

УДК 523.68

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СВЕТЯЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА, НАБЛЮДАВШЕГОСЯ В РАЙОНЕ САНТЯГО-ДЕ-КОМПОСТЕЛА 18 ЯНВАРЯ 1994 ГОДА

© 2024 г. В. В. Светцов*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: svetsov@idg.ras.ru*

Светящийся объект, который наблюдался в Испании в окрестности Сантьяго-де-Компостела 18 января 1994 г. и был описан очевидцами, имел характерные особенности, которые не согласуются с типичным полетом болида в атмосфере. А именно, объект двигался на высотах от ~ 26 до ~ 3 км под углом 18° к поверхности Земли с низкой скоростью 1–3 км/с, причем его свечение было ярким. Обоснованных объяснений это явление не получило. В данной работе проведены оценки возможных процессов и параметров космического тела, падение которого могло вызвать это событие. Предложен сценарий, в котором каменный астероид размером несколько метров входит в атмосферу с минимальной скоростью ~ 11.2 км/с. Торможение тела до 3 км/с на высоте ~ 26 км происходит за счет его распада на фрагменты и постепенного увеличения площади поперечного сечения роя фрагментов, как в известных панкейк-моделях. Затем происходит коллимация фрагментов в одну или несколько цепочек, благодаря чему они преодолевают сопротивление атмосферы на своем пути длиной около 75 км и тормозятся до скорости ~ 1 км/с лишь на высоте 3 км. Свечение обусловлено тепловым излучением с поверхности многочисленных фрагментов, разогретых до температуры около температуры солидуса. Предложенный для объяснения события механизм коллимации фрагментов требует дальнейшего обоснования и изучения.

Ключевые слова: болид, торможение в атмосфере, фрагментация метеороида, коллимация, свечение.

Для цитирования: Светцов В.В. Оценки параметров светящегося объекта, наблюдавшегося в районе Сантьяго-де-Компостела 18 января 1994 года // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 4. С. 22–32. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_4_22

Введение

18 января 1994 г. за 45 минут до восхода солнца (8:15 по местному времени) на северо-западе Испании на ясном небе наблюдался светящийся объект, который довольно медленно двигался по пологой траектории с северо-востока на юго-запад. Опрос очевидцев и другие исследования этого события показали его необычные особенности [Docobo et al., 1998]. На основании наиболее надежных показаний десяти очевидцев из 34 удалось реконструировать траекторию объекта. На рис. 1 показана карта северо-запада Испании с проекцией траектории и положениями очевидцев, построенными по координатам, приведенным в статье [Docobo et al., 1998]. Начало наблюдаемой траектории соответствовало высоте 25.7 ± 1.7 км, а последняя точка – высоте 2.6 ± 0.8 км. Наклон траектории к горизонтالي составил $18^\circ \pm 3^\circ$. Те, кто смог наблюдать большой участок траектории, сообщали, что объект двигался медленно, и они следили за ним около минуты, пока он не скрылся за горизонтом. Скорость светящегося объекта оценивалась в пределах 1–3 км/с, что, наряду с низкой высотой свечения, было весьма необычно по сравнению с типичными болидами.

Было также обнаружено еще одно происшествие, возможно, связанное с наблюдаемым объектом. Вблизи пересечения продолжения видимой траектории с поверхностью Земли около деревни Кандо была обнаружена выемка в грунте размером 29×13 м и глубиной 1.5 м. Выемка была образована на склоне холма, поросшего соснами высотой более 20 м, вырванными и переброшенными через участок нетронутой почвы на расстояние 50–100 м вниз по склону холма. Жители Кандо сообщали,

что событие произошло в середине января (точная дата не известна), когда шли дожди, что обычно для этой части Испании. Но выброс деревьев и грунта вверх мало похож на оползень. Хотя оползень нельзя полностью исключить, создается впечатление какого-то другого события с большой энергией. Никаких следов метеоритного вещества не было найдено, а сейсмические датчики в Сантьяго-де-Компостела 17 января не действовали. Более удаленные датчики на расстояниях менее 150 км не зарегистрировали ничего необычного.

Такие особенности, как медленное движение светящегося объекта, отсутствие конечной яркой вспышки, звуков и ударных волн, характерных для крупных болидов, достигающих низких высот, заставило Docobo et al. (1998) отвергнуть возможность падения космического тела. Они предложили гипотезу, по которой событие в Кандо было обусловлено выбросом газа из глубины через образовавшуюся трещину. Газ распространился вверх, где турбулентность вызвала разделение электрических зарядов, пробой и зажигание газа. Горение вызвало увеличение проводимости и распространение вниз горячей области, подпитываемой атмосферным электричеством. Ее-то и наблюдали очевидцы. Гипотеза весьма странная и ничем не обоснованная. Между тем никаких дальнейших исследований событий, произошедших в окрестности Сантьяго-де-Компостела, не проводилось.

За последние 30 лет был достигнут определенный прогресс в понимании метеорных процессов, хотя их многие особенности пока не вполне ясны. Цель данной работы заключалась в обосновании возможности объяснения описанных явлений в окрестности Сантьяго-де-Компостела падением космического тела.

