

Параметры Челябинского и Тунгусского объектов и характеристики вызванных ими взрывов

Ю. И. Лобановский

Shut up and calculate!

R. Feynman

Краткое содержание

В работе кратко описана математическая модель, связывающая параметры движения небесных тел как в сфере действия Солнца, так и в сфере действия Земли, с массо-энергетическими характеристиками этих тел и с характеристиками взрывов, вызванных их разрушением в атмосфере, которые, в свою очередь, увязываются с наблюдающимися при этом на подстилающей поверхности явлениями. Эта модель была применена для расчета характеристик объектов во время Челябинского и Тунгусского инцидентов. Таким образом, путем регулярной физико-математической процедуры без каких-либо умозрительных гипотез и/или предположений были получены основные данные, характеризующие эти более чем примечательные явления.

Оказалось, что размер Челябинского объекта был равен почти 200 метрам, а его масса была близка к 2 мегатоннам. Энергия его взрыва составила 58 мегатонн в тротиловом эквиваленте. Минимальный размер Тунгусского объекта оказался равен 115 м, масса – 0.4 мегатонны, а энергия взрыва – около 14.5 мегатонн. Показана общность происхождения этих двух небесных тел, являвшихся кометными обломками. Проведена критика ошибочных, но общепринятых сейчас представлений о Челябинском инциденте и вызвавшем его объекте.

Ключевые слова: Челябинский метеорит – Тунгусский метеорит – комета – обломок – орбита – траектория – взрыв – высота – энергия – эпицентр – ударная волна – давление – расстояние

Таблица символов

v – скорость
ρ – плотность
p – давление
D – диаметр
L – удаление
m – масса
E – энергия
r_p – перигелий
i – угол наклона плоскости орбиты
z – высота траектории
h – приведенная высота
H – высота взрыва
α, β – статистические весовые коэффициенты
δ – угол входа
φ – азимутальный угол
ξ – безразмерный параметр
c – константа
Δ – символ разности
< > – символ осреднения

Индексы

0 – начальный
f – конечный

I. Введение

Как известно, утром 15 февраля 2013 года, примерно в 9:20:30 в окрестностях Челябинска вблизи точки с координатами примерно 54.85° северной широты и 61.20° восточной долготы на значительной высоте произошел взрыв некоего объекта, двигавшегося по пологой траектории с очень высокой скоростью. Эта точка расположена приблизительно в 35 километрах к юго-юго-западу от центра Челябинска, в качестве которого принята площадь Ленина. Данный объект сейчас принято называть Челябинским (Русским) метеоритом или метеороидом (Chelyabinsk Meteoroid or Russian Meteor) [1]. Солнечное время в эпицентре взрыва на тот момент составляло 7:25:20, то есть было раннее зимнее утро.

На обширной территории, простирающейся от городов Златоуста на западе от Челябинска, до Троицка на юге и до села Миасского на северо-востоке, зафиксированы повреждения зданий, выбитые стекла и двери [2]. Всего в инциденте пострадало 1613 человек, большинство из них – от выбитых стекол. Госпитализации подверглось по разным данным от 40 до 112 человек, двое пострадавших были помещены в реанимацию. Такого количества пострадавших от падения объекта из космоса в историческое время зарегистрировано еще не было [1]. Расстояния от эпицентра взрыва до крайних точек зоны зафиксированных разрушений, как минимум, превышают 70 км, а до Златоуста и Троицка они составляют не менее 90 км. Это означает, что перепад давления, создаваемый ударной волной от взрыва на расстоянии 90 км от его эпицентра, был около 5 кПа (килопаскалей), что сразу же свидетельствует об энергии взрыва в десятки мегатонн в тротиловом эквиваленте (подробнее этот тезис разбирается и обосновывается в разделе IV данной статьи).

Неподалеку от эпицентра взрыва находится город Коркино, на городском рынке которого, в точке с координатами 54.89° северной широты и 61.40° восточной долготы, на расстоянии от 13.5 до 14 км от эпицентра было заснято чрезвычайно показательное видео [3]. По запаздыванию звука взрыва от вспышки на 89.5 секунд с учетом распределения температур по высоте зимней атмосферы [4] и превышения скорости ударной волны взрыва над скоростью звука [5] было определено, что наклонная дальность до центра взрыва составила 28.9 км. По движению тени на видео от вертикально стоящей мачты был сделан вывод о том, что в момент вспышки длина тени мачты стремилась к 0.55 от ее высоты, что приводит к высоте точки взрыва над землей 25 – 25.5 км.

На рис. 1 показана проекция траектории объекта и оси разлета его осколков на земную поверхность на завершающей стадии этого инцидента. Азимут траектории в стандартной геодезической системе координат примерно равен 75.5° . Это означает, что объект двигался в целом с востока на запад, отклоняясь к северу на 14.5° (практически та же самая линия изображена в Википедии в качестве наиболее вероятной траектории [1]). Большая черная точка – это эпицентр взрыва. В середине полупрозрачного квадрата, расположенного рядом с эпицентром, лежит точка, равноудаленная на 90 км от ближайших к ней районов городов Златоуста и Троицка, где были зафиксированы разрушения. Следует также упомянуть, что в Южноуральске (на расстоянии от 45 до 50 км от эпицентра) ударной волной были выбиты цеховые ворота, которыми был сильно травмирован человек. Там же из дымоходов в дома вдувалась сажа [6], что также говорит о значительном повышении давления в момент прохождения ударной волны.

