

# Параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и характеристики их взрывов

Ю. И. Лобановский

## Краткое содержание

В работе описано применение математической модели, связывающей 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. Модель была использована для расчетов параметров объектов, вызвавших Челябинский и Тунгусский инциденты, по информации, опубликованной в различных источниках.

В результате расчетов оказалось, что размер Челябинского метеороида составлял 180 – 185 метров, а его масса была близка к 1.8 мегатонны. Энергия его взрыва составила около 57 мегатонн в тротиловом эквиваленте. Размер Тунгусского метеороида оказался близок к 105 метрам, масса – к 0.35 мегатонны, а энергия взрыва – к 14.5 мегатонны. Вследствие общности происхождения этих двух небесных тел их средние плотности оказались одинаковыми и составили около 570 кг/м<sup>3</sup>.

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

## Таблица символов

a – большая полуось  
q – перигелий  
i – угол наклона плоскости орбиты  
D – диаметр  
E – энергия  
L – удаление  
m – масса  
v – скорость  
ρ – плотность  
p – давление  
h – приведенная высота  
H – высота взрыва  
δ – угол входа  
τ – период обращения  
Δ – символ разности

## Индексы

0 – начальный  
f – конечный  
e – взрывной

## I. Введение

В течение полутора месяцев после падения Челябинского метеороида, произошедшего 15 февраля 2013 года, была создана 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 явлениями, наблюдающимися при этом на подстилающей поверхности [1, 2]. Модель тогда же была использована для расчетов характеристик Челябинского, а также Тунгусского метеороидов, которые в этих, а также в последующих работах автора были связаны единством происхождения и, соответственно, близостью своих орбит. Таким образом, путем регулярной физико-математической процедуры без каких-либо умозрительных гипотез и/или предположений были получены основные данные, полностью характеризующие эти более чем примечательные явления.

Однако, те расчеты базировались на предварительной информации, полученной в течение первых 2 – 3 недель после Челябинского инцидента, и на собственных оценках автора некоторых ключевых параметров этого явления, которые, по очевидным причинам, в тот момент не могли обладать высокой точностью. К тому же, за прошедшее время один из внутренних параметров математической модели – условная высота

атмосферы также был уточнен. Вместо первоначальной стандартной величины 100 км стали использоваться ее значения, более тесно связанные с условиями задачи при входе объекта в атмосферу Земли. Таким образом, было уточнено влияние атмосферы на траекторию движения метеороида в рамках разработанной численной модели за счет некоторого ее небольшого усложнения.

Кроме того, параметры траекторной части модели были полностью увязаны с параметрами «внешней» интерактивной части модели, описывающей разрушение метеороидов в атмосфере [3] и разработанной несколькими годами ранее другими исследователями (см. [3, 4]). Эти, в принципе, сравнительно небольшие изменения модели все-таки оказывают некоторое влияние на результаты расчетов. Более того, вследствие значительной нелинейности модели может оказаться так, что при определенном наборе параметров решение задачи может отсутствовать в рамках старой, более грубой модели, и существовать в рамках модели уточненной. Это происходит на границах существования решения, которое, как и в любой другой нелинейной задаче, может быть найдено не всегда.

В ноябре 2013 года в журналах Nature и Science двумя большими коллективами (всего 33 и 59 соавторов соответственно) были опубликованы две большие обзорные статьи о Челябинском инциденте. В них, наконец, оказались приведены достаточно достоверные и сравнительно подробные данные, полученные на основе видеоизображений, докладов и сообщений очевидцев о параметрах траектории метеороида и явлениях, сопутствовавших его пролету и взрыву [5, 6]. После этого появилась возможность заново пересчитать характеристики Челябинского и Тунгусского метеороидов по этим материалам, существенно уточняющим наблюдавшуюся картину явления в небе у Челябинска по сравнению с данными из экспресс-отчетов в средствах массовой информации и фрагментарных личных сообщений очевидцев, использованных в работах [1, 2]. Результаты расчета характеристик Челябинского и Тунгусского метеороидов по этой информации с учетом указанных во введении изменений модели и представлены в данной работе, препринт которой был размещен на сайте Корнельского университета ArXiv.org [7]. Анализ рецензий, а также выступления по этой тематике на XL Академических чтениях по космонавтике («Королёвских чтениях») в январе 2016 года, привели к уточнению некоторых формулировок работы, которые были использованы в ее нынешнем варианте.

## **II. Расчетная модель**

Построенная математическая модель полностью увязывает в единую систему все существенные характеристики описываемого события: от траекторных параметров небесного тела через его физические характеристики вплоть до явлений, наблюдаемых в атмосфере и на подстилающей поверхности при его взаимодействии с атмосферой. Этим модель кардинально отличается от попыток фрагментарных исследований отдельных компонент этой системы без всякого увязывания их между собой, что было продемонстрировано во всех известных автору публикациях на эту тему.