Светящаяся область

Очевидцы, в зависимости от их местоположения, оценивали угловой размер светящегося объекта (СО) от размера футбольного мяча, как он видится с трибуны стадиона ($\sim 10'$ [Docobo et al., 1998]), до размера сравнимого с Луной ($\sim 31'$). Так очевидец № 2 (см. рис. 1) сообщал, что видимый размер был почти равным полной Луне, причем с небольшим хвостом. Более удаленный очевидец № 10 оценивал размер объекта намного меньше Луны, но больше «обычной падающей звезды». Очевидец № 5 видел объект с наиболее близкого расстояния – около 13 км. Предположив, что он видел угловой размер объекта равным Луне, получим, что диаметр светящейся области равен 113 м. Допустим, что наиболее удаленные наблюдатели №№ 8 и 10 видели объект с расстояния 50 км с угловым размером $10'$. Тогда размер СО составил бы 145 м. Таким образом, простая, но, конечно, грубая оценка дает размер СО в пределах 100–150 м.

Оценить температуру СО гораздо сложнее из-за отсутствия регистрации. Очевидцы №№ 2 и 10 сообщали, что объект был очень ярким. № 2 воспринял цвет СО как красноватый в центре с переходом к желтому по краям. А очевидцу № 10, который наблюдал СО в течение 5–6 секунд, цвет СО в конце траектории показался зеленоватым. По-видимому, объект на близком расстоянии был по яркости сравнимым с Луной или, может быть, ярче Луны, которая имеет видимую звездную величину -12.7 . Предположим, что объект радиусом r излучает как черное тело с температурой T , причем в видимом диапазоне содержится лишь часть f_ϵ от потока излучения во всем спектре. Тогда видимую звездную величину на расстоянии L от наблюдателя можно определить по формуле

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_\epsilon \sigma T^4 r^2}{L^2 q_0} \right), \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, а q_0 – фактор преобразования плотности потока излучения в звездную величину. Для панхроматического диапазона длин волн шириной 340 нм, примерно соответствующего видимому диапазону, $q_0 = 8.7 \times 10^{-9}$ Вт/м² [Popova et al., 2013]. При радиусе r от 50 до 75 м и $L = 13$ км яркость, равная лунной, достигается при температурах 1350–1400° К (f_ϵ от 1.5×10^{-4} до 2.4×10^{-4}).

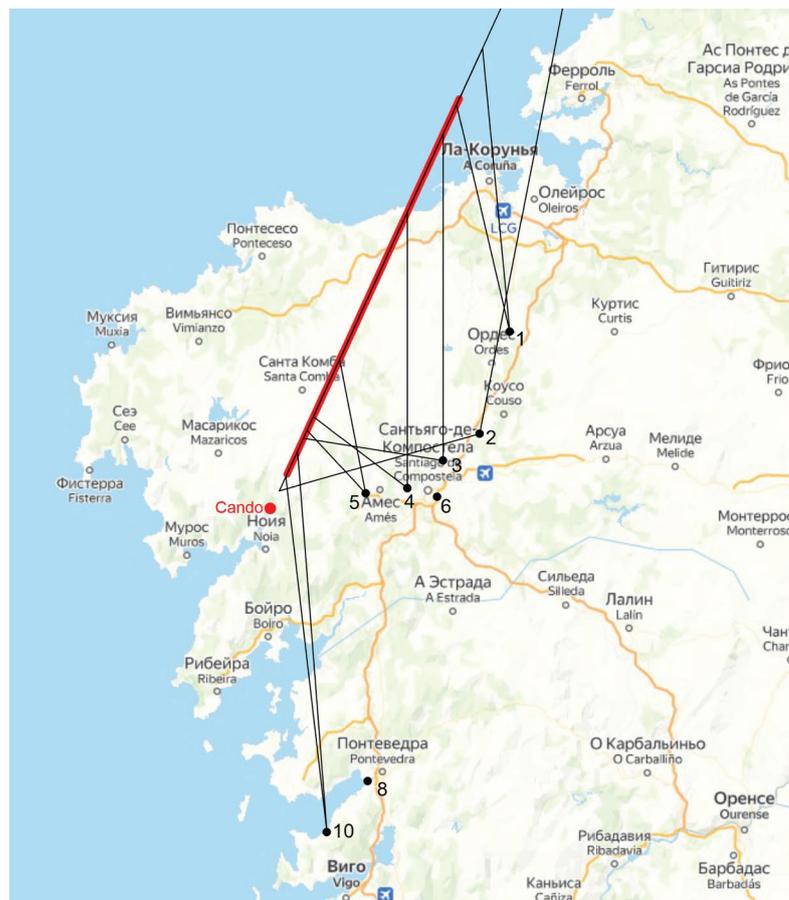


Рис. 1. Положения очевидцев полета светящегося объекта 18 января 1994 г. и проекция его траектории на карте Галиции. Восстановленная по показаниям наблюдателей видимая часть траектории показана красной линией. Объект летел с северо-востока на юго-запад. Места очевидцев показаны черными кружками. Их номера соответствуют работе [Docobo et al., 1998]. Линии, идущие от пункта наблюдения к траектории, показывают какую часть траектории заметил наблюдатель. В пунктах 6 и 8 эти линии не построены, чтобы не загромождать рисунок. Красным кружком показано положение деревни Кандо, где произошло событие, похожее на удар, возможно, связанное с падением объекта

Можно попытаться оценить температуру объекта и по его цвету. Поверхность лавы имеет золотисто-желтый цвет при температуре 1360°K , приобретает оранжевый при температуре 1170°K и красный при 970°K [Kilburn, 2000]. Цвет железа при нагревании от 1000°K до 1400°K изменяется от светло-красного до светло-желтого и становится ослепительно белым при температуре больше 1500°K . Таким образом, яркостная температура СО могла находиться в пределах $1000^\circ\text{--}1400^\circ\text{K}$. Этот интервал температур граничит с температурой солидуса обыкновенных хондритов $\sim 1375^\circ\text{K}$ [McCoy et al., 2006; Scheinberg et al., 2015].