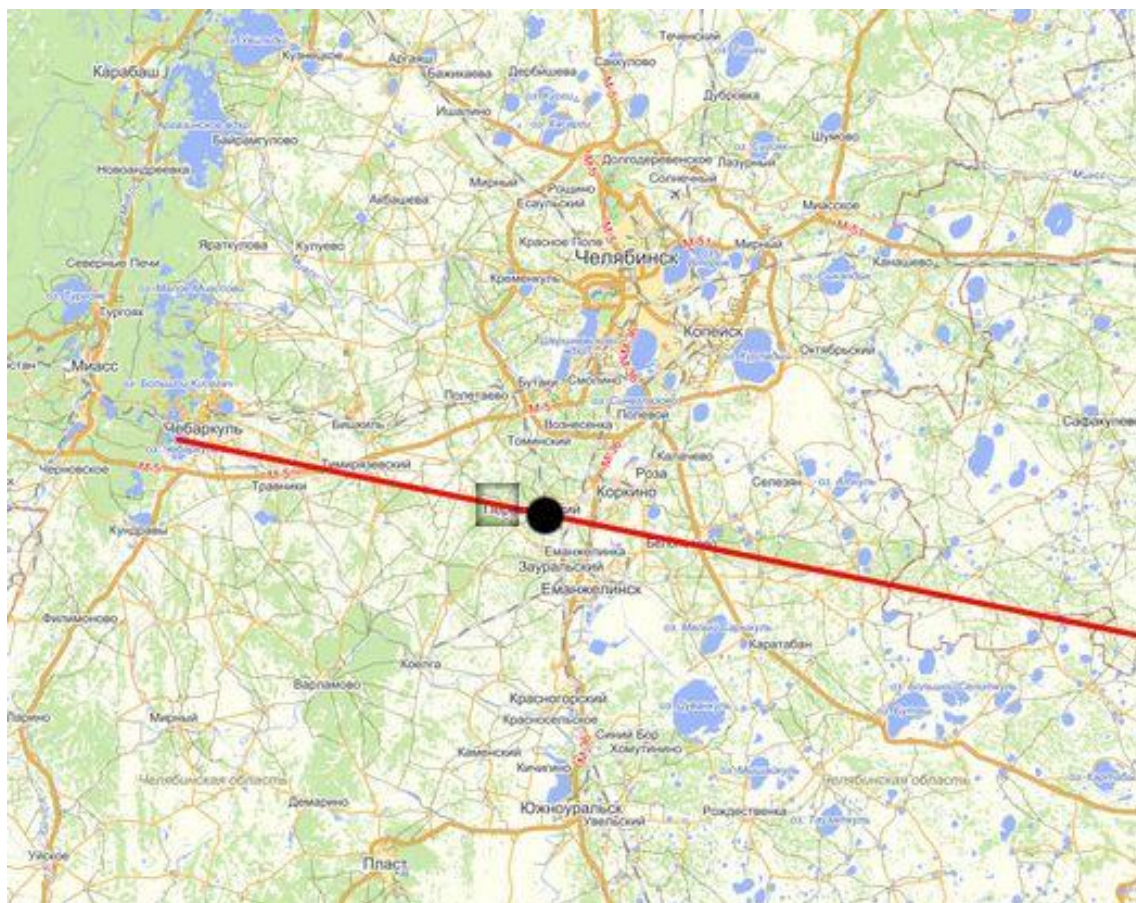


Рис. 1

II. Орбиты Челябинского и Тунгусского объектов

В течение нескольких дней после инцидента были приведены данные трех независимых групп исследователей, определивших параметры орбиты Челябинского объекта до столкновения с Землей, см. 3 первые строки таблицы 1 (не считая строки заголовков). Линейные размеры (величины афелия, перигелия и большой полуоси) измеряются в астрономических единицах (в средних расстояниях от Земли до Солнца), угол наклона плоскости орбиты объекта к плоскости эклиптики – в градусах. Данные третьей группы [9] в первоисточнике приведены со значительными разбросами, и в таблице представлены только средние величины параметров орбиты по их оценкам. Значения угла восхождения (который однозначно определяется моментом столкновения объекта с Землей) и угла периапсиса здесь не обсуждаются, поэтому в таблице не приведены.

Таблица 1

Авторы и вариант данных	Афелий	Перигелий	Большая полуось	Наклонение i (°)	Период обращения
Cooke [7]	2.43	0.81	1.62	–	–
Luutinen [8]	2.53	0.80	1.665	4.05	–
Zuluaga, Ferrin [9]	2.64	0.82	1.73	3.45	–
Средний	2.533	0.810	1.672	–	2.162
Расчетный базовый	2.549	0.800	1.674	3.05	2.167

Так как в данном случае, как и в большинстве аналогичных, расчеты орбиты базируются на случайных и не слишком надежных наблюдениях, ее параметры определены весьма приближенно. При этом «внутренние» отличия от средних значений в результатах третьей группы оказались еще большими. На рис. 2 представлена проекция орбиты объекта на плоскость эклиптики, иллюстрирующая этот факт, где сплошной линией показана средняя орбита, параметры которой показаны в таблице 1, а пунктиром – крайние варианты, приводимые в источнике [9]. Однако, несмотря на все это, с некоторой долей определенности можно заключить, что орбита объекта почти компланарна плоскости эклиптики. Можно также ожидать, что средние значения параметров орбиты (по данным всех 3 групп), представленные в четвертой строке таблицы 1, не будут значительно отличаться от реальных. Тем не менее, для каких-либо определенных выводов, связанных с рассмотрением этой орбиты, нужно привлекать дополнительные эмпирические данные общего характера.

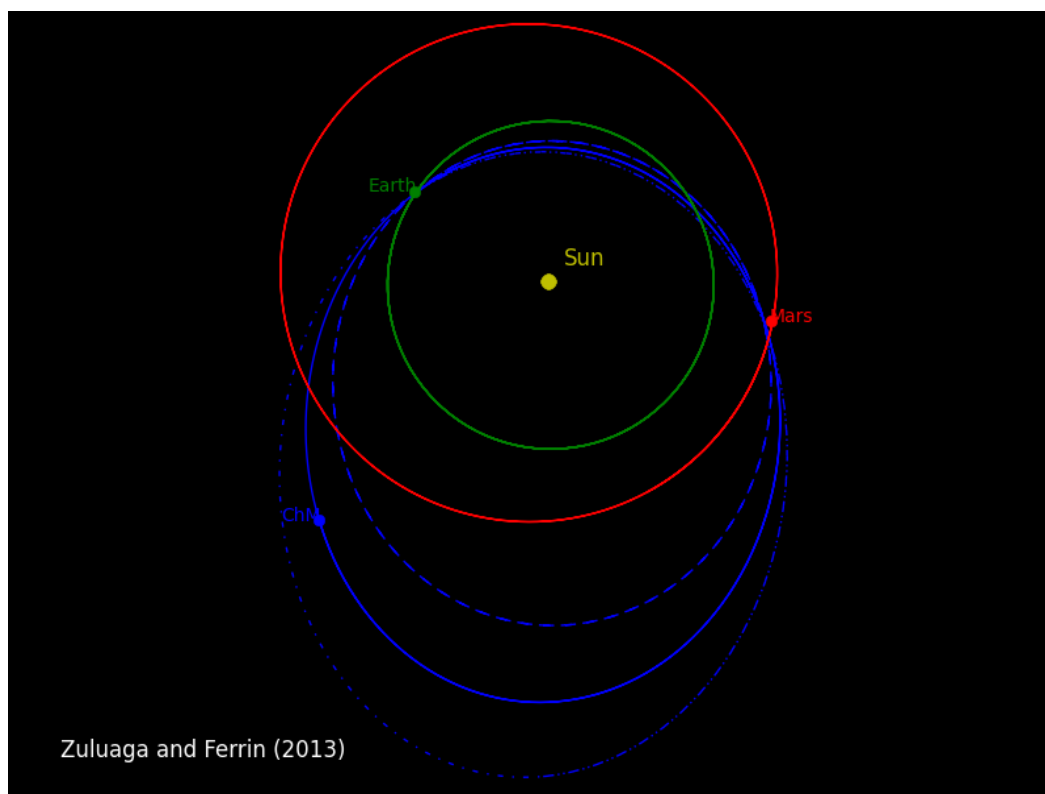


Рис. 2

Сразу обращает внимание то, что среднее значение периода обращения объекта по этим данным всего на 0.2 % отличается от величины 2.1667 года. Это означает, что Челябинский объект с высокой степенью вероятности находился в резонансе 13:6 с Землей, то есть периоды обращения объекта и Земли соотносились как целые числа 13 и 6. Таким образом, раз в 13 лет, совершив 6 оборотов вокруг Солнца, объект снова и снова сближался с Землей, пока не столкнулся с ней. При этом, несмотря на то что, как будет показано далее, его размер на порядок превышал минимальный размер обнаруживаемых в околоземном пространстве объектов, он не был зафиксирован системами слежения за космическим пространством.