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 солнцесцентрической 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 [8]. Подобный подход ранее уже использовался автором в работе [9].

При переходе к рассмотрению движения объекта в гравитационном поле Земли возникает проблема вычисления так называемого прицельного расстояния – длины перпендикуляра, проведенного к вектору землосцентрической скорости объекта на параллельную ему линию, проходящую через центр Земли (см. [8]). Этот параметр, определяющий движение объекта относительно Земли, в рамках данной модели может быть вычислен при известных географических координатах точки, в которой заканчивается его полет и ракурсе траектории этого полета. Для этого нужно дважды провести повороты исходной земной системы географических координат. Первый поворот производится для учета наклона оси вращения Земли по отношению к плоскости траектории объекта. Второй поворот 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 – полярный угол  $\varphi$  (в рамках данной задачи его удобнее называть азимутальным). Так как существуют 2 ветви гиперболы, проходящие через заданную точку,

имеется 2 набора углов, обеспечивающих второй поворот системы координат. Однако, из условия, что точка взрыва объекта находится ближе к перигею, чем точка входа, выбирается единственное решение, отвечающее требованиям задачи.

После этого остается только проблема учета влияния атмосферы Земли на движение объекта на финальной части его траектории. Она имеет заметное практическое значение только при малых углах входа объекта в атмосферу и, соответственно, при относительно длинных атмосферных участках траектории, что и было при пролете Челябинского метеороида. 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 вычислять – 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  $E_e$ , 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). Следует отметить, что это априорное предположение спустя почти год в начале 2014 года было полностью подтверждено оценками массы следа Челябинского метеороида [10] – потеря его массы в следе составила не более 1 – 1.5 % от исходной массы метеороида.

При малых углах входа и малых изменениях скорости нетрудно получить, что превышение высоты  $z$  над высотой ее перигея в первом приближении пропорциональна квадрату изменения азимутального угла  $\varphi$ :

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

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. Если взрыв объекта происходит в перигее орбиты,  $\varphi_f = 0$ . При пологой траектории, как у Челябинского метеороида,  $\varphi_f \approx 0$ .

Таким образом, в первом приближении, после интегрирования по углу  $\varphi$  получаем уменьшение скорости объекта  $\Delta v$  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 (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  $\xi$ , к другому [11]. Поэтому хорошей ее аппроксимацией будет соответствующая кусочно-линейная функция, и изменение 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  $\xi$  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  $\xi$  легко определить среднюю скорость объекта  $\langle v \rangle$  на всем атмосферном участке траектории через статистические весовые коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  и начальную и конечную ее величины:

$$\langle v \rangle = \alpha v_0 + \beta v_f, \quad (3)$$

где

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2\xi_0}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{2\xi_0} \quad (5)$$

Например, для Челябинского метеороида при скорости входа в атмосферу 18.85 км/с, условной высоте входа 90 км, высоте его взрыва 28 км (см. далее) и приведенной высоте атмосферы  $h = 8.00$  км (см. [3, 4]),  $\xi_0 = 2.78$ , и весовые коэффициенты таковы:  $\alpha = 0.820$ ,  $\beta = 0.180$ .

Несмотря на то, что формулы (3) – (5) выведены при довольно ограничительных предположениях, накладываемых на траекторию, вследствие экспоненциального нарастания плотности атмосферы основная доля от изменения скорости объекта всегда приходится на последний участок его траектории при изменении высоты, соизмеримой с величиной приведенной высоты  $h$ . Поэтому в приближенных вычислениях формулы (3) – (5) вполне могут применяться далеко за пределами тех ограничений, которые накладывались при их выводе. К тому же, если траектория объекта становится все более крутой, то потери скорости при торможении, по крайней мере, для интересующих нас достаточно крупных объектов (класса Тунгусского метеороида), стремятся к 0 ( $v_f \rightarrow v_0$ ). Поэтому в такой ситуации какие-либо неточности в определении средней скорости практически перестают иметь сколько-нибудь существенное значение.

Алгоритмы, заложенные в модуль расчета взрывов и столкновений, довольно подробно описаны в источнике [4]. Таким образом, все параметры рассматриваемого процесса замыкаются через необходимое количество уравнений, и при известной траектории 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. В расчетах 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 на заданном удалении от эпицентра однозначно определяют характеристики взрыва, вызванного разрушением объекта.