Торможение объекта на больших высотах

Движение объекта, которое наблюдали очевидцы, совсем не характерно для падения метеороида. Действительно, на высоте 26 км он уже имел скорость 3 км/с, то есть, будучи космическим телом должен был сильно затормозиться и выделить более 90% своей энергии. А в более плотных слоях атмосферы до высоты ~ 3 км продолжал движение с небольшой скоростью 1–3 км/с и светился. Уравнения движения объекта в атмосфере можно записать следующим образом:

$$m \frac{dV}{dt} = -C_d \rho V^2 S, \quad \frac{dz}{dt} = -V \sin \vartheta, \quad (2)$$

где V – скорость, m – масса, S – площадь поперечного сечения объекта, t – время, C_d – коэффициент сопротивления, ρ – плотность воздуха на высоте z , ϑ – угол наклона траектории к горизонтали. Объект может быть как сплошным телом, так и роем фрагментов, объединенных одной головной ударной волной. В экспоненциальной атмосфере решение уравнений (2) при постоянной S можно записать так:

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{C_d(\rho - \rho_0)H}{\rho_m d \sin \vartheta}\right), \quad d = \frac{m}{S\rho_m}, \quad (3)$$

где V_0 – скорость в начале траектории, ρ_0 – плотность воздуха в начале траектории, H – высота однородной атмосферы, ρ_m – плотность тела и его фрагментов. Здесь d – эффективный размер объекта, который в случае сплошного тела порядка его диаметра, а в случае роя фрагментов или сильно деформированного тела может быть значительно меньше его размера. Пусть $V_0 = 11.2$ км/с, $\rho_0 = 0$, $H = 7$ км, $C_d = 0.5$, $\rho_m = 3000$ кг/м³, $\vartheta = 18^\circ$. Тогда, чтобы тело затормозилось до скорости 3 км/с на высоте 26 км ($\rho = 0.034$ кг/м³), оно должно иметь небольшой размер $d \approx 10$ см. А чтобы тело снизило скорость от 3 км/с на высоте 26 км до 1 км/с на высоте 3 км ($\rho = 0.90$ кг/м³), размер d должен быть значительно больше – около 3 м.

На довольно больших высотах торможение крупных метеороидов происходит из-за фрагментации. За счет перепада давления вдоль фронта головной ударной волны лидирующие фрагменты разрушенного тела приобретают скорости в направлениях перпендикулярных траектории и разлетаются, площадь поперечного сечения объекта увеличивается, и рой фрагментов тормозится значительно быстрее неразрушенного метеороида. Для описания движения совокупности фрагментов как единого объекта существует ряд полуаналитических моделей [Григорян, 1979; Hills, Goda, 1993; Chyba et al., 1993; Avramenko et al., 2014], в которых приближенно учитывается увеличение диаметра роя фрагментов. Разлет фрагментов и ускоренное торможение получались и при численном моделировании полета разрушенного тела в атмосфере, часто в предположении отсутствия прочности, путем решения уравнений гидродинамики [Шувалов и др., 2016; Shuvalov et al., 2017].