Утверждение о резонансном характере орбиты объекта может изначально показаться недостаточно обоснованным, однако известно несколько астероидов, находящихся в орбитальном резонансе с Землей, например, Круитни (Cruithne) [10] и Йорп (YORP) [11], и, так как они имеют собственные имена, то являются довольно крупными. Известно также, что существуют спин-орбитальные резонансы между Землей и Луной, а также Землей и Венерой [12] и даже Землей и Меркурием [13]. Более полувека назад была составлена таблица, в которой все планеты Солнечной системы с точностью до 1 % находятся в орбитальных резонансах между собой [13]. Так что резонансные орбиты – это не астрономическая экзотика, а, скорее, правило. Как известно, еще Лаплас объяснил резонансность орбит спутников Юпитера воздействием приливных сил. Но интересующие нас здесь планетно-метеоритные резонансы приливная теория, по-видимому, объяснить не может.

Однако, это есть эмпирически достоверный эффект, самым очевидным проявлением которого является то, что метеорные потоки регулярно, раз в год или раз в несколько лет, вторгаются в атмосферу Земли. И таких потоков астрономами было зарегистрировано около 1000. Правда, после создания автоматизированных средств наблюдения за небом число их сократилось за счет отсеивания метеорных потоков, бывших, видимо, только в воображении астрономов, их придумавших, как когда-то и каналы на Марсе. И на текущий момент подтверждено существование только 64 из них, а еще более 300 ожидают подтверждения [14]. Те потоки, частицы которых сосредоточены по всей орбите, например, Персеиды, пересекаются с Землей каждый год. Другие, как, например, Леониды, у которых частицы сконцентрированы на одном из участков орбиты, попадают в атмосферу Земли раз в несколько лет [15]. Но, тем не менее, раз подобные встречи периодически повторяются, все эти, видимо, сотни метеорных потоков вращаются вокруг Солнца по резонансным с Землей орбитам.

Более того, Челябинский объект столкнулся с Землей во время его второго сближения, когда он, пройдя перигелий, уже удалялся от Солнца (см. на рис. 2 на пересечении орбит точку слева от Солнца, подписанную Earth). Поэтому с учетом сдвига времени на полгода с момента первого пересечения плоскостей орбит этого объекта и Земли (когда, в принципе, только и возможно столкновение), разница во времени между столкновением 30 июня 1908 года, как считается сейчас, самого крупного Тунгусского объекта, и последним инцидентом составляет 104 года, то есть ровно 8 периодов по 13 лет. Имеющееся различие в 1.5 месяца между 30 июня и серединой августа – временем первого пересечения Челябинским объектом плоскости эклиптики, легко объясняется небольшой естественной разницей орбит этих объектов, в первую очередь в наклонениях. Следовательно, есть все основания полагать, что орбиты этих двух небесных тел были близки. Используя это положение, можно получить дополнительную информацию об обоих небесных телах и о том, как они закончили свое существование. Кроме того, достаточно очевидно, что если таких объектов больше одного, то их должно быть много, но этот вопрос рассмотрен в другой работе автора на эту тему.

III. Расчетная модель

После предварительного анализа имеющейся информации, кратко описанной в двух первых разделах статьи, была построена математическая модель, связывающая параметры движения объектов, подобных рассматриваемому, как в сфере действия Солнца, так и в сфере действия Земли, с их массо-энергетическими характеристиками. Последние, в свою очередь, с помощью программного модуля расчета воздушных взрывов космических объектов и/или их столкновений с земной или водной поверхностью [16], были увязаны с наблюдавшимися во время Челябинского инцидента явлениями.

Алгоритмы, заложенные в модуль расчета взрывов и столкновений, довольно подробно описаны в источнике [17]. Модель расчета параметров движения космических тел – достаточно традиционная. При заданной орбите объекта и известной орбите Земли, которая из-за ее очень малого эксцентриситета для простоты считается круговой, из законов сохранения энергии и момента импульса определяются параметры движения объекта по эллиптической орбите вокруг Солнца в любой ее точке. Затем из геометрических соображений вычисляются углы и модули скорости в солнцезенитической системе координат. Далее, когда объект сближается с Землей, происходит переход к расчету его движения в сфере действия Земли. При этом то, что является точкой в масштабах Солнечной системы, оказывается бесконечным пространством в

масштабах околоземного космического пространства, и решения в разных системах координат сшиваются через геометрические соотношения и типовые для подобных механических задач пересчеты скорости и энергии. Принципы, на которых основывается такой асимптотический подход к описанию движения тел в центральных полях тяготения, изложены, например, в книге [18]. Подобный подход ранее уже использовался автором в работе [19].

При переходе к рассмотрению движения объекта в гравитационном поле Земли возникает проблема вычисления так называемого прицельного расстояния – длины перпендикуляра, проведенного из вектора землентрической скорости объекта на параллельную ему линию, проходящую через центр Земли (см. [18]). Этот параметр, определяющий движение объекта относительно Земли, может быть вычислен при известных географических координатах точки, в которой заканчивается его полет и ракурсе траектории этого полета. Для этого нужно дважды провести вращения исходной земной системы географических координат. Первое вращение производится для учета наклона оси вращения Земли по отношению к плоскости траектории объекта. Второе вращение выполняется так, чтобы плоскость траектории объекта оказалась в плоскости экватора этой новой системы координат. Тогда задача пространственного движения объекта около Земли переходит в задачу о его плоском гиперболическом движении, которое описывается только через один угловой параметр – азимутальный угол φ . Так как существуют 2 ветви гиперболы, имеется 2 набора углов, обеспечивающих второй поворот системы координат. Однако, из условия того, что точка взрыва находится ближе к перигею, чем точка входа, выбирается единственное решение, отвечающее условиям задачи.

После этого остается только проблема учета влияния атмосферы Земли на движение объекта в финальной части его траектории. Она имеет практическое значение только при малых углах входа объекта в атмосферу и, соответственно, при относительно длинных атмосферных участках траектории, что и было при пролете Челябинского объекта. Способ решения этой проблемы является наименее тривиальной частью разработанного алгоритма. Поэтому, в отличие от всего остального он описывается в данной работе несколько подробнее.

Был выбран простейший вариант реализации способа учета влияния атмосферы – на атмосферном участке траектория рассчитывается при средней скорости полета. Что такое «средняя скорость» и как ее вычислить – это и был основной вопрос при разработке рассматриваемого модуля расчетного алгоритма. На основании данных о взрыве объекта (которые получаются уже после расчета траектории) можно вычислить отношение его оставшейся кинетической энергии непосредственно перед взрывом E_f , равной энергии взрыва E_c , к начальной энергии E_0 . Тогда при условии пренебрежения потерей массы объекта при движении в атмосфере

$$v_f = v_0 \left(\frac{E_f}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где v_f – скорость объекта перед взрывом (конечная скорость), v_0 – его скорость на входе в атмосферу (начальная скорость).

При малых углах входа и малых изменениях скорости нетрудно получить, что высота траектории z над поверхностью Земли в первом приближении пропорциональна квадрату изменения азимутального угла φ :

$$z \sim \varphi^2 \quad (2)$$

Единственным сильно изменяющимся по траектории параметром, влияющим на аэродинамические воздействия на объект во время его гиперзвукового полета, является плотность воздуха. Так как эта плотность в используемой здесь модели изотермической атмосферы экспоненциально зависит от высоты полета, из формулы (2) следует, что на пологих траекториях тормозящее объект ускорение a в первом приближении описывается следующим образом:

$$a \approx -c_1 \exp(-\xi^2),$$

$$\xi = \left(\frac{z - z_f}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\varphi - \varphi_f}{\varphi_0 - \varphi_f},$$

где c_1 – функция от констант, определяющих аэродинамические силы и массу объекта, h – приведенная высота атмосферы, на которой плотность воздуха изменяется в e раз, индекс 0 соответствует параметрам на входе в атмосферу, индекс f – на финише полета в точке взрыва.