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  $\varphi$  в точке 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 [3] также 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. Основным источником возможных погрешностей кроме предельно простой модели движения объекта в атмосфере является еще и то, что во «внешней» интерактивной части модели, описывающей

разрушение метеороидов в атмосфере [3], его движение рассматривается без учета кривизны земной поверхности, что для длинных плоских траекторий приводит к неточностям в определении угла входа. Поэтому для таких траекторий данный параметр является справочным, и его нельзя без поправок на отклонение нормали к земной поверхности в пределах длины траектории объекта сравнивать с результатами наблюдений.

Таким образом, описанная выше математическая модель позволила перейти от полной неопределенности и умозрительных спекуляций на тему инцидентов со входами небесных 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.

### **III. Способ получения максимально достоверных и точных траекторных параметров Челябинского метеороида**

Известно, что параметры орбиты Челябинского метеороида, полученные в первые 2 – 3 недели после инцидента и ставшие входными данными в расчетах, результаты которых представлены в работах [1, 2], характеризовались значительными разбросами (см., например, [12]). Данные, имеющиеся сейчас, являются более точными, однако, сравнение результатов из нескольких последних источников показывает, что разброс параметров в них хотя и уменьшился, но остался вполне заметным (см. [5, 6, 13, 14]). Поэтому при подготовке новых численных расчетов основное внимание уделялось достоверности и точности входных параметров численного алгоритма. Для этого, после консультаций со специалистами-астрономами, в качестве одного из трех необходимых для расчета входных параметров, описывающих орбиту Челябинского метеороида до столкновения с Землей (не считая известных данных, характеризующих пересечение орбит объекта и Земли), была выбрана скорость его входа в атмосферу. Эта величина была непосредственно получена с видеоизображений и, в силу этого, в принципе, содержала минимальные погрешности, вносимые алгоритмами вычисления и пересчета. Второй параметр – значение большой полуоси орбиты с высокой степенью точности получается из ее резонанса 13:6 с орбитой Земли (см. [1, 2]), практически бесспорные доказательства существования которого были приведены в работе [15]. Итак, величина большой полуоси орбиты Челябинского метеороида  $a = 1.674$  астрономической единицы (а. е.) известна из его периода обращения  $\tau = 13/6 = 2.167$  года ( $a \sim \tau^{2/3}$ ).

При нулевом угле наклона плоскости орбиты метеороида к плоскости эклиптики и при известной точке ее пересечения с орбитой Земли этих двух параметров вполне достаточно для определения орбиты объекта. Так как угол наклона орбиты к плоскости эклиптики по данным абсолютно всех источников был мал, то его возможные небольшие вариации влияли на параметры входа в атмосферу незначительно. Поэтому его чуть округленная величина  $i = 5.0^\circ$  была просто взята из работы [6].

Следовательно, осталось максимально точно определить по последним опубликованным данным скорость входа Челябинского метеороида в атмосферу Земли  $v$ . И тут снова возникли некоторые проблемы в связи с довольно заметными расхождениями даже этих новых и уточненных данных. Наименьшее значение величины скорости и наименьшая погрешность были заявлены Г. В. Ионовым –  $v = 18.85 \pm 0.09$  км/с по двум сериям измерений [13]. Были приведены также следующие значения этого параметра:  $v \approx 19.0$  км/с [5],  $v = 19.16 \pm 0.15$  км/с [6], а также  $v = 19.3 \pm 0.9$  км/с [14]. Принимая во внимание то, что точность результатов из источника [14], где была описана отработка нового метода траекторных измерений, как вполне определенно заявляет сам автор этой работы, на данный момент ниже, чем в других упомянутых здесь работах, они были исключены из сравнительного рассмотрения. Тем не менее, даже после этого из работ [5, 6, 13] следует, что точность определения величины скорости входа объекта в атмосферу не лучше  $0.3$  км/с –  $v = 19.0 \pm 0.3$  км/с.

Такой разброс значений скорости при заявленных в источниках [6, 13] погрешностях, не превышающих  $\pm 0.15$  км/с, позволяет утверждать, что, как минимум, в результатах одной из этих работ имеется систематическая ошибка величиной не меньше  $0.15$  км/с. Возможно, что она связана с применением к пологой и длинной траектории Челябинского метеороида типовых алгоритмов обработки траекторных данных («плоская» Земля, траектория в атмосфере – отрезок прямой), полностью адекватных только для достаточно крутых и/или коротких траекторий, которые ранее практически всегда и реализовывались для объектов, масштаб которых был намного меньше масштаба Челябинского метеороида. Другие замеченные проблемы и несоответствия в данных статьи [6], которые были рассмотрены в отдельной работе, посвященной исключительно критике источников [10], позволили придти к выводу, что эта систематическая ошибка имеется именно там. Отсюда следует, что наиболее точные данные по скорости входа были получены Г. В. Ионовым, сделавшим видеозапись полета Челябинского болида почти от порога своего дома

и потом многократно ночью переснимавшего небо с этой же позиции, уменьшив таким образом случайные погрешности своих измерений до уровня  $\pm 0.09$  км/с [13].

