



ISSN 1607–2855

Том 7 • № 2 • 2011 С. 241 – 244

УДК 523.6+528.2

Тепловые взрывы кометных ядер в атмосфере Земли

В.Г. Кручиненко, К.И. Чурюмов, Т.К. Чурюмова, О.К. Мельник

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Показано, что взрыв метеороида над Средиземным морем в 2002 г. с большой вероятностью порожден кометным телом, начальная масса которого равна примерно $7 \cdot 10^8$ г. Это следует из определенной авторами работы [12] энергии вспышки, равной 26 кт ТНТ. Авторы полагают, что эта энергия относится к высоте максимального торможения. При скорости 20.3 км/с, принятой авторами, масса тела на этой высоте равна $5 \cdot 10^8$ г, а при входе в атмосферу она составляла приблизительно $7 \cdot 10^8$ г.

ТЕПЛОВІ ВИБУХИ КОМЕТНИХ ЯДЕР В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ, Кручиненко В.Г., Чурюмов К.І., Чурюмова Т.К., Мельник О.К. — Показано, що вибух метеороида над Середземним морем у 2002 р. з великою ймовірністю породжений кометним тілом, початкова маса якого дорівнює приблизно $7 \cdot 10^8$ г. Це впливає з певної авторами роботи [12] енергії спалаху, дорівнює 26 кт ТНТ. Автори вважають, що ця енергія відноситься до висоти максимального гальмування. При швидкості 20.3 км/с, прийнятої авторами, маса тіла на цій висоті дорівнює $5 \cdot 10^8$ г, а при вході в атмосферу вона становила приблизно $7 \cdot 10^8$ г.

THERMAL EXPLOSIONS OF COMETARY NUCLEI IN THE EARTH'S ATMOSPHERE, by Kruchinenko V.G., Churyumov K.I., Churyumova T.K., Melnik O.K. — It is shown that the meteoroid explosion over the Mediterranean is likely generated by a comet body, the initial mass equal to about $7 \cdot 10^8$ g. This follows from certain authors of [12] flare energy equal to 26 kilotons of TNT. The authors suggest that this energy refers to the height of maximum deceleration. At a speed of 20.3 km/s, adopted by the authors, body weight at this height is $5 \cdot 10^8$ g, and during re-entry, it was about $7 \cdot 10^8$ g.

Ключевые слова: динамика атмосферы Земли; взаимодействие с кометными ядрами.

Key words: dynamics of the Earth's atmosphere; interaction with cometary nuclei.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня известно уже значительное количество случаев взрыва крупных метеороидов в атмосфере Земли. Об этом свидетельствуют и данные регистраций болидов наземными установками [21, 22], и результаты измерений в атмосфере ярких световых вспышек фотодиодами корпорации «Sandia Laboratories», которые были установлены на геостационарных спутниках США [12, 19, 23], и также данные измерений акустически-гравитационных волн от тепловых взрывов метеороидов [20]. Для семи случаев падений метеороидов, яркие болиды которых наблюдались инструментально, определены точные топо-, гео- и гелиоцентрические орбиты: Příbram (Czechosl., Apr. 1959), Lost City (USA, Jan. 1970), Innisfree (Canada, Feb. 1977), Peekskill (USA, Oct. 1992), Tagish Lake (Canada, Jan. 2000), Moravka (Czech. Rep., May 2000), EN171101 (Ukraine, Nov. 2001).

На основании анализа данных таких феноменов, как Тунгусский, Сихотэ-Алинь, Стерлитамак и др. мы впервые [15] высказали предположение, что тепловые взрывы крупных метеороидов и, как следствие, вспышки блеска, происходят в области высот максимального торможения тел. Идея теплового взрыва на высоте максимального торможения была подтверждена нами при изучении разрушения фрагментов ядра кометы Шумейкер–Леви 9 в атмосфере Юпитера [15, 16]. При этом основным аргументом являлось хорошее согласие вычисленного из теоретической модели времени выхода Plume на «поверхность» Юпитера с данными прямых регистраций с космических аппаратов.

Независимым подтверждением полученной нами глубины взрыва кометного фрагмента диаметром 1 км в атмосфере Юпитера была работа [11]. В ней глубина взрыва определялась на основании совершенно иного подхода: из анализа результатов измерений излучения молекул, которые образованы при взрыве и вынесены в верхнюю атмосферу Юпитера.