Таким образом, в первом приближении, после интегрирования по углу φ получаем уменьшение скорости объекта Δv в атмосфере:

$$\Delta v(\xi) \approx -\Delta v_f [1 - \operatorname{erf}(\xi)],$$

$$\Delta v_f = v_0 - v_f,$$

где $\operatorname{erf}(\xi)$ – интеграл вероятности (или функция ошибок). Известно, что на большей части интервала $0 \leq \xi \leq 1$ функция $\operatorname{erf}(\xi)$ близка линейной $f(\xi) = \xi$, а при $\xi > 1.5$ она практически выходит на асимптоту $f(\xi) = 1$. Только в сравнительно небольшой окрестности точки $\xi = 1$ имеется плавный переход функции $\operatorname{erf}(\xi)$ с одного, почти линейного режима зависимости от аргумента ξ , к другому [20]. Поэтому хорошей ее аппроксимацией будет соответствующая кусочно-линейная функция, и изменения потерь скорости объекта по траектории тогда приближенно описываются следующим образом:

$$\Delta v(\xi) \approx -\Delta v_f (1 - \xi) \text{ при } 0 \leq \xi \leq 1,$$

$$\Delta v(\xi) \approx 0 \text{ при } 1 \leq \xi \leq \xi_0$$

Это означает, что на участке траектории от верхней границы атмосферы $\xi_0 \geq \xi \geq 1$ скорость полета неизменна и равна начальной скорости v_0 , а при $1 \geq \xi \geq 0$ она линейно изменяется по ξ от v_0 до v_f , и здесь ее среднее значение равно полусумме начального и конечного значений. Тогда на интервале $0 - \xi_0$ изменения параметра ξ легко определить среднюю скорость объекта $\langle v \rangle$ на всем атмосферном участке траектории через статистические весовые коэффициенты α и β и начальную и конечную ее величины:

$$\langle v \rangle = \alpha v_0 + \beta v_f,$$

где

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2\xi_0},$$

$$\beta = \frac{1}{2\xi_0}$$

Например, для Челябинского объекта при условной высоте входа в атмосферу 100 км, высоте взрыва объекта 25.25 км (средней между двумя рассматриваемыми далее значениями) и приведенной высоте атмосферы $h = 7.16$ км (см. [18]), $\xi_0 = 3.23$, и весовые коэффициенты таковы: $\alpha = 0.845$, $\beta = 0.155$.

Таким образом, все параметры рассматриваемого процесса замыкаются через необходимое количество уравнений, и при известной орбите объекта до входа в земную атмосферу стало возможным с точностью до погрешности измерения высоты взрыва и координат эпицентра однозначно определять все основные параметры как самого объекта, так и вызванного им взрыва. Известны скорость объекта и угол наклона траектории в ее любой точке. Легко определяются как длина траектории от точки входа в атмосферу до точки воздушного взрыва, так и его высота. А заданные скорость и угол входа (угол наклона траектории в точке входа) вместе с известной высотой взрыва и перепадом давления на ударной волне при заданном удалении от эпицентра однозначно определяют характеристики взрыва, вызванного разрушением объекта и очень резким торможением его обломков, лавинообразно дробящихся вплоть до мелких крошек и пыли, а затем испаряющихся и превращающихся в облако плазмы.

Однако, из описания модуля расчета скорости на атмосферном участке траектории становится ясно, что для того, чтобы его применить, надо знать параметры взрыва, которые требуются для вычисления финальной скорости объекта по формуле (1). При этом для их определения в свою очередь необходимо знать параметры траектории. И вдобавок, заранее неизвестен азимутальный угол точки входа объекта в атмосферу, как и прицельное расстояние или длина атмосферного участка траектории. При этом, в начале расчетов любого конкретного случая входа объекта в атмосферу Земли, пока не просчитано достаточно большое количество вариантов и не получен необходимый опыт решения подобных задач, даже приблизительно неясен уровень параметров, с которых нужно начинать процесс решения. Именно поэтому процедура, которая, как видно из анализа описания модуля расчета скорости, оказывается процедурой последовательных приближений, должна быть простой и быстрой, чтобы можно было провести достаточно много вложенных циклов вычислений по нескольким параметрам.

Следует отметить, что модуль расчета взрывов и столкновений из источника [16] полностью отвечает этим требованиям. И только из-за них на первом этапе разработки численной модели был использован именно такой модуль расчета атмосферного участка траектории при малых углах входа ($\delta \leq 10^\circ - 15^\circ$), являющийся простейшим из адекватных. За эту простоту приходится платить приближенностью решения, которая, как показали расчеты и анализ результатов, приводит к некоторому занижению величины угла входа δ и, соответственно, к завышению плотности объекта ρ . Если считать решение, в котором никак не учитывается влияние атмосферы на траекторию, «невозмущенным», то использованный модуль с таким способом учета «возмущений» при расчете полета Челябинского объекта корректирует угол входа примерно на 60 % от того, что получилось бы при использовании точной процедуры. Таким образом, в данном случае при используемом подходе «не добирается» около 0.6° по углу δ . Тем не менее, применение дополнительной информации, внешней по отношению к данной конкретной задаче, позволяет учесть и скорректировать эту погрешность существующего на данный момент метода.

Погрешности в результатах, даваемые заимствованным извне модулем расчета взрывов и столкновений, также, безусловно, присутствуют, тем более что он ориентирован на достаточно крутые траектории входа. Поэтому оценка адекватности результатов, получаемых с помощью описываемого здесь метода, должна исходить из сопоставления расчетных и наблюдаемых данных.

Таким образом, описанная выше математическая модель позволила перейти от полной неопределенности и умозрительных спекуляций на тему инцидентов со входами космических тел в атмосферу планет к регулярному решению четко определенной физико-математической задачи. В случае необходимости на базе этой модели и уже с использованием в качестве начального приближения решений, полученных с ее помощью, можно создавать расчетные модули, все более точно описывающие любой из элементов рассматриваемого явления, и получать все более точные результаты. При этом также следует отметить, что с помощью «внешней» корректировки практически точные результаты для характеристик Челябинского объекта уже получены, а некоторые важнейшие параметры, такие как, например, энергия взрыва, и сейчас в рамках настоящей модели определяются по существу точно. Кроме того, стоит напомнить, что при достаточно больших углах входа ($\delta > 20^\circ - 25^\circ$) коррекции полученных данных уже не требуется.

IV. Результаты расчетов параметров Челябинского и Тунгусского объектов и характеристик вызванных ими взрывов

Период обращения Челябинского объекта и однозначно связанная с ним длина большой полуоси орбиты вычисляются из резонанса с Землей 13:6 с любой необходимой степенью точности. Однако, для определения скоростей и углов их пересечения, необходимых для расчета условий входа в атмосферу Земли нужны и другие параметры орбиты. Первоначально была рассмотрена орбита, лежащая в плоскости эклиптики. Тогда для вычислений требуется еще один параметр, в качестве которого был выбран перигелий, имевший в данных всех трех групп наименьший разброс [7 – 9]. Так как из таблицы 1 следует, что среднее значение перигелия орбиты равно 0.81 астрономической единицы, были проведены расчеты с перигелиями $r_p = 0.78; 0.80$ и 0.82 . Предполагалось в случае необходимости продолжить этот ряд, однако, анализ результатов расчетов дал возможность считать значение $r_p = 0.80$ базовым для данной задачи, в достаточной для первого приближения степени отражающим реальность. После этого был проведен расчет некомпланарной орбиты, с углом наклона $i = 3.05^\circ$, который получается по корреляции с длиной большой полуоси по данным работы [9]. Следует отметить, что характерной особенностью всех этих вариантов орбиты Челябинского объекта является то, что их радианты отклонены от направления на Солнце на угол не более $12^\circ - 16^\circ$, то есть они подходят к Земле из области небесной сферы, близкой к Солнцу.