Итак, скорость входа Челябинского метеороида в соответствии с источником [13] в численных расчетах была принята равной 18.85 км/с, при этом перигелий исходной орбиты метеороида составил 0.746 а. е., афелий – 2.603 а. е., а эксцентриситет – 0.554 при большой полуоси, равной 1.674 а. е. Можно отметить, что величина большой полуоси орбиты Челябинского метеороида, используемая в этой работе, отличается от ее среднего значения по данным из четырех работ, приведенным в источнике [6], ( $a = 1.70 \pm 0.05$  а. е.) на 1.6 %, а от результата работы [14] ( $a = 1.67 \pm 0.10$  а. е.) – на 0.2 %. Для перигелия аналогичные сравнения таковы: источник [6] –  $q = 0.77 \pm 0.05$  а. е., то есть отличие составляет 3.2 %, источник [14] –  $q = 0.73 \pm 0.01$  а. е., отличие – 2.1 %. Так что имеется практически полное согласие между всеми этими данными в пределах их точности.

Кроме того, полученный в результате работы численного алгоритма базовый вариант при  $v = 18.85$  км/с затем был пересчитан на скорость, равную 19.00 км/с, и последствия этого возможного увеличения скорости входа метеороида были в статье проанализированы.

#### **IV. Способ получения максимально достоверных и точных данных, описывающих Челябинский взрыв**

Теперь необходимо уточнить количественные характеристики явлений, связанных с подлетом метеороида в «точку» взрыва, и с самим взрывом. Из наблюдений следует, что взрыв Челябинского объекта, вызванный его разрушением и очень резким торможением его обломков, лавинообразно дробящихся вплоть до мелких крошек и пыли, а затем испаряющихся и превращающихся в облако плазмы, происходил не одномоментно. Было замечено 2 пика электромагнитного излучения, обусловленных этим взрывным процессом. Из данных источника [6] следует, что второй, основной, пик излучения был зафиксирован на высоте около 30 км, а завершение процесса формирования огненного шара перед его превращением, как и при ядерных взрывах, в уже сравнительно слабо светящееся облако, произошло примерно на высоте 27 км. Из описания возникновения ударной волны и ее отрыва от огненного шара при ядерных взрывах (см., например [16]) следует, что и здесь ударная волна оторвалась от огненного шара в этом интервале высот в окрестности его нижней границы.

Математическая модель взрыва, применяемая в описываемом расчетном методе, является упрощенной. В ней взрыв небесного тела подобен ядерному, то есть происходит одномоментно и является сферически симметричным. Поэтому при расчетах необходимо указать именно ту «точку» взрыва, которая позволяет наилучшим образом аппроксимировать точечным взрывом значительно более сложный и длительный взрывной процесс. Это возможно сделать только варьированием основных расчетных параметров точечного взрыва в разумном диапазоне их изменения, сопоставляя при этом расчетные и наблюдаемые параметры, характеризующие распространение ударной волны, и получая наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных. При этом естественно полагать, что высота этого точечного взрыва лежит в интервале 27 – 30 км.

Средняя величина географических координат точки траектории Челябинского метеороида с высотой, соответствующей середине этого весьма короткого участка траектории, по очень близким данным из источников [1, 2, 6, 14] равна  $54.87^\circ$  северной широты и  $61.20^\circ$  восточной долготы. Отклонение по широте от данных, использованных в работах [1, 2], составляет  $0.02^\circ$ , а по долготе различий не оказалось совсем. Расчетное время взрыва не изменилось – 9:20:30 15 февраля 2013 года. Расчетный геодезический азимут траектории составил  $283.2^\circ$  [6] – это означает, что объект двигался в целом с востока на запад, отклоняясь к северу на  $13.2^\circ$ , что на  $1.3^\circ$  меньше, чем в ранних расчетах, с азимутом, определенным по следу метеороида.

Для того, чтобы начать численные расчеты в рамках описываемой модели, остается определить еще только один параметр – где-нибудь, но достаточно далеко от эпицентра взрыва необходимо знать перепад давления на ударной волне. И в ранних статьях автора [1, 2], и в вышедших позднее работах больших коллективов [5, 6] подобные параметры определялись по состоянию остекления зданий в зоне разрушений, то есть по наличию и/или доле разбитых оконных стекол в зоне действия ударной волны. На карте, приведенной в источнике [6], фрагмент которой представлен на рис. 1, по данным МЧС (светло-оранжевые точки), а также по полевым изысканиям соавторов статьи [6] (малиново-красные точки), показаны районы Челябинска и населенные пункты одноименной области, в которых оконные стекла были разбиты. Желтые точки на карте отмечают пункты выпадения мелких осколков метеороида, и в рассматриваемом контексте интереса сейчас интереса для нас не представляют. Не закрашенные точки показывают пункты, где значимых количеств разбитых стекол не было обнаружено.