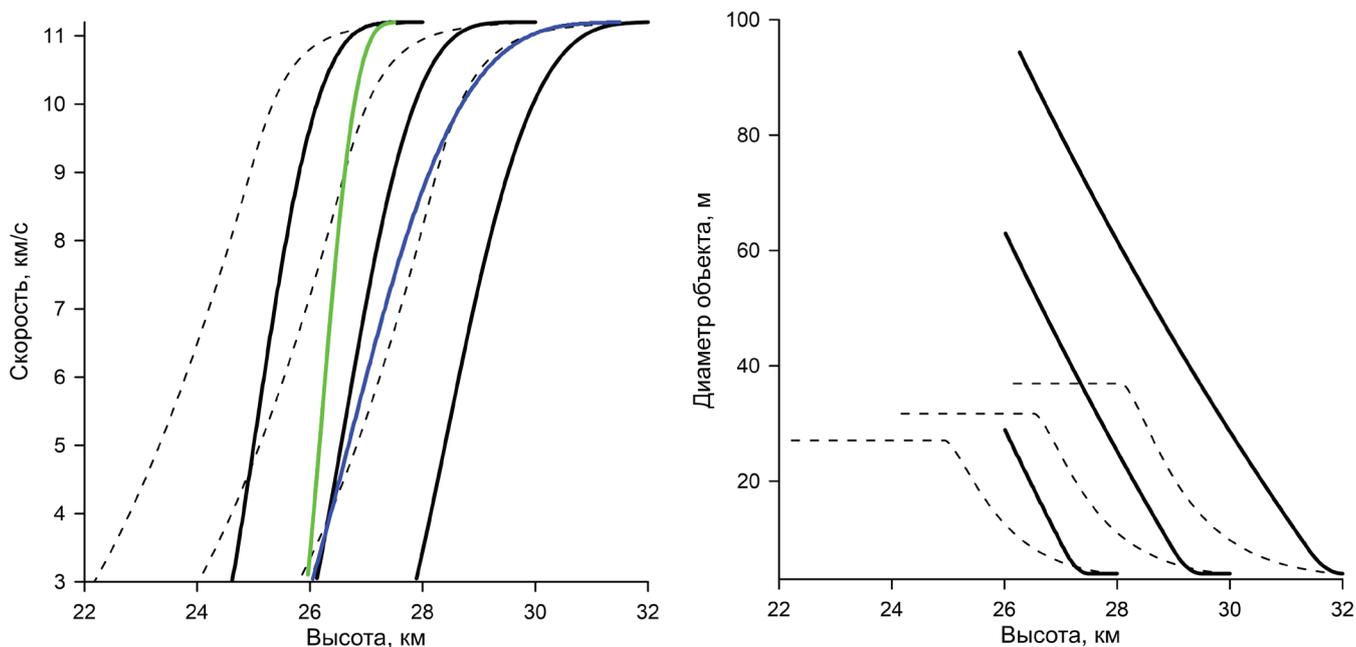


Рис. 2. Зависимости скорости и диаметра объекта от высоты по панкейк-моделям [Григорян и др., 2013] (сплошные линии) и [Avramenko et al., 2014] (штриховые линии). Показаны варианты, в которых тела разрушаются на высотах 28, 30 и 32 км. Черные линии соответствуют начальному диаметру объекта 4 м, зеленая – диаметру 2 м, синяя – 6 м. Плотность тел 3000 кг/м³, начальная скорость 11.2 км/с, угол входа в атмосферу 18°

Полуаналитические модели, несмотря на ряд недостатков, позволяют довольно просто оценить изменение скорости вдоль траектории. На рис. 2 показана зависимость скорости от высоты для тел диаметром 2, 4 и 6 м с использованием моделей [Григорян и др., 2013] и [Avramenko et al., 2014]. Предполагается, что тело имеет плотность 3000 кг/м^3 , входит в атмосферу со скоростью $V_0 = 11.2 \text{ км/с}$ под углом 18° и разрушается на множество фрагментов на некоторой высоте z_0 , которая варьировалась. По модели Григоряна тела диаметром 2, 4 и 6 м тормозятся на высоте 26 км до скорости 3 км/с, если подобрать высоту разрушения равной 28, 30 и 32 км соответственно. При заданном размере 4 м высота торможения до скорости 3 км/с уменьшается с уменьшением z_0 . Модель Avramenko et al. (2014) дает немного другие результаты. Тело диаметром 4 м тормозится до 3 км/с на высоте 26 км, если разрушение происходит на высоте 32 км, на 2 км выше, чем по модели Григоряна и др. (2013). Модели дают увеличение радиуса объекта при торможении, как показано на рис. 2. По модели Григоряна и др. (2013) диаметр объекта увеличивается примерно в 15 раз. В модели Avramenko et al. (2014) в определенный момент на той высоте, где скоростной напор ρV^2 становится меньше его величины в момент разрушения, рост диаметра прекращается. Таким образом, полуаналитические модели позволяют объяснить торможение объекта до 3 км/с на больших высотах за счет фрагментации.

Эффект коллимации

Наряду с механизмом увеличения площади сечения существует и противоположный эффект коллимации, когда фрагменты внутри роя приобретают скорости, направленные к центру роя, и сходятся, образуя в центре длинную цепочку. Этот эффект был получен в экспериментах, в которых стеклянная или алюминиевая сфера размером $\sim 0.6 \text{ см}$, пробивая тонкую пленку, разрушалась на многочисленные мелкие осколки, которые со скоростями 3–5 км/с влетали в камеру, заполненную аргоном или воздухом [Schultz, Gault, 1992; Schultz, 1992; 2008; Schultz, Sugita, 1994]. Если в камере был вакуум, фрагменты разлетались инерционно с максимальной скоростью 200–300 м/с. При наличии газа с низким давлением, например, воздуха при давлении 0.125 бар, кластер фрагментов расширялся еще больше за счет взаимодействия их ударных волн и тормозился. При повышении давления до 1 бара наблюдался обратный эффект коллимации – фрагменты объединялись и выстраивались за одним лидирующим фрагментом, что значительно снижало торможение [Schultz, Sugita, 1994]. Эффект зависит от размеров осколков, которые в экспериментах были меньше 0.05 см [Schultz, Gault, 1992]. Как объяснялось в этой работе, если осколок летящий в кластере фрагментов, окруженных одной ударной волной, достаточно мал и имеет относительно небольшую скорость, то его количества движения в поперечном направлении недостаточно для преодоления градиента давления за фронтом ударной волны, создаваемой кластером или лидирующими более крупными фрагментами. Он приобретает скорость по направлению к следу или движется вдоль фронта волны, приближаясь к лидирующему фрагменту.

Перенос по подобию результаты экспериментов на разрушенное тело диаметром 6 м, получим, что при давлении 0.125 бар на высоте 15 км фрагменты размером 0.5 м будут разлетаться, а на меньших высотах при давлении больше 0.5 бар – соединяться в один объект, если начальная скорость разлета фрагментов такая же, как в эксперименте. Но эта скорость существенно ниже при торможении космического тела. Согласно оценкам [Schultz, Sugita, 1994] при заданной скорости разлета и плотности газа существует ограничение на размер фрагментов, которое состоит в том, что отношение диаметра фрагмента d_f к толщине головной ударной волны Δ должно быть меньше определенной величины: $d_f/\Delta < \varepsilon$. Оценка была приведена для параметров атмосферы у поверхности Земли и Марса. Плотности воздуха на высотах 26 и 30 км составляют 0.034 и 0.019 кг/м³ соответственно, они близки к плотности атмосферы Марса у его поверхности. Скорости разлета фрагментов в атмосфере можно оценить как $U = V(\rho/\rho_m)^{1/2}$ [Григорян, 1979; Melosh, 1981]. Если на высоте 30 км $V = 11.2 \text{ км/с}$, то $U = 29 \text{ м/с}$, а при скорости $V = 3 \text{ км/с}$ на высоте 26 км $U = 10 \text{ м/с}$. Из графика работы [Schultz, Sugita, 1994] для плотности атмосферы Марса следует, что при $U = 29 \text{ м/с}$ $\varepsilon \approx 1$, а при $U = 10 \text{ м/с}$ $\varepsilon \approx 7$. Толщина ударно-сжатого