Результаты расчетов при высоте взрыва $H = 25.5$ км показаны в таблицах 2 и 3. В первой из них: var – вариант расчета Челябинского объекта, r_p – величина перигелия в астрономических единицах, i – угол наклона плоскости орбиты объекта к плоскости эклиптики в градусах, v – скорость на входе в атмосферу с учетом вращения Земли в километрах в секунду, δ – угол входа в градусах, ρ – плотность объекта в килограммах на кубический метр, D – диаметр объекта в метрах, m – его масса в мегатоннах, E_0 – кинетическая энергия объекта на входе в атмосферу в мегатоннах тротилового эквивалента, E_e – энергия взрыва объекта в тех же единицах.

Таблица 2

var	r_p	i (°)	v (км/с)	δ (°)	ρ (кг/м ³)	D (м)	m (Мт)	E_0 (Мт)	E_e (Мт)
ЧО-1	0.78	0	17.99	7.79	790	170	2.03	78.3	57.7
ЧО-2	0.80	0	17.51	7.87	730	176	2.09	76.6	57.6
ЧО-3	0.80	3.05	17.52	7.98	670	180	2.06	75.5	57.8
ЧО-4	0.82	0	17.02	7.63	740	179	2.23	77.0	57.7

Как следует из таблицы 2, увеличение перигелия r_p вполне естественно приводит к постепенному уменьшению скорости входа объекта в атмосферу Земли. Угол входа максимален, а плотность объекта, соответственно, минимальна при $r_p \approx 0.80$. Диаметр и масса объекта растут при уменьшении скорости входа в атмосферу. Кинетическая энергия на входе минимальна при $r_p \approx 0.80$, энергия взрыва практически не изменяется и ее величина примерно равна 58 Мт в тротиловом эквиваленте. При высоте взрыва 25.0 км картина аналогичная, массы объекта те же, но плотность выше на 110 – 130 кг/м³, и диаметры, соответственно, меньше на 8 – 10 м. Энергия взрыва снова практически не изменяется и округленно равна 56.5 Мт. Таким образом, энергия взрыва в небе при Челябинске была практически равна энергии самого мощного термоядерного взрыва так называемой Царь-бомбы (другие обозначения – АН602, Кузькина мать), произведенного Советским Союзом 30 октября 1961 года на Новой Земле [21].

Однако, вследствие большой высоты взрыва Челябинского объекта воздействие этого взрыва на земле не было катастрофическим. В таблице 3 приведены расчетные значения основного на этих расстояниях фактора – перепада давления на ударной волне. В ней: var – вариант, p – перепад давления (избыточное давление) на ударной волне в килопаскалях на удалении L от эпицентра взрыва, измеренном в километрах вдоль поверхности земли и указанном в столбце слева от столбца перепада давления.

Таблица 3

var	L_0 (км)	p_0 (кПа)	L_1 (км)	p_1 (кПа)	L_2 (км)	p_2 (кПа)	L_3 (км)	p_3 (кПа)
ЧО-1	0	14.6	20	11.5	35	9.6	90	5.0
ЧО-2	0	14.7	20	11.5	35	9.7	90	5.0
ЧО-3	0	14.6	20	11.5	35	9.6	90	5.0
ЧО-4	0	14.6	20	11.5	35	9.6	90	5.0

Даже в эпицентре перепад на волне не достигал 15 кПа, на расстоянии 35 км (примерно в центре Челябинска) он был уже чуть ниже 10 кПа. На расстоянии 90 км перепад давления 5 кПа являлся граничным условием решения этой задачи. При высоте взрыва 25.0 км перепады давления на волне в эпицентре были бы на 0.4 – 0.5 кПа больше, при удалении 20 км – больше на 0.3 кПа, а далее они практически сравнились бы с теми значениями, что представлены в таблице 3. При 5 килопаскалях на ровной местности без экранирования городской застройкой достаточно уверенно выбиваются стекла в окнах, при 10 – 15 кПа возможны повреждения и слабые разрушения многоэтажных зданий. Впрочем, эти вопросы более подробно обсуждаются в одной из следующих статей этой серии.

Перейдем теперь к Тунгусскому объекту. В разделе II было выдвинуто предположение, что его орбита была очень близка к орбите Челябинского объекта. Выведем из этого утверждения все возможные на данный момент следствия, и посмотрим, насколько они согласуются с массивом информации по Тунгусскому «метеориту», который был накоплен за век, прошедший с момента его падения. Из сравнения вариантов ЧО-2 и ЧО-3 можно сделать вывод, что небольшая некомпланарность орбиты слабо влияет на характеристики объекта даже при малых углах входа. А при большом угле входа, который, по имеющимся данным, был у Тунгусского объекта, эти различия вообще должны потерять какое-либо значение. Поэтому рассмотрим простейший вариант компланарной орбиты, совпадающей с орбитой варианта ЧО-2.

Взрыв Тунгусского объекта произошел летом 1908 года – 30 июня при ином взаимном расположении оси вращения Земли и вектора скорости объекта, в первое окно сближения, что приводит к зеркальному отражению вектора скорости объекта относительно вектора скорости планеты по сравнению с тем, что было в феврале 2013 года. Тунгусский взрыв произошел заметно севернее Челябинского – его координаты были таковы: 60.89° северной широты и 101.90° восточной долготы [22]. Местное время взрыва 7:14:30, солнечное время – 7:02:06. Все эти факторы в совокупности так повлияли на расчетный угол входа Тунгусского объекта, что при азимуте 81° [23] он оказался равен 51.2° вместо 7.9° у варианта ЧО-2 при той же самой орбите. Подобные крутые траектории входа считаются гораздо проще и быстрее, чем пологие, и в этих расчетах не используется описанный выше модуль расчета скорости на атмосферном участке траектории, так как на такой очень короткой траектории скорость объекта от входа в атмосферу до взрыва практически не изменяется. Поэтому, вызываемые им погрешности, которые были описаны в разделе III, при таких расчетах отсутствуют, и данные по плотности объекта, полученные в них, являются более точными, чем при расчетах пологих траекторий.

Как и ранее, для проведения расчетов необходимо поставить граничное условие по перепаду давления на ударной волне от взрыва. Такой очевидной границей в данном случае является линия лесоповала. Считается, что он происходит, если перепад давления на волне составляет не менее 30 кПа [16]. В течение нескольких экспедиций, проходивших на протяжении десятилетий, героические, без преувеличения, исследователи Тунгусского феномена так или иначе установили эти границы. Первая полная карта вывала

леса была составлена в 1962 году – спустя 54 года после самого события. Из-за специфической формы пятна вывала его назвали «бабочкой» [24]. Один из вариантов этого пятна – бабочка Фаста показан на рис. 3. Общая площадь вывала леса составляет по этим данным 2150 км^2 , что эквивалентно кругу радиусом около 26 км. Общеизвестно, что «крылья бабочки» возникли в результате воздействия баллистической ударной волны, вызванной очень быстрым полетом объекта на малой высоте, а не в результате его взрыва.