Видно, что зона с разбитыми стеклами представляет собой нечто вроде несколько скругленного прямоугольника. Черная линия – это проекция траектории движения метеороида на земную поверхность. По интерактивной Яндекс-карте расстояние от эпицентра взрыва до максимально удаленного населенного пункта с разбитыми оконными стеклами в направлении, перпендикулярном проекции траектории полета, составило 105 км. То есть максимальный размер зоны разбитых стекол в этом направлении – около 210 км, а вдоль траектории ее размер был в 2.2 раза меньше – около 95 км.

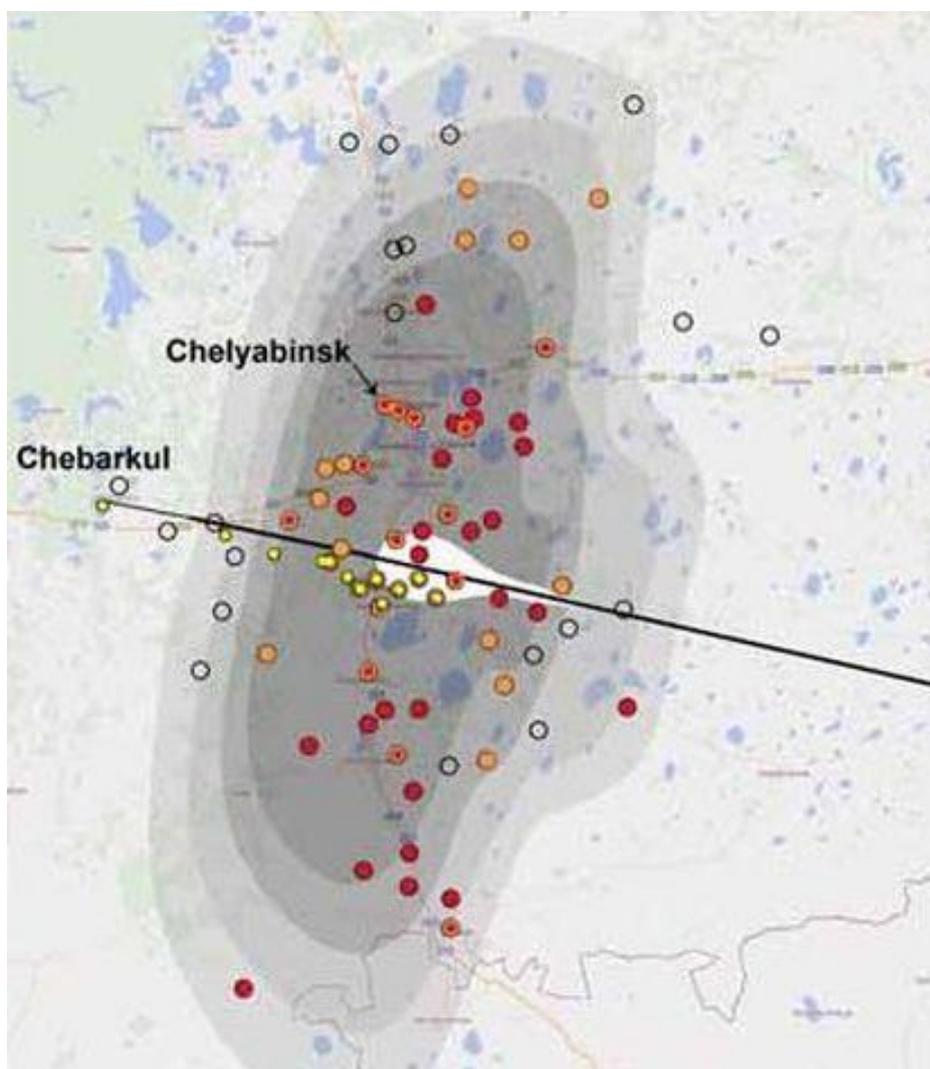


Рис. 1

Белая область на рис. 1 иллюстрирует изменение интенсивности излучения огненного шара по траектории полета, то есть, кривую блеска болида [6]. Серые области различной степени яркости показывают границы зон с постоянными перепадами давления на ударной волне, полученными при расчетах взрыва с помощью численного газодинамического кода [17] при условии, что энергия взрыва была распределена по траектории полета пропорционально кривой блеска [6]. Видно если не количественное, то, по крайней мере, качественное подобие этих расчетных границ с экспериментальной границей зоны массового разбития стекол. При точечном взрыве, несмотря на пологую траекторию полета метеороида, этот газодинамический код также как и другие аналогичные методы, дает практически круговую симметричную картину границ областей постоянного перепада давления на ударной волне (см. [1, 2, 6]).