Очевидно, высота максимального торможения метеороида определяется из условия равенства нулю второй производной скорости по времени. Иногда под областью максимального торможения неверно понимают область задержки метеороидного тела, которая соответствует равенству силы тяжести и силы аэродинамического сопротивления. При расчетах параметров на высоте максимального торможения возможны два варианта: мидель тела постоянен ($S = S_0 = \text{const}$), когда потерей массы при движении тела в атмосфере можно пренебречь, и $S \neq \text{const}$, когда мидель зависит от времени t или от высоты H . Первый случай используют при рассмотрении больших тел, для которых влияние атмосферы Земли минимально

и которые достигают поверхности нашей планеты практически без потери скорости и массы, либо для мелких метеорных частиц, так называемых микрометеоритов Уиппла [24, 25].

Нами разработана методика, которая позволяет получать все необходимые параметры метеороида и болида на высоте максимального торможения для случаев постоянного и переменного миделей [8]. На основании полученных закономерностей получено, что максимальная масса монолитного каменного тела, которое может достигать максимального торможения в пределах атмосферы Земли, составляет $10^8 \dots 10^9$ г. Максимальный диаметр тела составляет ≈ 8.6 м, а не 100 м, как считают авторы работы [14]. Максимальная масса железного метеороида составляет $2 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$ г. Метеороиды, массы которых превышают 10^9 г, будут иметь максимальные торможения ниже поверхности Земли (формально), а при падении будут образовывать взрывные кратеры [6].

2. О ТУНГУССКОМ ЯВЛЕНИИ

Поскольку продолжают появляться работы о Тунгусском феномене, порожденным монолитным телом (например, [13]), рассмотрим на основании полученной нами методики [8] возможность достижение таким телом высоты максимального торможения. Выберем наиболее вероятные значения основных исходных величин. Согласно анализу, проведенному в монографии [1], $m_0 = 2 \cdot 10^{12}$ г, $V_0 = 31$ км/с, $Z_R = 75^\circ$.

Наиболее уверенным параметром, повидимому, является высота взрыва, которую мы отождествляем с высотой максимального торможения, $H_* = 5.3$ км. Такая высота следует из работ [9, 10], где проведен анализ барограммы, зарегистрированной Потсдамским геофизическим институтом, на основании которого определена скорость распространения воздушной волны (317.9 м/с), обошедшей земной шар. Исходя из значения скорости, выведена высота взрыва. Здесь же [9] отмечено, что в точности такой же (318 м/с) оказалась скорость распространения взрывной волны, полученная Астаповичем и Уипплом по совокупности барограмм на различных станциях мира. Как пишет Фесенков [10], «только те волны могли обойти весь земной шар, которые продолжали двигаться на одной и той же высоте, равной высоте самого взрыва».

Из приведенных данных следует, что начальная энергия Тунгусского явления равна $9.6 \cdot 10^{17}$ Дж ≈ 230 Мт ТНТ. Важной характеристикой является величина энергии, которая выделилась при взрыве. На основании различных оценок она составляет приблизительно $4 \cdot 10^{16}$ Дж, то есть, если скорость на высоте H_* равна около 19 км/с, то масса уменьшилась приблизительно на порядок и стала равной $2 \cdot 10^{11}$ г. Использование приведенных выше зависимостей в предположении, что плотность метеороида изменяется в широких пределах, а именно от 1.0 г/см³ до 7.0 г/см³, приводит к однозначному результату: высота максимального торможения (высота взрыва) $H_* < 0$, то есть взрыв не мог произойти над поверхностью Земли и монолитное тело с такой массой образовало бы взрывной кратер по размеру близкому к Аризонскому. Если принять максимально возможные значения коэффициента абляции и высоты однородной атмосферы ($5.5 \cdot 10^{-12}$ с²/см², $8.0 \cdot 10^5$ см соответственно), то получим $H_* \approx 5.5$ км. Но это не реальный случай, поскольку из-за чрезвычайно высокого коэффициента абляции остаточная масса тела на высоте взрыва будет составлять всего от нескольких сот грамм до нескольких килограмм. Почти вся масса метеороида будет израсходована на пути до высоты H_* и никакого взрыва не произойдет. Поэтому, исходя из вышеизложенного, на основании модели монолитного тела при использовании приведенных параметров объяснить Тунгусское явление не представляется возможным. Видимо, только кометная модель может объяснить этот феномен. Известно, что высокие давления, действующие на лобовую поверхность космических тел в атмосфере Земли, намного превосходят прочность всех возможных материалов. Поэтому на высоте максимального торможения интенсивно дробятся любые тела, а рыхлые, кометные — тем более. Как показано в работе [3], раздробленный материал «растекается» и быстро тормозится, так что за очень короткое время его кинетическая энергия передается в небольшой объем воздуха перед телом, сжимая и нагревая его до нескольких десятков тысяч градусов. Последствия такого процесса — тепловой взрыв с мощностью, которая равна переданной кинетической энергии. Теория Григоряна [3] адекватно описывает Тунгусское явление.