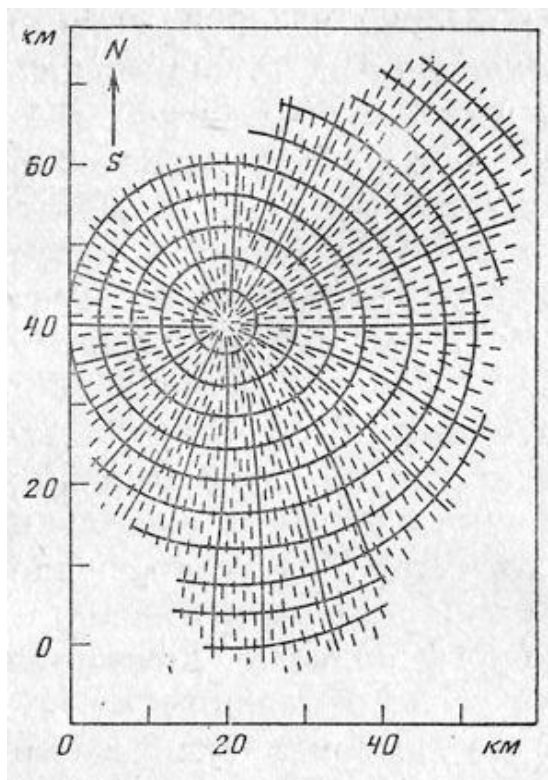


Рис. 3

Сам взрыв происходит уже на практически остановленном рое мелких обломков, и именно вследствие этой остановки, в результате перехода кинетической энергии объекта в тепло. Поэтому след от воздействия взрыва должен не слишком отличаться от круга. Этот априорный вывод хорошо подтверждают результаты численных симуляций взрыва на суперкомпьютере лаборатории Sandia [25], см. рис. 4.

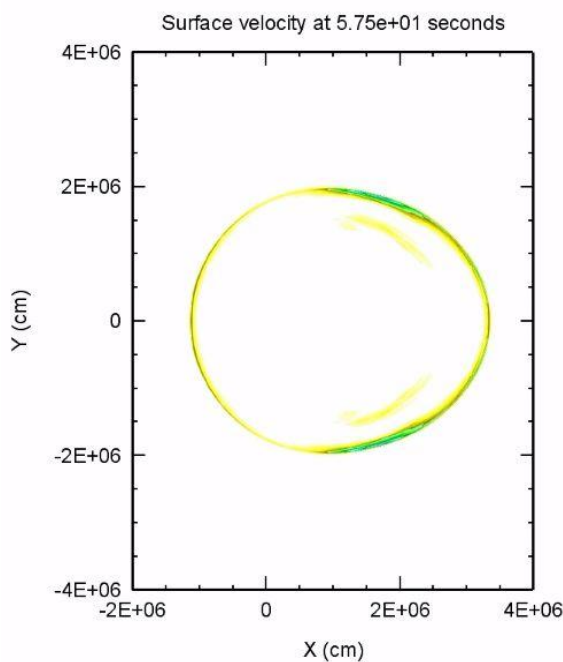


Рис. 4

Сопоставляя рисунки 3 и 4, можно сделать вывод, что минимальный радиус зоны лесоповала непосредственно от взрыва Тунгусского объекта составляет 20.5 ± 0.5 км, а ее площадь оказывается несколько больше 60 % от общей площади вывала леса в 2150 км^2 , которая, по мнению более поздних исследователей, в реальности была все-таки несколько меньшей.

Итак, был проведен расчет варианта ТО-1 характеристик Тунгусского объекта с орбитой и плотностью соответствующим варианту ЧО-2 Челябинского объекта. Был также проведен расчет ТО-2, отличающийся от ТО-1 тем, что плотность объекта была взята из варианта расчетов характеристик Челябинского объекта ЧО-3 с его некомпланарной орбитой, для удобства сравнения снова показанного в приведенных ниже таблицах. Результаты расчетов по всем этим вариантам представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

var	r_p	i (°)	v (км/с)	δ (°)	ρ (кг/м ³)	D (м)	m (Мт)	E_0 (Мт)	E_e (Мт)
ТО-1	0.80	0	17.37	51.2	730	97	0.352	12.7	12.5
ТО-2	0.80	0	17.37	51.2	670	101	0.361	13.0	12.9
ТО-3	0.80	0	17.37	51.2	500	115	0.398	14.3	14.3
ЧО-3	0.80	3.05	17.52	7.98	670	180	2.06	75.5	57.8
ЧО-5	0.80	3.05	17.52	8.60	500	195	1.94	71.1	57.8

Важнейшими отличиями характеристик Тунгусского объекта от Челябинского являются почти вдвое меньший диаметр первого, в 5.5 – 6 раз меньшая масса и в 4 – 4.5 раз меньшая энергия взрыва. Однако, при этом из-за в 3.5 раза меньшей высоты взрыва перепад давления на ударной волне в эпицентре Тунгусского взрыва в 7 раз выше, чем в эпицентре взрыва Челябинского. Далее по мере удаления от эпицентра происходит постепенное сближение параметров обоих взрывов, и перепады давления сравниваются примерно на расстоянии 40 км от эпицентра. На больших расстояниях более сильная волна возникла у существенно более мощного и более высотного Челябинского взрыва.

Таблица 5

var	H (км)	L_0 (км)	p_0 (кПа)	L_1 (км)	p_1 (кПа)	L_2 (км)	p_2 (кПа)	L_3 (км)	p_3 (кПа)
ТО-1	7.35	0	98.9	19.05	30.0	35	10.5	90	2.9
ТО-2	7.44	0	98.0	19.25	30.0	35	10.7	90	2.9
ТО-3	7.73	0	97.0	20	30.0	35	11.3	90	3.1
ЧО-3	25.5	0	14.6	20	11.5	35	9.6	90	5.0
ЧО-5	25.5	0	14.6	20	11.5	35	9.6	90	5.0

Следует отметить, что высота Тунгусского взрыва варьировалась, и в таблицах 4, 5 представлены ее оптимальные значения, то есть те, которые соответствуют максимальным радиусам границы лесоповала (см. столбец L_1 таблицы 5). Как меньшие, так и большие по массе объекты приводят к уменьшению этого расстояния. Первые – из-за меньшей мощности взрыва, а вторые – вследствие меньшей его высоты, из-за «проваливания» более крупного тела ближе к поверхности земли. Это приводит к резкому увеличению эффектов взрыва, но на все меньшей площади.

Тем не менее, у вариантов ТО-1 и ТО-2 не выполняется изначально поставленное граничное условие – перепад на ударной волне 30 кПа на расстоянии не меньше 20 км от эпицентра. Только вариант ТО-3 с плотностью объекта 500 кг/м^3 дает результат, который удовлетворяет требованиям, полученным из эмпирического описания последствий Тунгусского взрыва. Эта плотность на 170 кг/м^3 ниже, чем та, которая была получена в варианте ЧО-3 расчета Челябинского объекта. Таким образом, как будто бы возникает некоторый лаг между результатами расчетов двух, по исходному предположению, родственных объектов.