слоя перед сферическим телом диаметром D приближенно равна $\Delta = 0.4D\rho/\rho_s = 0.027D$ (ρ_s – плотность воздуха, сжатого за фронтом ударной волны). Для метеороида диаметром 4 м на высоте 30 км это дает условие коллимации $d_f < 0.11$ м. То есть, если это тело раздробится на высоте 30 км на фрагменты размером $d_f \geq 10$ см, то они начнут расходиться. Заметим, что в случае рассматриваемого события фрагменты не могли быть значительно больше, так как не могли бы затормозиться до высоты 26 км. На высоте 26 км при скорости $V = 3$ км/с $\Delta = 0.046D$, и поэтому для таких же фрагментов размером менее 0.1 м условие коллимации $d_f < 0.32D$ будет выполнено даже для $D = 4$ м, а размер облака фрагментов существенно больше начального диаметра тела.

Как может происходить процесс коллимации из облака фрагментов в один компактный объект и в какой момент остается неопределенным. Такие исследования не проводились. Путем численного моделирования изучалась лишь коллимация двух сравнимых по размеру тел [Artem'eva, Shuvalov, 1996; Барри, 2010; Лукашенко, 2020]. Если фрагменты на высотах около 26 км объединялись в одно тело размером несколько метров, то остается неясным, почему размер светящейся области был большим, порядка 100 м. Возможно, что при коллимации образуется несколько удаленных друг от друга кластеров, вокруг которых летят более мелкие фрагменты, как это наблюдалось в экспериментах [Schultz, 1992].

Свечение воздуха и нагрев фрагментов

Зная скорость объекта, можно по соотношениям Гюгонио и уравнению состояния воздуха [Кузнецов, 1965] определить температуру и плотность за фронтом головной ударной волны T_s . А оценив толщину ударно-сжатого слоя, можно оценить и потоки излучения с помощью таблиц коэффициентов поглощения [Авилова и др., 1970; Churchill et al., 1966]. Поток излучения в определенном спектральном диапазоне, выходящий из ударно-сжатого слоя размером Δ , равен

$$q_\varepsilon = f_\varepsilon(T_s)\sigma T_s^4(1 - \exp(-k_\varepsilon\Delta)), \quad (4)$$

где k_ε – средний коэффициент поглощения, а $f_\varepsilon(T)$ – часть потока излучения черного тела, которая заключена в выбранном спектральном диапазоне. Если оптическая толщина $k_\varepsilon\Delta$ не очень велика, то яркостная температура T_e меньше T_s . Ее можно определить из соотношения

$$f_\varepsilon(T_e)\sigma T_e^4 = q_\varepsilon. \quad (5)$$

На рис. 3 (слева) показана зависимость температуры за фронтом головной ударной волны у сферического тела с начальным диаметром 4 м от высоты. Предполагается, что тело на высоте 30 км теряет прочность и дальше движется в виде роя фрагментов в соответствии с моделью Григоряна и др. (2013), как показано на рис. 2. На рис. 3 также показаны яркостные температуры, вычисленные для двух интервалов энергий квантов: 1.53–2.12 эВ (585–808 нм, от красного до желтого света) и 2.12–3.12 эВ (397–585 нм, от желтого до фиолетового). Яркостные температуры малы на больших высотах из-за малых значений k_ε . Они растут по мере внедрения тела в более плотные слои атмосферы и соответственного увеличения k_ε . После фрагментации рост яркостных температур усиливается благодаря росту радиуса объекта, но затем температуры падают, так как объект тормозится до 3 км/с на высоте 26 км.

На рис. 3 (справа) показано также изменение температур для другого воображаемого случая в предположении, что объект диаметром 10, 60 или 100 м снижается, равномерно уменьшая свою скорость от 3 км/с на высоте 26 км до 1 км/с на высоте 3 км. При всех диаметрах яркостная температура в красном свете становится ниже 1000° К, когда скорость тела падает до ~ 1.7 км/с на высоте ~ 10 км. В действительности это максимальная оценка яркостной температуры. Температура и плотность воздуха в большей части течения меньше, чем за фронтом головной ударной волны. То есть излучение воздуха не может обеспечить свечение объекта с яркостью, достаточной для объяснения наблюдений, а основной вклад в излучение должны давать нагретые фрагменты космического тела.

