

УДК 539.42

ВЗРЫВОПОДОБНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТЕОРОИДА**Егорова Л. А., Лохин В. В.****EXPLOSION-LIKE DISTRUCTION OF METEOROID**

Egorova L. A., Lokhin V. V.

Institute of mechanics of Moscow State University, Moscow, 119192, Russia

e-mail: egorova@imec.msu.ru

Abstract. Observations of the flight of meteoric bodies from ground and orbital stations fix the intensity of their luminescence along the trajectory. The results of observation are usually represented in the form of a graph — the luminosity curve. For large meteoroids (diameter more than 10 cm) a sharp increase in its emission at the end of the flight is often recorded, the so-called “final flash”. With large body sizes some authors also introduce the concept of “meteor explosion” because of the effects that motion and destruction of the body in the atmosphere produces on the surface of the Earth (shock and heat wave).

In this paper, authors propose a model for the destruction of a fireball and a model for the transition of its kinetic energy to thermal energy. Authors consider the destruction of the bolide into many fragments as if a solid body destruction in an explosion. After crushing the kinetic energy of the moving particles of the meteoric body passes into the thermal energy of the gas volume in which their motion occurs. Assuming the known distribution of the meteoroid fragments by mass after crushing, a temperature is obtained in a cloud of gas and particles for specific conditions of the Chelyabinsk event. The high temperature of the gas in such a cloud allows us to talk about the phenomenon of “thermal explosion”.

Keywords: fireball fragmentation, explosion of meteoroid, energy release, physical theory of meteors.

Известно, что для интерпретации наблюдений необходимо учитывать фрагментацию болида в атмосфере Земли [1]. В настоящее время разработаны различные модели дробления большого космического тела в атмосфере [1, 2]. Статья продолжает предыдущие исследования авторов по фрагментации болидов [3, 4]. В настоящей работе предлагается модель разрушения болида и модель перехода его кинетической энергии в тепловую. Предполагаем разрушение болида на множество фрагментов, подобное разрушению твердого тела при взрыве. После дробления кинетическая энергия движущихся частиц метеорного тела переходит в тепловую энергию объема газа, в котором происходит их движение.

Введение

Взаимодействие метеороидов с атмосферой остается важнейшей задачей астрономии,

математической физики, механики и физической химии в связи с проблемой астероидно-кометной опасности. Внедрение в атмосферу тел размерами 10–300 м может вызвать на поверхности Земли катастрофические последствия регионального и даже глобального масштаба. Такие явления происходят достаточно часто и в то же время эти тела практически невозможно обнаружить заранее вне атмосферы [5]. Поэтому изучение движения и разрушения таких тел и их последствия вызывают особый интерес исследователей.

Наблюдения за полетом метеорных тел с помощью наземных и орбитальных станций фиксируют интенсивность их свечения вдоль траектории. Результаты наблюдения обычно представляются в виде графика — кривой светимости. Для больших метеороидов (диаметром более 10 см) часто регистрируется

Егорова Лидия Александровна, научный сотрудник лаборатории физико-химической газодинамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: egorova@imec.msu.ru

Лохин Валерий Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической газодинамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: lokhin@imec.msu.ru

резкое увеличение его свечения в конце полета, так называемая «конечная вспышка».

Сейчас все больше работ моделируют вход и разрушение метеорных тел в атмосфере и вычисление высвобождаемой энергии. Мы рассмотрели наиболее интересные из этих работ, которые хорошо моделируют наблюдательные данные.

В [5] выделены четыре типа взаимодействия метеорных тел с атмосферой: «1) образование кратера (когда космическое тело, возможно, даже сильно фрагментированное, достигает поверхности Земли и образует кратер), 2) поверхностный гигантский болид (ГБ) или, другими словами, поверхностный “взрыв метеора” (когда высокоскоростная струя, состоящая из небольших фрагментов и паров метеороида и воздуха, нагретого в ударной волне, достигает поверхности Земли без образования кратера), 3) воздушный ГБ или воздушный “взрыв метеора” (когда продукты полностью распадающегося и испаренного метеорного тела замедляются в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметное разрушение и пожары), 4) обычные метеорные явления (которые можно наблюдать с Земли и из космоса, но они не оставляют существенных следов на поверхности Земли)». Рассматривается третий тип взаимодействия. А для тела размером порядка челябинского болида моделировалась фрагментация на высоте около 15 км и на высоте 10 км полное испарение и формирование высокоскоростной газовой струи, которая затем моделировалась численно. Достигнуто хорошее согласие с эффектами, наблюдаемыми на земле.