В тоже время наличие неточных исходных параметров (m_0 , V_0 , Z_R) дает широкое поле для спекулятивных работ об этом уникальном феномене.

3. О ПРИТОКЕ НА ЗЕМЛЮ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ

В работе [12] приведены результаты обработки наблюдений вспышек крупных метеороидов в атмосфере Земли, полученные с помощью геостационарных спутников США. За 8.5 лет (с февраля 1994 по сентябрь 2002 г.) зарегистрировано 300 таких явлений. На основании данных оптических энергий этих болидов, принятых скорости их входа в атмосферу 20.3 км/с и плотности метеороидов 3 г/см³, получено распределение диаметров падающих тел. Принятая величина скорости близка к 21 км/с, которая следует из данных каталогов [17, 18] для тел, начальная масса которых не меньше 1 кг [7].

На этом основании в работе [12] выведено интегральное распределение диаметров тел, которое мы преобразовали в распределение масс:

$$\lg N_R = 7.146 - 0.90 \lg m, \tag{1}$$

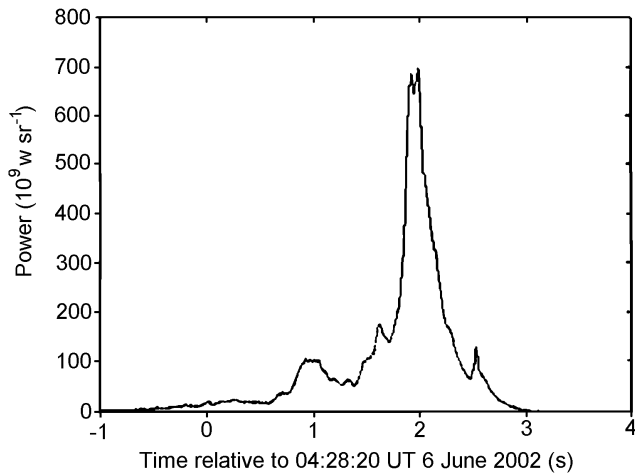


Рис. 1. Оптическая кривая болида 6 июня 2002 г. над Средиземным морем. Предполагаемое значение энергии этого события, которое определено на основе инфразвуковых/акустических данных, оценено в 26 кТ ТНТ (рис. 1 [12]).

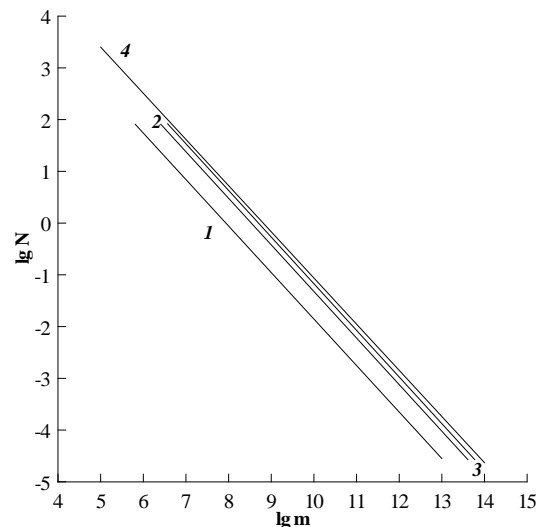


Рис. 2. Интегральные кривые притока космических тел. 1 — зависимость (1), полученная на основании данных работы [12], о распределении по диаметрам, 2 — результат первого приближения (3), 3 — результат второго приближения (4). 4 — обобщенная функция притока (2).