Из представленных в работе [6] данных следует, что здесь, в отличие от в три с лишним раза менее высотного Тунгусского взрыва (см. [1, 2]), влияние баллистической ударной волны на подстилающую поверхность оказалось практически неразличимым. Далее, из того факта, что наклон траектории Тунгусского метеороида был в несколько раз больше, чем у Челябинского, нетрудно сделать вывод, что зона выделения взрывной энергии в том первом случае должна была быть значительно короче, и, поэтому, Тунгусский взрыв был значительно более «точечным». Поэтому, есть все основания заключить, что причины отклонения от круговой симметрии зон разрушения при Тунгусском и Челябинском инцидентах различны, и поэтому они так различаются по своей форме.

А здесь, у Челябинска, аппроксимация реальных границ зоны разрушения радиально-симметричными, требуемыми для работы используемого в алгоритме расчетного модуля [3], приводит к следующему граничному условию – перепад давления в ударной волне, необходимый для уверенного разбития стекол, равный 5.0 кПа [18], достигается на расстоянии 80 км от эпицентра взрыва. Эта дистанция была получена из условия равенства площадей реальной и модельной радиально-симметричной зон разрушения, что является достаточно очевидным приближенным способом такой оценки. Проверочные расчеты затем проводились при значениях радиуса разбития стекол от 74 до 86 км.

Однако, в другой обзорной работе нашлась значительно более точная информация о перепадах давления на ударной волне в пятне на местности с точно известными координатами. В источнике [5] сообщается, что в районе вокруг Челябинского цинкового завода доля разбитых стекол «указывает на перепад давления на ударной волне близкий к 7 – 8 кПа». Расположение на карте Челябинска и его окрестностей эпицентра взрыва (метка 1) и склада концентрата этого завода (метка 2), где произошло разрушение крыши, показано на рис. 2. Расстояние между ними составляет 39.5 км. Следует отметить, что ледовый дворец «Уральская молния» (метка 3), у которого утром 15 февраля 2013 года рухнула несущая балка, еще несколько балок были сильно погнуты, а из фасада была вырвана обшивка (не говоря уже о разбитых стеклах) [19], был расположен на расстоянии 35 км от эпицентра и практически на той же прямой, которая соединяет эпицентр взрыва со складом цинкового концентрата (отклонение от нее составляет не более 0.65 км, см. рис. 2).