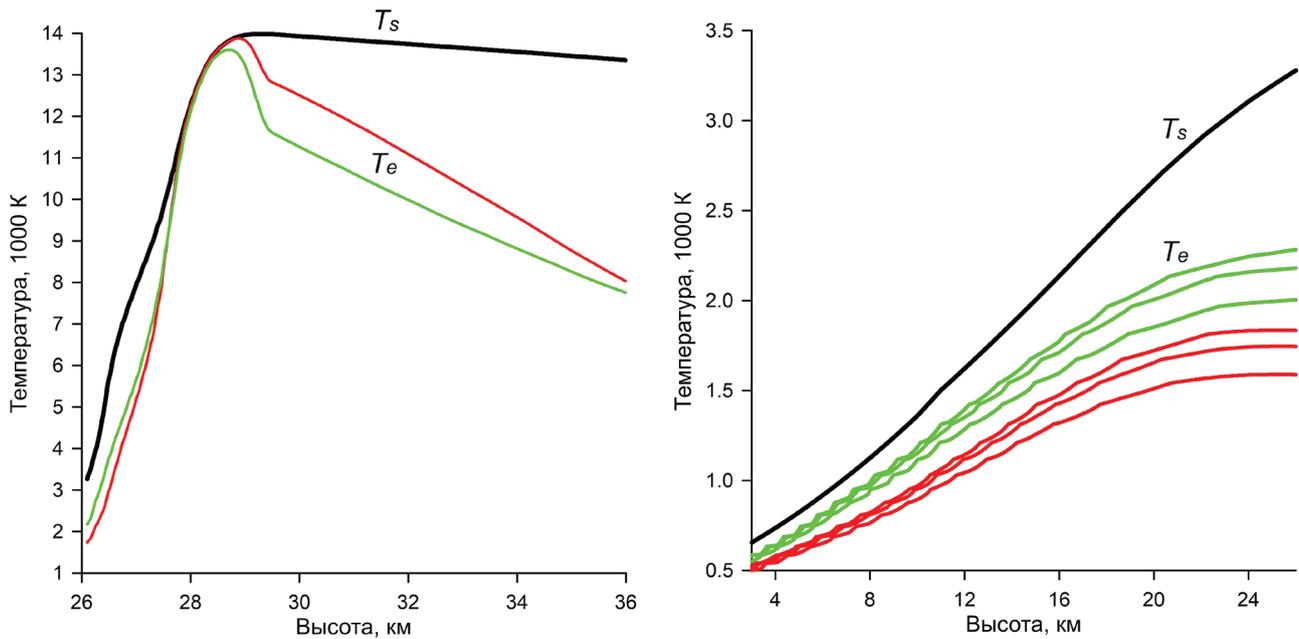


Рис. 3. Температуры за фронтом головной ударной волны (T_s) и яркостные температуры (T_e) в зависимости от высоты полета объекта. Яркостные температуры вычислены для двух интервалов энергий квантов: 1.53–2.12 эВ (изображены красным цветом) и 2.12–3.12 эВ (зеленым цветом). Левый график соответствует движению тела диаметром 4 м в предположении, что на высоте 29.5 км оно теряет прочность и дальше движется в виде роя фрагментов по модели [Григорян и др., 2013], теряя скорость, как показано на рис. 2. На правом графике показано изменение температур в предположении, что тело с неизменным диаметром 10, 60 или 100 м снижается, равномерно уменьшая скорость от 3 км/с на высоте 26 км до 1 км/с на высоте 3 км. Величина T_s не зависит от диаметра, а яркостные температуры тем меньше, чем меньше тело

Поток излучения из ударно-сжатого слоя в сторону тела вызывает испарение его поверхности или лидирующих фрагментов. Этот поток q равен

$$q = \sigma T_s^4 (1 - \exp(-k_p \Delta)), \quad (6)$$

где k_p – планковский коэффициент поглощения. Интенсивность испарения в единицах толщины испаряемого вещества в единицу времени можно оценить по соотношению:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{q}{\rho_m Q}, \quad (7)$$

где Q – удельная теплота испарения. Интегрируя (7) по времени, можно попытаться определить толщину испаренной массы h . Она оказывается большой, около 4.5 см для тела диаметром 4 м, если начинать интегрирование с момента разрушения. Но при этом не учитывается экранировка излучения парами. Более точно можно оценить поток на поверхности и определить толщину испаренного вещества, используя коэффициент теплопередачи C_h :

$$q = 0.5 C_h \rho V^3. \quad (8)$$

Величина C_h на высотах ниже 30 км составляет не более 0.01 [Nemchinov et al., 1997; Johnston et al., 2018]. Поэтому толщина слоя испаренного вещества фрагментов оказывается менее 0.5 см. Испарение прекращается при торможении до скорости ~ 5 км/с. Но поверхность фрагментов, окруженных горячим воздухом, будет поддерживаться достаточно высокой за счет теплопроводности и может быть частично расплавленной, если температура воздуха выше температуры солидуса. Простая оценка толщины прогретого слоя δ за время t сводится к формуле $\delta = (\alpha t)^{1/2}$, где α – коэффициент

температуропроводности. При значениях $\alpha \sim 1 \text{ мм}^2/\text{с}$, характерных для Н-хондритов [Soini et al., 2020], за время 30 с прогревается слой около 5 мм. При снижении скорости от 3 до 1 км/с поверхность фрагментов, вероятно, остается нагретой, что обеспечивает свечение объекта.

Обсуждение результатов оценок

Итак, для объяснения события, наблюдаемого в районе Сантьяго-де-Компостела, можно предложить следующий сценарий. Каменный астероид диаметром несколько метров, например, 4 м, войдя в атмосферу под углом 18° с низкой космической скоростью, разрушился на высоте около 30 км на фрагменты размером порядка 10 см. Разлет осколков под действием перепада давления в поперечном направлении привел к ускоренному торможению роя осколков на высотах около 25 км. При снижении скорости роя до нескольких километров в секунду сложились условия для коллимации фрагментов, что привело к существенному замедлению торможения объекта. Свечение объекта вплоть до высоты $\sim 1 \text{ км}$ осуществлялось за счет излучения с поверхности многочисленных фрагментов, разогретой до температур порядка температуры солидуса и ниже, а в начале и за счет излучения воздуха, нагретого в ударной волне.

Начальная скорость астероида выбрана минимальной: 11.2 км/с, чтобы не происходило сильного испарения фрагментов в процессе их разлета. Размер астероида в несколько метров подходит для быстрого торможения фрагментов на нужной высоте и для последующего осуществления их коллимации и медленного торможения. Размер астероида не может быть существенно больше, так как не было замечено каких-либо опасных последствий падения. Начальная кинетическая энергия астероида диаметром 4 м с плотностью 3000 кг/м^3 составляет 1.5 кт ТНТ, что в триста тридцать раз меньше энергии астероида в челябинском событии около 500 кт. Челябинский астероид имел размер около 19 м, скорость при входе в атмосферу 19 км/с и угол наклона траектории к горизонтали, как и в испанском событии, около 18° [Brown et al., 2013; Popova et al., 2013].