где N_R — поток тел с массами не меньше m (в граммах) за год на всю Землю. Из интервала наблюдаемых энергий $3.2 \cdot 10^{-2}$ кт... $5.0 \cdot 10^5$ кт следует интервал масс $6.5 \cdot 10^5$ г... $1.0 \cdot 10^{13}$ г. Сравнение зависимости (1) с обобщенной формулой, полученной нами [7]

$$\lg N_c = 7.86 - 0.892 \lg m, \quad (2)$$

показывает, что обе кривые почти не отличаются величиной наклона (или параметром, характеризующим распределение тел по массе), но имеется значительный сдвиг по ординате. Мы полагаем, что такое различие может быть связано с тем, что энергии вспышек (взрывов), которые происходят глубоко в атмосфере — на высотах максимальных торможений H_* — авторы приписывают энергиям тел при входе их в атмосферу.

Принимаем следующее первое приближение: все тела рассматриваемого интервала масс достигли высоты H и взорвались. Вся оставшаяся масса метеороида на высоте H_* ушла во вспышку. (Последнее возможно только в случае кометных тел). Если скорость при входе в атмосферу была 20.3 км/с, то при взрыве она будет равной приблизительно 12 км/с, масса тела станет равной $0.78m_0$. Тогда исправленный интервал начальных энергий будет: 0.13 кт... $2.0 \cdot 10^6$ кт, а интервал исправленных начальных масс: $2.6 \cdot 10^6$ г... $4.1 \cdot 10^{13}$ г. В этом случае интегральное распределение потока получим в виде:

$$\lg N'_R = 7.685 - 0.90 \lg m, \quad (3)$$

В зависимости (3) по сравнению с формулой (1) сдвиг по ординате уменьшился в 4 раза и она существенно приблизилась к (2) (см. рис. 2).

Среди наблюдаемых явлений имеются такие, начальные массы которых превышают 10^9 г. Исходя из предыдущих вычислений, мы утверждаем, что все полученные авторами работы [12] вспышки метеороидов, исправленные массы которых заключены в интервале 10^9 г... $4.1 \cdot 10^{13}$ г, вызваны кометными телами низкой плотности и поэтому полностью разрушающиеся на высотах H_* .

Другими словами, все вспышки, энергии которых превышают 20 кт, порождены кометными телами. Согласно приведенных зависимостей, в данной выборке их не больше двух. По крайней мере тот болид, который зарегистрирован 6 июля 2002 г. (см. рис. 2) над Средиземным морем и оценка его энергии составляет 26 кт, порожден кометным телом. При его обработке необходимо было бы принимать плотность тела 1 г/см^3 и большую начальную скорость ($\approx 30 \text{ км/с}$).

Согласно зависимости (2), наибольшее тело, которое падает на Землю в течение года, имеет массу $6.6 \cdot 10^8$ г. При начальной скорости 20.3 км/с такое тело не достигает высоты максимального торможения в пределах земной атмосферы, так как для него $H_* = -1.5$ км. При данной скорости граничное значение массы (при $H_* = 0$ км) равно $4 \cdot 10^8$ г. Если мы рассматриваем разрушение монолитных тел, то после вспышки (взрыва) на высоте H_* остается масса, которая составляет приблизительно $0.3m_0$. Последняя либо целиком, либо в раздробленном виде выпадает на поверхность Земли, образуя ударные кратеры.

Оценку неразрушенной после вспышки массы мы получили из данных о выпавших массах метеороидов Сихотэ-Алиня, Стерлитамака и Куня-Ургенч. До высоты максимального торможения расходуется масса приблизительно равная $0.2m_0$.

На этом основании рассмотрим второе приближение. Принимаем, что в наблюдаемых вспышках, образованных разрушением монолитных тел, расход массы составлял $0.5m_0$. При таком предположении нетрудно получить, что исправленный интервал энергий — кинетические энергии тел при входе в атмосферу — равен $0.18 \text{ кт} \dots 2.9 \cdot 10^6 \text{ кт}$; исправленный интервал начальных масс составляет $3.7 \cdot 10^6 \text{ г} \dots 5.9 \cdot 10^{13} \text{ г}$, а интегральную функцию потока метеороидов получим в виде:

$$\lg N_R'' = 7.828 - 0.90 \lg m, \quad (4)$$

После такой процедуры полученная функция (4) практически совпадает с выведенной нами интегральной зависимостью (2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы полагают, что взрыв метеороида над Средиземным морем 6 июня 2002 г. с большой вероятностью порожден кометным телом, начальная масса которого равна примерно $7 \cdot 10^8 \text{ г}$. Это следует из определенной авторами работы [12] энергии вспышки, равной 26 кт ТНТ. Мы считаем, что эта энергия относится к высоте максимального торможения. При скорости 20.3 км/с, принятой авторами, масса тела на этой высоте равна $5 \cdot 10^8 \text{ г}$, а при входе в атмосферу она составляла приблизительно $7 \cdot 10^8 \text{ г}$.