Однако, в разделе III работы было указано, что при малом угле входа в атмосферу, который был у Челябинского объекта, используемый в этих условиях простейший модуль расчета скорости на атмосферном участке траектории приводит к некоторому занижению расчетного угла входа и, соответственно, к завышению плотности объекта. При больших углах входа эта погрешность расчетного метода отсутствует, поэтому есть все основания скорректировать данные по плотности и, соответственно, углу входа Челябинского объекта. Такой вариант расчета обозначен как ЧО-5 и представлен в таблицах 5, 6. Он, естественно, отличается от варианта ЧО-3 несколько большими размерами, однако его масса и кинетическая энергия уменьшились на 6 %. При этом энергия взрыва и перепады давления на местности в ударной волне не изменились совсем.

Теперь рассмотрим плотность объектов в несколько ином аспекте. Уже в течение нескольких десятилетий очевидно, что Тунгусский объект – это обломок кометы. Соответственно таковым же является и Челябинский объект. Следовательно, для анализа адекватности полученных решений целесообразно сделать краткий обзор плотностей комет. Вещество комет, как известно, представляет собой композит из слежавшегося, многократно таявшего и замерзавшего грязного снега, и льда. Загрязнения – это, то есть в основном, хондриты, обычный материал метеоритов и астероидов. Так как доля хондритов мала, то максимальная плотность вещества комет практически не может заметно превышать плотность льда, составляющую около $920 - 930 \text{ кг/м}^3$ [26, 27]. Различные ссылки на эту тему [28 – 30] дают такие разбросы оценок плотностей ядер комет – от 100 кг/м^3 до 1000 кг/м^3 , что становится очевидным: определенные и хорошо обоснованные данные сейчас просто отсутствуют. Грубая оценка по среднему значению приводит к величине 550 кг/м^3 . Отличающиеся как будто бы чуть меньшим разбросом данные по комете 9P/Tempel 1 ($200 - 700 \text{ кг/м}^3$) [31], приводят к средней плотности 450 кг/м^3 .

Какие-то представления можно также получить, рассматривая данные, касающиеся снежного покрова. Плотность старого лежалого снега на Земле составляет $300 - 700 \text{ кг/м}^3$ [32], что, в среднем, снова приводит к тому же уровню величин – 500 кг/м^3 . Конечно, гравитация на Земле на много порядков превосходит уровни гравитации в ядрах даже больших комет, однако там снег слеживается не несколько месяцев, а, видимо, миллионы лет. Поэтому какие-то аналогии между характеристиками снега на Земле и внутри ядер комет могут оказаться вполне уместными.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что уровень плотности обломка кометы 500 кг/м^3 согласуется с известными данными по кометам и земным снегам. Поэтому в дальнейшем варианты расчетов ЧО-5 и ТО-3 с такой плотностью считаются основными, наиболее правильно отражающими реальность.

V. Обсуждение результатов

Итак, утром 15 февраля 2013 года в небе вблизи Челябинска на высоте 25.5 км взорвался обломок кометы поперечным размером примерно 195 м, плотностью около 500 кг/м^3 и массой примерно 1.95 Мт. Энергия взрыва составила 58 Мт в тротиловом эквиваленте. За 105 лет до этого 30 июня 1908 года над Подкаменной Тунгусской взорвался обломок той же самой кометы заметно меньшего размера, однако, до сих пор считавшийся самым крупным небесным телом, вошедшим в атмосферу Земли в историческое время. В силу единства происхождения он имел ту же плотность, но его минимальный поперечный размер составлял 115 м, а масса – 0.40 Мт. Энергия его взрыва была около 14.5 Мт, но вследствие в 3.3 раза меньшей высоты, на которой он произошел, и составлявшей 7.7 км, воздействие на подстилающую поверхность в тот раз было не в пример более сильным. Расчетные данные Тунгусского инцидента прекрасно согласуются с теми, что были ранее получены несколькими поколениями исследователей за десятилетия работ по этой проблеме: энергия взрыва от 7 до 17 Мт на высоте от 6.5 до 10.5 км [33]. При этом, разброс вновь полученных результатов, в отличие от того, что было ранее, практически отсутствует.

Следует, однако, отметить, что результаты по Челябинскому объекту находятся в разительном противоречии с теми, что со ссылками на NASA были растиражированы по всему миру средствами массовой информации сразу же после инцидента. Самый первый релиз NASA от 15 февраля 2013 года сообщал, что Челябинский метеор имел размер до входа в атмосферу 15 м, массу – 7 кт, скорость его полета была 18 км/с, а энергия его взрыва составляла «сотни килотонн» [34]. Основания этим оценкам указаны не были. Далее в тот же день последовало уточнение, что размер объекта увеличен до 17 м, масса – до 10 кт, а оценка энергии взрыва выросла, уже почему-то, с «30 кт» до 500 кт. Основания для новых оценок – данные, полученные «на 5 «дополнительных» станциях инфразвукового наблюдения, расположенных по всему миру, причем первой из них, зарегистрировавшей событие, была станция на Аляске» [34].

Учитывая тот факт, что перемножая половину квадрата заявленной скорости объекта на заявленную массу, и деля результат на 4.18 МДж/кг (удельную энергию тротила), любой, кроме авторов релиза, получит не более 390, а не 500 кт, можно сделать вывод, что они так торопились, что забыли даже о законе сохранения энергии. Кроме того, сотрудники JPL должны были бы знать, что у таких маленьких объектов энергия финального взрыва гораздо меньше их начальной кинетической энергии на входе в атмосферу вследствие рассеивания энергии на траектории. В данном конкретном случае расчеты приводят к энергии взрыва 120 кт. При таком взрыве перепады давления на ударной волне в Челябинске были бы, минимум, в 300 с лишним раз ниже наблюдавшихся, и там совершенно не было бы никаких разрушений.

Очевидно, что размер объекта инфразвуковыми станциями, которые фиксируют возмущения в атмосфере, напрямую определен быть не мог. Полная неразбериха с данными по энергии показывает, что в тот момент размер объекта не мог быть определен и через них. Поэтому остается единственный логически обоснованный вариант – авторы релиза заявили в качестве размера Челябинского объекта максимум того, что они считали не обнаруживаемым в ближайшем околоземном космическом пространстве современными

оптическими автоматизированными системами слежения. Это вскоре было подтверждено «научным обоснованием» такого подхода, см. [35]. Однако никто из них не подумал, что этим системам недоступны околосолнечные ракурсы, а Челябинский объект заходил именно так – его линия входа была отклонена от направления на Солнце на угол около 13.6° (в варианте ЧО-5), см. также раздел IV и/или меморандум [36].

Более того, вскоре появились «дополнительные подтверждения» этой совершенно несуразной с любой точки зрения оценки величины энергии взрыва Челябинского объекта – 500 кт, см. [37]. Там через корреляцию между энергией световой вспышки и энергией самого взрыва (см. [38]) снова, как будто бы, получили эти пресловутые 500 кт. Однако та корреляция из источника [38] только по одному параметру была выведена для энергий взрыва $0.1 - 1$ кт, и вследствие того, что в реальности имеет место многопараметрическая зависимость, отличалась большими расхождениями между эмпирическими точками и корреляционной кривой. И эту ненадежную зависимость авторы работы [37] экстраполировали, как они полагали, на 3 порядка, а на самом деле даже на 5(!). Очевидно, что вследствие некорректности такой экстраполяции с ее помощью можно получить абсолютно любые наперед заданные результаты.