В работе [6] предложены численные методы решения уравнений движения и испарения метеорных тел для различных моделей дробления, включая модель «блин», модели дробления с коллективными и отдельными ударными волнами и смешанную модель. Выбрав свободные параметры задачи, удалось получить совпадение с наблюдательными данными для челябинского события.

Вышеупомянутые работы дают хорошее моделирование результатов наблюдений и очень полезны для практики, однако не дается никаких объяснений по поводу источника высвобожденной тепловой энергии после дробления. Поэтому мы предложили модель

разрушения и переход кинетической энергии в тепловую.

1. Взрывоподобное дробление метеороида

Существует множество моделей дробления метеороидов, каждое из которых имеет подтверждение успешным совпадением с наблюдательными данными. Интересен такой класс явлений, когда энергия дробящегося и взрывающегося метеороида достигает поверхности Земли. Мы предполагали, что тело распадается на отдельные фрагменты различного размера, которые затем движутся независимо. Взрывной характер наблюдаемых эффектов позволяет предположить, что аэродинамическое сопротивление в несколько раз превышает прочность тела или фрагментов предварительно разрушенного тела. Это возможно из-за высокой скорости метеороида и экспоненциального роста плотности атмосферы при уменьшении ее высоты. В результате дробления в таких условиях можно предположить распределение фрагментов по размерам аналогично распределению по размерам фрагментов тела внезапно разрушенного взрывом. Существует ряд работ описывающих такие распределения. Мы использовали распределение масс фрагментов, данное в [7]

$$\frac{dN_m}{dm} = C m^{\frac{k}{3}-2}, \quad k = 1, 2. \quad (1.1)$$

В предыдущих работах [3, 4] для такого типа разрушения мы построили кривую погасания аналитически используя соотношение светимости и уравнения физической теории метеоров

$$M \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} S C_D \rho V^2,$$

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

$$I = -\tau \frac{V^2}{2} \frac{dM}{dt},$$

где V , M , S , Q — скорость, масса метеороида, площадь его миделя и эффективная энтальпия уноса массы с поверхности метеороида за счет действия аэродинамических сил и аэродинамического нагрева, C_D и C_H — коэффициенты сопротивления и теплопередачи. Для

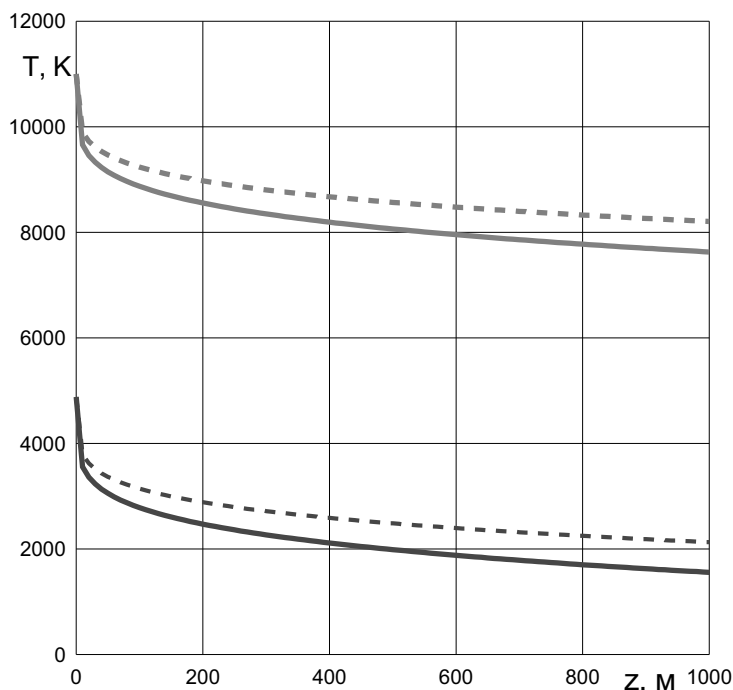


Рис. 1. Температура в облаке газа и паров для Челябинского события

светимости было получено [3, 4]

$$I = \tau \frac{\pi C_H \rho}{4Q} V_0^5 r_0^2 \left(1 + \frac{3}{8} C_D \frac{\rho V_0}{\delta} t \right)^{-5}$$

и далее были взяты интегральные соотношения для всего набора частиц

$$I_{\Sigma}(t) = \int_{m_*}^{M_0} N_{m_0} \frac{d}{dm_0} \left(-\tau \frac{V^2}{2} \frac{dm}{dt} \right) dm_0.$$

2. Вычисление температуры облака газа и частиц

Предполагается разрушение метеороида на множество фрагментов. После дробления фрагментов разрушенного тела за короткий промежуток времени (полета) некоторое количество газа (окружающего воздуха и паров тела) нагревается до высокой температуры. Кинетическая энергия движущихся частиц метеорного тела переходит в тепловую энергию объема газа, в котором происходит их движение

$$M_{\Sigma} \frac{V_0^2}{2} = c_V T \rho \Omega,$$

где Ω — объем газа, c_V — теплоемкость газа, T — температура газа, ρ — плотность газа,

M_{Σ} — масса осколков, V_0 — скорость в момент разрушения.