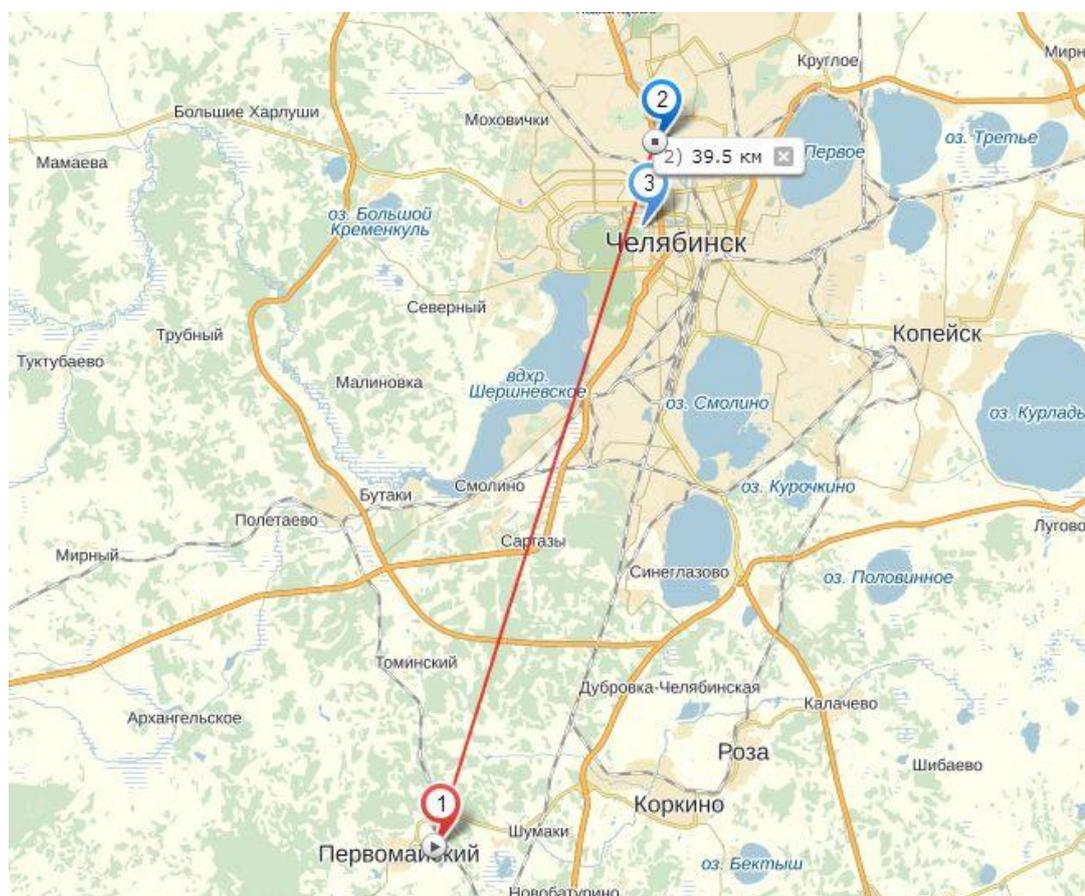


Рис. 2

Так как авторы работы [5] оценили по разбитым стеклам «средний по Челябинску» уровень перепада давления на ударной волне в  $3.2 \pm 0.6$  кПа, то величина перепада в  $7.5 \pm 0.5$  кПа в зоне, расположенной от эпицентра взрыва на несколько километров дальше, чем центр города, их несколько удивила. Они попытались объяснить его, применяя такие термины как «каустика» и «конструктивная акустическая интерференция». Однако просто слова, какими бы они глубокомысленными ни были бы сами по себе, без раскрытия реальных механизмов явления, ничего объяснить не могут. А ведь для человека, знакомого с отражением и интерференцией нелинейных ударных волн, которое качественно отличается от интерференции волн акустических, то есть линейных, эти механизмы достаточно прозрачны. Видимо, ни одного такого среди 33 соавторов работы [5] не нашлось. В этом контексте стоит отметить, что самая первая и уже очень давняя статья автора данной работы (написанная вместе с В.В. Келдыш) была посвящена

именно взаимодействию и пространственной интерференции скачков уплотнения, то есть ударных волн в той системе отсчета, в которой они оказываются неподвижными [20].

Элементарное знакомство с особенностями распространения ударных волн приводит к вполне очевидной мысли, что ударная волна от воздушного взрыва, высота которого соизмерима, а тем более, превышает удаление мишени от его эпицентра, взаимодействует с ней совсем не так, как ударная волна от низковысотного взрыва, где удаление мишени многократно больше, чем высота взрыва. Также очевидно то, что все ядерные взрывы, по данным которых были построены зависимости количества разбитых стекол от номинального перепада давления на ударной волне, являлись низковысотными, так что расстояние от них до зон, где имелаась возможность считать разбитые стекла при целых стенах зданий, было много больше, чем высота этих взрывов (типичная высота воздушного взрыва боезаряда с энергией порядка 1 Мт составляла, примерно, 1.5 км при характерном радиусе разбития им стекол около 20 – 40 км, см. [16, 18]). В таком случае, на повернутую в сторону взрыва грань препятствия, например, на стену дома с окнами, в этом масштабе рассматривания набегает прямая ударная волна, плоскость которой параллельна этой грани. Если же взрыв высотный, как у Челябинска, то непосредственно вдоль поверхности земли распространяется косая (наклоненная к этой поверхности) ударная волна, представляющая собой практически плоский в этом масштабе участок сферической ударной волны. При этом, чем дальше от эпицентра, тем больше становится ее наклон по отношению к горизонтальной поверхности (то есть она делается все менее «косой»).

В районе эпицентра взрыва ударная волна вообще падает сверху вниз на крыши домов, и в целом, в первом приближении, скользит вдоль их вертикальных стен, сравнительно слабо с ними взаимодействуя. При более точном рассмотрении этого процесса следует учесть разворот ударной волны на гранях препятствия, образованного плоской крышей дома, или на наборе косых граней, образованном островерхой крышей. Эта развернувшаяся и уже косая ударная волна затем отражается от земли с образованием новых косых ударных волн. И, в принципе, воздействие этих волн на стены зданий и окна можно определить численным расчетом для конкретной геометрии и взаимного расположения близко стоящих зданий. Однако даже без расчетов газодинамиком хорошо известно, что любая косая ударная волна является более «слабой», чем прямая, и ее воздействие на препятствие должно быть менее значительным. Именно поэтому доля разбитых стекол в районе эпицентра взрыва была далеко не стопроцентной [6]. Можно также отметить, что одна только снеговая нагрузка на крыши в данном регионе России соизмерима с максимальными оценками воздействия ударной волны от взрыва Челябинского метеороида в районе эпицентра, так что сохранность этих крыш не кажется необъяснимой [10].

