусть

$$z = z_* - \int V(t) dt,$$

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

тогда

$$\rho(z)V^2(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z_*}{h} + \frac{1}{h} \int V dt\right) V^2(t).$$

В точке максимума

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho(z)V^2(z)) &= \\ &= \rho_0 \exp\left(-\frac{z_*}{h}\right) \left(\exp\left(\frac{1}{h} \int V dt\right) \frac{V^3}{h} + \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(\frac{1}{h} \int V dt\right) 2V \frac{dV}{dt} \right) = 0. \end{aligned}$$

Получаем

$$\frac{V^2}{h} + 2 \frac{dV}{dt} = 0. \quad (2.1)$$

Из предположения о шарообразной форме метеороида и уравнений (1.1) получаем

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{3}{8} C_D \frac{\rho}{\rho_m} \frac{V^2}{r}.$$

Подставляя эту формулу в (2.1) можно определить размер частиц, которые уже не испытывают аэродинамической нагрузки, достаточной для их разрушения.

$$r \leq \frac{3}{4} \frac{C_D h \rho_0}{\rho_m} e^{-\frac{z_*}{h}}. \quad (2.2)$$

Такие фрагменты тела будут разрушаться только за счет термонапряжений, плавления и испарения в горячем газе. Размер таких частиц для типичных параметров входа. Эта формула была предложена нами в [8] для тела входящего по траектории, близкой к вертикальной, когда величиной угла входа можно пренебречь. С учетом угла входа θ

$$r \leq \frac{3}{4} \frac{C_D h \rho_0}{\rho_m \sin \theta} e^{-\frac{z_*}{h}}$$

3. Оценки размеров осколков для Челябинского болида

Оценим максимальный размер осколков Челябинского болида. Для этого обратимся к наблюдательным данным. По оценкам из [9, 10] высота разрушения для этого космического тела была оценена как $z^* = 23$ км. Масса родительского тела $M = 7 \div 12 \cdot 10^3$ т, скорость входа $V = 18,6$ км/с, а диаметр $D = 17$ м, $\theta = 15$.

Выше нами найдено соотношение для максимального радиуса тела (2.2), не испытывающего упругого дробления. Подставляя значение плотности метеороида, равное (обыкновенный хондрит) $\rho_m = 1,67 \div 3,89$ г/см³, высоту стандартной атмосферы $h = 6,7 \cdot 10^3$ м, плотность воздуха $\rho_0 = 1,29$ кг·м⁻³, $C_D = 1$, получаем следующую оценку максимального размера осколка $r_{\max} = 0,484$ м.

Фрагменты большего размера должны раздробиться в атмосфере за счет аэродинамических нагрузок и их выпадение на поверхность Земли в неизменном виде кажется маловероятным. Фрагменты меньшего размера могли также далее разрушаться за счет

других факторов — тепловых нагрузок (термоупругое разрушение), излучения, плавления.

На данный момент в распоряжении исследователей из Уральского федерального университета находятся более 500 фрагментов общим весом около 5 кг. Большая часть из них имеет массу от 1,2 до 300 г [10]. Масса максимального фрагмента не превышает 1,2 кг.

Заключение

Мы полагаем, что в процессе движения в атмосфере метеороид многократно дробится за счет аэродинамических сил инерции. На первой стадии прогрессивного дробления образуется облако достаточно однородных крупных фрагментов, которые на второй стадии продолжают разрушаться, но уже взрывоподобно, на еще более мелкие и мельчайшие осколки и частицы [11]. Показано, что выпадение достаточно крупных осколков маловероятно.

Литература

1. Левин Б. Ю., Бронштэн В. А. Тунгусское событие и метеоры с заключительной вспышкой // *Астрономический вестник*. 1985. Т. 19. № 4. С. 319–330.
2. Тирский Г. А. Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет // *Сороковский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 5. С. 76–82.
3. Цветков В. И., Скрипник А. Я. Атмосферное дробление метеороидов с точки зрения механической прочности // *Астрономический вестник*. 1991. Т. 25. № 3. С. 364–371.
4. Тирский Г. А., Ханукаева Д. Ю. Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере. II // *Космические исследования*. 2008. Т. 46. № 2. С. 122–134.
5. Григорян С. С. О движении и разрушении метеороидов в атмосферах планет // *Космические исследования*. 1979. Т. XVII. Вып. 6. С. 875–893.
6. Мартин Дж. Вход в атмосферу. М.: Мир, 1969. 320 с.
7. Бронштэн В. А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
8. Egorova L. A., Lokhin V. V. Destruction models for the bodies entering planetary atmosphere // *Proc. of the International Conference “Asteroid-Comet Hazard – 2009”*. St. Petersburg: Nauka, 2010. P. 222–227.
9. Brown P. A Preliminary Report on the Chelyabinsk Fireball/Airburst // *WGN. The Journal of the IMO*. 2013. Vol. 41. No. 1. P. 22.
10. Гроховский В. И., Ларионов М. Ю., Яковлев Г. А., Максимова А. А., Гизатуллина Р. Ф., Урывкова А. А., Зайнуллина А. М., Гладковский С. В., Каманцев И. С., Ищенко А. В., Рыжков М. А., Петрова Е. В., Вайнштейн И. А., Возминцев А. С., Оштрах М. И., Семенкин В. А., Гриневич М., Кохоут Т., Игнатъев А. В., Веливецкая Т. А., Кияшко С. И. Структура и свойства метеороида «Челябинск» // *Астероиды и кометы. Материалы научно-практ. конф.* 21–22 июня 2013, г. Чебаркуль, 2013. С. 72–75.
11. Egorova L. A. Two stage destruction of meteoroid // *Proc. of the International Meteor Conference, La Palma, 19–23 Sept, 2012*. Vol. 2. P. 150–151.

Ключевые слова: метеороид, разрушение болидов, прогрессивное дробление, аэродинамические силы, Челябинский болид.

Статья поступила 4 октября 2013 г.

НИИ механики Московского государственного университета, г. Москва
Московский физико-технический институт, г. Москва

© Егорова Л. А., Лохин В. В., Тирский Г. А., 2013