Астероиды с энергией 1.5 кт падают на Землю в среднем 2–3 раза в год [Brown et al., 2013]. Скорость 11.2 км/с редка, но со скоростью около 13 км/с астероиды входят в атмосферу наиболее часто [Ivanov, 2008]. То есть, такие падения довольно обычны. Начало фрагментации на высоте 30 км соответствует прочности (ρV^2) 2.5 МПа, что также вполне обычно для метеороидов с составом обычных хондритов [Borovička et al., 2020]. Но в типичных случаях фрагментации астероидов размером несколько метров и меньше образуется несколько отдельных фрагментов, которые летят независимо друг от друга и могут затем снова распасться на независимые фрагменты. Это находит отражение в успешном применении к конкретным падениям астероидов таких моделей как полуэмпирическая модель фрагментации, модель прогрессивной фрагментации, гибридная модель, которые включают описание движения отдельных фрагментов в атмосфере [Popova et al., 2019; Borovička et al., 2020]. Но при независимом движении у фрагментов нет шансов объединиться и продолжать движение в плотных слоях атмосферы со скоростью достаточно высокой, чтобы обеспечить свечение объекта. Поэтому предлагаемый сценарий необычен тем, что небольшой астероид распадается сразу на большое число мелких фрагментов, причем таких размеров, чтобы потом осуществилась коллимация. Такой астероид не подпадает под описание той категории метеороидов (обыкновенных хондритов), которая соответствует его прочности и описана в работе [Borovička et al., 2020]. Возможно, он состоял из сцементированных осколков от столкновений астероидов, хотя для этой категории метеороидов [Borovička et al., 2020] предполагают более низкую прочность. Более низкая прочность присуща и углистым хондритам, яркий пример которых представляет собой астероид Sutter's Mill размером 2–4 м с энергией 4 кт ТНТ, разрушившийся на фрагменты на высоте 48 км [Jenniskens et al., 2012]. Но разрушение гипотетического астероида Сантьяго-де-Компостела на столь большой высоте, вероятно, не позволило бы осуществиться коллимации.

Наиболее слабым местом предлагаемого сценария является коллимация, которая требует дальнейшего изучения. Критерий осуществления коллимации, данный в [Schultz, Sugita, 1994]

эмпирически, требует надежного обоснования. К тому же условия экспериментов [Schultz, Sugita, 1994] существенно отличаются от условий коллимации осколков астероида в предлагаемом варианте. Кроме того, следует учитывать, что на поздней стадии полета сила тяжести искривит траекторию, а панкейк-модели не вполне надежны и не позволяют определить расположение фрагментов. Удар около деревни Кандо, вырвавший деревья, мог быть вызван струей воздуха диаметром в десятки метров, достигшей поверхности Земли, когда фрагменты уже полностью затормозились. Но давать оценки такого процесса преждевременно. Сначала необходимо построить достаточно надежную модель полета светящегося объекта. А для математического моделирования требуется разработка соответствующих методов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900176-3).

Список литературы

- Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С., Замалин В.М., Кобзев Г.А., Лагарьков А.Н., Мнацаканян А.Х., Норман Г.Э. Оптические свойства горячего воздуха. М. : Наука. 1970. – 320 с.
- Барри Н.Г. Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* 2010. Т. 44. № 1. С. 59–64. <https://www.elibrary.ru/kzldz>
- Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космические исследования.* 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
- Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибодов С.И. Челябинский суперболид: к физике взрыва // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* 2013. Т. 47. № 4. С. 292–298. <https://doi.org/10.7868/S0320930X13040178>
- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М. : Машиностроение. 1965. – 463 с.
- Лукашенко В.Т. Влияние эффекта коллимации на динамику двух осколков метеорного тела одного размера // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2020. № 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1994>
- Шувалов В.В., Попова О.П., Светцов В.В., Трубецкая И.А., Глазачев Д.О. Определение высоты метеорного взрыва // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы.* 2016. Т. 50. № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.7868/S0320930X16010059>
- Artem'eva N.A., Shuvalov V.V. Interaction of shock waves during the passage of a disrupted meteoroid through the atmosphere // *Shock Waves.* 1996. Vol. 5. P. 359–367. <https://doi.org/10.1007/BF02434011>
- Avramenko M.I., Glazyrin I.V., Ionov G.V., Karpeev A.V. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2014. Vol. 119. P. 7035–7050. <https://doi.org/10.1002/2013JD021028>
- Borovička J., Spurný P., Šrbený L. Two strength of ordinary chondritic meteoroids as derived from their atmospheric fragmentation modeling // *Astronomical Journal.* 2020. Vol. 160 (1). P. 42. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9608>
- Brown P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature.* 2013. Vol. 503 (7475). P. 238–241. <https://doi.org/10.1038/nature12741>
- Churchill D.R., Armstrong B.H., Johnston R.R., Müller K.G. Absorption coefficients of heated air: A tabulation to 24 000°K // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 1966. Vol. 6. P. 371–442. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(66\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0022-4073(66)90008-2)
- Chyba C.F., Thomas P.J., Zahnle K.J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature.* 1993. Vol. 361 (6407). P. 40–44. <https://doi.org/10.1038/361040a0>
- Docobo J.A., Spalding R.E., Ceplecha Z., Diaz-Fierros F., Tamazian V., Onda Y. Investigation of a bright flying object over northwest Spain, 1994 January 18 // *Meteoritics and Planetary Science.* 1998. Vol. 33 (1). P. 57–64. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1998.tb01607.x>
- Hills J.H., Goda M.H. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astronomical Journal.* 1993. Vol. 105 (3). P. 1114–1144. <https://doi.org/10.1086/116499>
- Ivanov B.A. Size-frequency distribution of asteroids and impact craters: Estimates of impact rate. In: V. Adushkin,