Таким образом, налицо, видимо по недомыслию, очевидная попытка мифотворчества, в которой никто из ознакомившихся с этими сообщениями нескольких сотен миллионов человек не усомнился (а ведь среди них было несколько миллионов человек, считающих себя учеными). Более того, все это повсеместно тиражировалось методом вирусной инфекции, так чтобы все хорошо затвердили этот очередной миф. Данная ситуация показывает, что сочетание человеческого недомыслия, высокотехнологичных автоматизированных систем, а также современных средств массовой информации приводит к ошибкам такого масштаба, которые никогда не могли бы быть достигнуты при опоре на одну только простую и естественную человеческую глупость.

Выводы

1. Результаты расчетов по математической модели, связывающей параметры движения небесных тел как в сфере действия Солнца, так и в сфере действия Земли с их массо-энергетическими характеристиками, а также с характеристиками воздушных взрывов, вызываемыми этими телами, оказались хорошо согласованы с данными, полученными из наблюдений.
2. Расчеты показали, что размер Челябинского объекта был равен почти 200 метрам, а его масса – близка к 2 мегатоннам. Энергия взрыва составила 58 мегатонн в тротиловом эквиваленте.
3. Размер Тунгусского объекта оказался не меньше 115 м, его минимальная масса составляла 0.4 мегатонны, а энергия взрыва – около 14.5 мегатонн.
4. Показана общность происхождения этих двух небесных тел, являвшихся кометными обломками.
5. Продемонстрирована ошибочность общепринятых в настоящее время представлений о Челябинском инциденте.

Литература

1. Падение метеорита на Урале в 2013 году. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение метеорита на Урале в 2013 году](http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_на_Урале_в_2013_году)
2. Атака с космоса. *Южноуральск.рф*, 15.02.2013 // <http://южноуральск.рф/новости-южноуральска/атака-с-космоса.html>
3. Коркино. Метеорит // <http://www.youtube.com/watch?v=odKjwrjIM-k>
4. 1976 Standard Atmosphere Calculator // <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
5. Атмосферный ядерный взрыв. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный ядерный взрыв](http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв)
6. Форум Drom.ru, 17.02.2013 // <http://forums.drom.ru/garazh/t1151508012-p1080.html#post1134961586>
7. W. Cooke – How Do We Know the Russian Meteor and 2012 DA14 Aren't Related? *NASA Blogs*, 16.02.2013 // http://blogs.nasa.gov/cm/blog/Watch%20the%20Skies/posts/post_1361037562855.html
8. M. Hankey – Large Daytime Fireball Hits Russia. *AMS* // <http://www.amsmeteors.org/2013/02/large-daytime-fireball-hits-russia/>
9. J. Zuluaga, I. Ferrin – A Preliminary Reconstruction of the Orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. *Arxiv.org* // <http://arxiv.org/pdf/1302.5377v1.pdf>
10. (3753) Круитни. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/\(3753\) Круитни](http://ru.wikipedia.org/wiki/(3753)_Круитни)
11. 54509 YORP. *Wikipedia* // http://en.wikipedia.org/wiki/54509_YORP
12. Орбитальный резонанс. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Орбитальный резонанс](http://ru.wikipedia.org/wiki/Орбитальный_резонанс)
13. А. В. Молчанов – Резонансы периодов // http://avmol51.narod.ru/Rezonansy_periodov.html
14. Метеорный поток. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Метеорный поток](http://ru.wikipedia.org/wiki/Метеорный_поток)
15. В. В. Федьинский – Метеоры. Москва, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956 // <http://www.astronet.ru/db/msg/1198013/08.html>
16. R. Marcus, H. J. Melosh, G. Collins – Earth Impact Effects Program. *Imperial College (London), Purdue University* // <http://impact.ese.ic.ac.uk/cgi->

bin/crater.cgi?dist=20&diam=17&pdens=1000&pdens_select=0&vel=18&theta=30&tdens=&tdens_select=3000

17. G. S. Collins, H. J. Melosh, R. A. Marcus – Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, **40**, no 6, 2005 // <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/effects.pdf>
18. В. И. Левантовский – Механика космического полета в элементарном изложении. Москва, Наука, 1980.
19. Ю. И. Лобановский – Асимптотический метод расчета захвата объекта системой двух небесных тел. *Synerjetics Group*, Декабрь 2003 // <http://synerjetics.ru/article/capture.htm>
20. Функция ошибок. *Wikipedia* // http://ru.wikipedia.org/wiki/Функция_ошибок
21. Царь-бомба. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
22. Тунгусский метеорит. *Wikipedia* // http://ru.wikipedia.org/wiki/Тунгусский_метеорит
23. В. К. Журавлев, Ф. Ю. Зигель – Тунгусское диво. История исследования Тунгусского метеорита. Книга вторая. Шаги к небу. «Баско», Екатеринбург, 1998 // <http://tunguska.tsc.ru/ru/lyrics/prose/zhur/>
24. В. А. Бронштэн – Метеоры, метеориты, метеороиды. Глава 4. Тунгусский метеорит. Москва, Наука, 1987 // <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>
25. Sandia supercomputers offer new explanation of Tunguska disaster. *News Releases*, 17.12.2007 // <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2007/asteroid.html>
26. Лед. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%91%D0%B4>
27. С. В. Антоненко – Сопротивление движению судов. 10.1. Классификация и основные свойства льдов. Издательство ДГТУ, 2007 // http://library.fentu.ru/book/ksi/405/101_.html
28. Л. В. Константиновская – Скрытая масса (астероиды, кометы, метеориты). *Астрономия* // <http://www.astronom2000.info/%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%8F/sm/>
29. A. Ball, S. Gadoski and others – An Instrument for in Situ Comet Nucleus Surface Density Profile Measurement by Gamma Ray Attenuation. *Planetary and Space Science*, **49**, 2001 // http://www.people.fas.harvard.edu/~planets/sstewart/ahrens/Papers_pdf/Seismo_2033.pdf
30. B. Davidsson, P. Gutierres – An Estimate of the Nucleus Density of Comet 19P/Borrelly. DPS 35th Meeting, 2003 // <http://aas.org/archives/BAAS/v35n4/dps2003/43.htm>
31. N. Samarasinha, P. Gutierres and others – Bulk Density of Comet 9P/Tempel 1. *SAO/NASA ADS Astronomy Abstract Service* // <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010DPS....42..2834S>
32. В. М. Евстигнеев, В. Н. Михайлов – Снежный покров. *Портал ВИНТИ* // http://science.viniti.ru/index.php?option=com_content&task=view&Itemid=139&Section=&id=316&id_art=Q003039
33. В. Светцов, Т. Потапова, В. Шувалов – Вековая загадка Тунгуски. «В мире науки», N 3, 2007 // http://www.smoliy.ru/view_alonetext.php?g=74&outpdf
34. Russia Meteor Not Linked to Asteroid Flyby. *JPL, Caltech, Latest News*, 15.02.2013 // <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-061>
35. В NASA рассказали, почему челябинский метеорит не заметили заранее. *Наука и техника*, 20.02.2013 // http://www.strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d_no=52262
36. Ю. И. Лобановский – Первоочередная задача оценки остроты кометно-метеоритной угрозы. Меморандум, *Synerjetics Group*, 28.03.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/memorandum.htm>
37. D. Yeomans, P. Chodas – Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013. *Near Earth Object Program, NASA*, 01.03.2013 // http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html
38. P. Brown, R. Spalding and others – The Flux of Small Near-Earth Objects Colliding with the Earth. *Letters to Nature*, **420**, 2002 // <http://www.nature.com/nature/journal/v420/n6913/full/nature01238.html>

Москва,
12.04.2013

Ю. И. Лобановский