1. *Бронштэн В.А.* Тунгусский метеорит: история исследования. — М.: А.Д.Сельянов, 2000. — 311 с.
2. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наукова Думка, 1989. — 294 с.
3. *Григорян С.С.* О движении и разрушении метеороидов в атмосферах планет // Космич. исслед. — 1979. — **17**, № 6. — С. 875–893.
4. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966. — 688 с.
5. *Компанеец А.С.* Точечный взрыв в неоднородной атмосфере // ДАН СССР. — 1960. — **130**, № 5. — С. 1001–1003.
6. *Кручиненко В.Г.* Метеоритные кратеры на поверхности Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2000. — **16**, № 6. — С. 507–518.
7. *Кручиненко В.Г.* Приток космических тел на Землю в широком интервале масс // Кинематика и физика небес. тел. — 2002. — **18**, № 2. — С. 114–127.
8. *Кручиненко В.Г.* Тепловые взрывы метеороидов в атмосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2004. — **20**, № 3. — С. 269–282.
9. *Фесенков В.Г.* О воздушной волне, произведенной падением Тунгусского метеорита 1908 г. // Метеоритика. — 1959. — **17**. — С. 3–7.
10. *Фесенков В.Г.* О кометной природе Тунгусского метеорита // Астрон. журн. — 1961. — **38**, № 4. — С. 577–592.
11. *Berezhnoi A.A., Shevchenko V.V., Klumov B.A., Fortov V.E.* Collision of a comet with Jupiter: Determination of fragment penetration depths the molecular spectra // Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1996. — **63**, № 6. — P. 387–391. (1996 American Institute of Physics. [S0021-3640(96)00106-5]).
12. *Brown P., Spalding R.E., ReVelle D.O., et al.* The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. — 2002. — **420**. — P. 314–316.
13. *Foschini L.* A solution for the Tunguska event // Astron. and Astrophys. — 1999. — **342**. — P. L1–L4.
14. *Hills J.G., Goda P.* Damage from the impacts of small asteroids // Planet Space Sci. — 1998. — **46**. — P. 219–229.
15. *Kruchinenko V.G.* The Explosion in the Jupiter Atmosphere // Proc. of European SL/Jupiter Workshop / Eds.: by R. West and H. Boehnhard. — 1995. — P. 287–292.
16. *Kruchinenko V.G.* The collision of the comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter // Astron. and Astrophys. Transactions. — 1997. — **13**. — P. 191–197.
17. *McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A.* Prairie network fireball data. I. Summary and orbits // Center for Astrophysics. Prep. Ser. — 1976. — № 665. — 13 p.
18. *McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A.* Prairie network fireball data. II. Trajectories and light curves // Center for Astrophysics. Prep. Ser. — 1977. — № 721. — 61 p.
19. *Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B., et al.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus. — 1997. — **130**, № 2. — P. 259–274.
20. *ReVelle D.O.* Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // Near-Earth Objects / Ed. Remo J. Annals of the New York Academy of Sciences. — 1997. — **822**. — P. 284–302.
21. *Spurny P.* Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993 — 1996 // Planetary and Space Science / Spec. Issue: Asteroids, Comets, Meteors 1996-I. — 1997. — **45**, № 5. — P. 541–555.
22. *Spurny P., Porubčan V.* The EN171101 — the deepest ever photographed fireball // Proc. of Asteroids, Comets, Meteors (ACM 2002). 29 Juli — 2 August 2002. Technical University Berlin. Germany (ESA-500). — Nov. 2002. — P. 269–272.
23. *Tagliaferri E.* Satellite Observations of Large Meteoroid Impacts // Report at “Workshop on Satellite Observation of Meteoroid Impacts into the Atmosphere”, Sandia National Laboratories. — May 1995. Albuquerque.
24. *Whipple F.L.* The theory of micro-meteorites. Part I. In an isothermal atmosphere // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer. — 1950. — **36**, № 12. — P. 686–695.
25. *Whipple F.L.* The theory of micro-meteorites. Part II. In heterothermal atmospheres // Proc. Nat. Acad. Sci. Amer. — 1951. — **37**, № 1. — P. 19–29.

Поступила в редакцию 24.10.2011