- I. Nemtchinov (Eds), Catastrophic events caused by cosmic objects. Dordrecht, Springer. 2008. P. 91–116. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6452-4_2
- Jenniskens P. and 69 co-authors.* Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia // *Science*. 2012. Vol. 338. P. 1583–1587. <https://doi.org/10.1126/science.1227163>
- Johnston C.O., Stern E.C., Wheeler L.F.* Radiative heating of large meteoroids during atmospheric entry // *Icarus*. 2018. Vol. 309. P. 25–44. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.02.026>
- Kilburn C.R.J.* Lava flows and flow fields. In: H. Sigurdsson (Ed), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego. 2000. P. 291–305.
- McCoy T.J., Mittlefehldt D.W., Wilson L.* Asteroid differentiation. In: D.S. Laretta, H.Y. McSween Jr. (Eds), *Meteorites and the Early Solar System II*. Univ. of Arizona, Tucson. 2006. P. 733–745.
- Melosh H.J.* Atmospheric breakup of terrestrial impactors. In: P.H. Schultz, R.B. Merrill (Eds), *Multi-ring basins: Formation and evolution: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*, New York and Oxford, Pergamon Press. 1981. P. 29–35. <https://adsabs.harvard.edu/full/1981mrbf.conf...29M>
- Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.V., Golub' A.P., Popova O.P., Shuvalov V.V.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // *Icarus*. 1997. Vol. 130. P. 259 – 274. <https://doi.org/10.1006/icar.1997.5821>
- Popova O.P. and 59 co-authors.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. Vol. 342 (6162). P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1242642>
- Popova O., Borovička J., Campbell-Brown M.D.* Modelling the entry of meteoroids. In: G.O. Ryabova, D.J. Asher, M.D. Campbell-Brown (Eds), *Meteoroids*. Cambridge University Press. 2019. P. 9–36.
- Scheinberg A., Fu R.R., Elkins-Tanton L.T., Weiss B.P.* Asteroid differentiation: Melting and large-scale structure. In: P. Michel, F.E. DeMeo, W.F. Bottke (Eds), *Asteroids IV*. University of Arizona, Tucson. 2015. P. 533–552. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch028
- Schultz P.H.* Atmospheric effects on ejecta emplacement and crater formation on Venus from Magellan // *Journal of Geophysical Research*. 1992. Vol. 97 (E10). P. 16183–16248. <https://doi.org/10.1029/92JE00613>
- Schultz P.H., Gault D.E.* On surviving atmospheric entry: Lunar and Planetary Science Conference XXIII. LPI, Houston, TX. 1992. P. 1235–1236. <https://adsabs.harvard.edu/full/1992LPI....23.1235S>
- Schultz P.H., Sugita S.* Penetrating and escaping the atmospheres of Venus and Earth: Lunar and Planetary Science Conference XXV. LPI, Houston, TX. 1994. P. 1215–1216. <https://adsabs.harvard.edu/full/1994LPI....25.1215S>
- Schultz P.H.* «Needle model» for surviving entry: Implications of the Carancas impact. Abstracts ACM, Baltimore. 2008. Abstract 8342. <https://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8342.pdf>
- Shuvalov V., Svetsov V., Popova O., Glazachev D.* Numerical model of the Chelyabinsk meteoroid as a strengthless object // *Planetary and Space Science*. 2017. Vol. 147. P. 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.05.011>
- Soini A.-J., Kukkonen I.T., Kohout T., Luttinen A.* Thermal and porosity properties of meteorites: A compilation of published data and new measurements // *Meteoritics and Planetary Science*. 2020. Vol. 55 (2). P. 402–425. <https://doi.org/10.1111/maps.13441>

ASSESSMENTS OF PARAMETERS OF A LUMINOUS OBJECT OBSERVED IN THE AREA OF SANTIAGO DE COMPOSTELA ON JANUARY 18, 1994

© 2024 V. V. Svetsov*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: svetsov@idg.ras.ru*

A luminous object observed in Spain in the vicinity of Santiago de Compostela on January 18, 1994 and described by eyewitnesses had characteristic features that are inconsistent with the typical flight of a bolide in the atmosphere. Namely, the object was moving at altitudes from ~ 26 to ~ 3 km at an angle of 18° to the Earth's surface with a low speed of 1–3 km/s, and its glow was bright. This phenomenon has not received a reasonable explanation. In this paper, estimates are made of the possible processes and parameters of the cosmic body whose fall could have caused this event. A scenario is proposed in which a stony asteroid several meters in size enters the atmosphere with the minimum speed of ~ 11.2 km/s. The body decelerates to 3 km/s at an altitude of ~ 26 km due to its disintegration into fragments and a gradual increase in the cross-sectional area of the fragment swarm, as in the well-known pancake models. Then the fragments collimate into one or more chains, due to which they overcome atmospheric resistance on their path of about 75 km and slow down to a speed of ~ 1 km/s only at an altitude of 3 km. The glow is caused by thermal radiation from the surface of numerous fragments heated to a temperature close to the solidus temperature. The mechanism of fragment collimation proposed to explain the event requires further substantiation and study.

Keywords: bolide, deceleration in atmosphere, meteoroid fragmentation, collimation, radiation.