Доля кинетической энергии всего ансамбля частиц с распределением по размерам (1.1), переходящая в тепловую энергию газа будет

$$K = M_0 \frac{V_0^2}{2} - M_0 \int_0^1 \left[N(\bar{r}_0) \frac{d}{d\bar{r}_0} \left(\bar{m}(\bar{r}_0) \frac{\bar{V}^2(\bar{r}_0, z)}{2} \right) \right] d\bar{r}_0.$$

Проводя вычисления аналогично найденному в [4] для светимости и пренебрегая абляцией получаем

$$\frac{E}{M_0 \frac{V_0^2}{2}} = 1 - 6A \frac{z}{R} + 5 \left(A \frac{z}{R} \right)^{6/5} \Gamma \left(\frac{4}{5} \right) + O(B),$$

$$A = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho}{\delta}, \quad B = Az.$$

Отсюда находим температуру

$$T = - \frac{\frac{dE}{dz} dz}{C_V \rho \pi R_*^2 dz} = \frac{3 R^2 V_0^2 C_D}{2 R_*^2 C_V} \left(1 - A^{1/5} \Gamma \left(\frac{4}{5} \right) \left(\frac{z}{R} \right)^{1/5} \right).$$

На рис. 1 показана температура в облаке для основной вспышки челябинского события. Необходимые данные для вычислений были взяты из [8]. Верхние кривые соответствуют разрушению тела радиусом 9 м на высоте 23 км (штриховая линия) и 29 км (сплошная линия). Нижние кривые — тело радиусом 6 м в аналогичных условиях.

Заключение

Таким образом, полагая известным распределение фрагментов метеороида по массам после дробления, получена температура в облаке газа и частиц для конкретных условий Челябинского события. Высокая температура газа в таком облаке позволяет говорить о явлении «теплового взрыва», как и предлагается в [1, 5].

Литература

1. Попова О.П., Немчинов И.В. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // Катастрофические воздействия космических тел. / Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 92–117.
2. Ceplecha Z., Revelle D.O. Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. Т. 40. № 1. С. 35–54.
3. Egorova L., Lokhin V. On the mechanism of crushing meteoroid with end flash effect. EPSC // *Moon and Planets*. Т. 95. С. 303–319.
4. Егорова Л.А., Лохин В.В. О двустадийном разрушении метеороида с концевой вспышкой // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2016. № 4. С. 43–47.
5. Шувалов В.В., Светцов В.В., Трубецкая И.А. Оценка размера зоны разрушений, производимых на поверхности земли ударами астероидов размером 10–300 метров // *Астрон. вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 284.
6. Register P.J., Mathias D.L., Wheeler L.F. Asteroid fragmentation approaches for modeling

atmospheric energy deposition // *Icarus*. 2017. Т. 284. С. 157–166.

7. Немчинов И.В., Попова О.П., Тетерев А.В. Внедрение крупных метеороидов в атмосферу: теория и наблюдения (Обзор) // *Инж.-физ. журн.* 1999. Т. 72. С. 1233–1265.
8. Popova O.P. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. Т. 342. № 6162. С. 1069–1073.

References

1. Popova O., Nemchinov I. Bolides in the Earth atmosphere. In: *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer, Netherlands, 2008, pp. 131–162.
2. Ceplecha Z., Revelle D.O. Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, vol. 40, no. 1, pp. 35–54.
3. Egorova L., Lokhin V. On the mechanism of crushing meteoroid with end flash effect. EPSC. *Moon and Planets*, vol. 95, pp. 303–319.
4. Egorova L.A., Lokhin V.V. Two-stage destruction of a meteoroid with a final burst. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2016, vol. 71, no. 4, pp. 82–86.
5. Shuvalov V.V., Svetsov V.V., Trubetskaya I. A. An estimate for the size of the area of damage on the Earth's surface after impacts of 10–300-m asteroids. *Solar System Research*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 260–267.
6. Register P.J., Mathias D.L., Wheeler L.F. Asteroid fragmentation approaches for modeling atmospheric energy deposition. *Icarus*, 2017, vol. 284, pp. 157–166.
7. Nemchinov I. V., Popova O. P., Teterev A. V. Penetration of large meteoroids into the atmosphere: Theory and observations. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1999, vol. 72, no. 6, pp. 1194–1223.
8. Popova O. P. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 2013, vol. 342, no. 6162, pp. 1069–1073.