Картина, подобная взаимодействию в окрестности эпицентра ударной волны с островерхой крышей, состоящей из двух или нескольких граней, будет реализовываться и при набегании этой волны на стандартную многоэтажную городскую застройку с плоской крышей при средних ракурсах подхода этой волны, когда высота взрыва и расстояния до него соизмеримы. Поэтому, пока вдоль земли распространяется косая ударная волна, доля разбитых ею оконных стекол будет значительно меньше, чем от прямой ударной волны низковысотного взрыва такой же энергии.

Итак, при мощном высотном взрыве на значительном расстоянии от эпицентра вдоль поверхности земли распространяется косая ударная волна, отражающаяся от твердой поверхности также косой ударной волной. Подобное отражение называется регулярным, и его схематично можно изобразить в виде буквы V, где косые штрихи изображают падающую и отраженную ударные волны. При этом по мере удаления от эпицентра угол наклона падающей волны по очевидным геометрическим соображениям растет, что в некоторый момент приводит к невозможности реализации регулярного отражения. С этого момента отражение становится так называемым маховским [21], которое схематично можно изобразить в виде буквы Y – между точкой (в плоском случае) или линией пересечения косых ударных волн (в трехмерном случае) и твердой поверхностью возникает так называемая «Маховская ножка» (вертикальная черточка у буквы Y), представляющая собой прямую ударную волну. Именно с этого момента высотный воздушный взрыв по своему воздействию на подстилающую поверхность становится эквивалентным низковысотному взрыву, и только тогда можно начинать сравнивать долю разбитых стекол из всех имевшихся ранее источников с тем, что получилось после взрыва Челябинского метеороида. И именно поэтому граничные условия в работах [1, 2] были установлены на таком большом расстоянии, где гарантированно обеспечивалось бы нерегулярное или маховское отражение ударной волны.

Все сказанное выше иллюстрирует тот простой и очевидный, но, видимо, неучтенный практически никем факт, что до тех пор, пока регулярное отражение ударной волны мощного высотного взрыва не сменилось маховским, для определения энергии этого взрыва нельзя использовать данные по разрушениям наземных объектов (в том числе и по доле разбитых стекол), полученные при распространении прямых ударных волн от низковысотных ядерных взрывов. Разбитые волной стекла можно сравнивать только для сравнимых ударных волн. Отсюда становится ясным, что именно там, где соавторы работы [5] нашли «аномальные» уровни перепада на волне в зоне «каустики», которая неизвестна для ударных волн,

реализовалась именно та картина взаимодействия волн с препятствиями, которая только и позволяет правильно интерпретировать наблюдаемые явления с помощью имеющихся данных по ранее наблюдавшимся мощным взрывам. При некотором желании переход от регулярного отражения к маховскому можно назвать «конструктивной интерференцией» падающей и отраженной волн, приводящей к значительному росту реального, а не номинального давления на вертикальных стенах, как это захотелось сделать авторам работы [5].

Теперь остается разобрать только один вопрос: почему эта «конструктивная интерференция» была замечена только в одном районе Челябинска? Для ответа на него обратимся к картам и спутниковым снимкам местности. Даже на крупномасштабной карте, представленной на рис. 2 видно, что по линии распространения ударной волны взрыва Челябинского метеороида на расстоянии около 35 км вплоть до спортивного дворца «Уральская молния» лежат почти исключительно незастроенные равнины, покрытые полями или лесами. На этой линии оказывается также прибрежная часть Шершнёвского водохранилища, в момент взрыва покрытого льдом, а далее располагается Челябинский городской бор (зеленое пятно на рис. 2, пересекаемое красной линией). Если же пройти по всей этой линии, наблюдая спутниковые фотографии местности при максимальном разрешении, можно увидеть, что даже в том случае, когда на ней все же попадаются небольшие районы застройки, все они образованы одноэтажными домами дачно-сельского типа, а серьезные препятствия – высокие многоэтажные здания вплоть до Челябинского цинкового завода можно пересчитать по пальцам одной руки.

Таким образом, косая ударная волна от высотного взрыва распространялась вдоль поверхности земли практически без потерь энергии на препятствиях, а ее высокая интенсивность была зафиксирована массой разбитых стекол только после того, как она превратилась в обычную для наблюдавшихся ранее мощных взрывов прямую ударную волну. Восточнее же, в направлении на центр Челябинска и его восточные районы на пути еще косой ударной волны располагались большие массивы высоких многоэтажных домов, проход через которые сопровождался возникновением множественных локальных падающих и отраженных волн и их взаимодействиями между собой и с новыми препятствиями. Подобная экранировка серьезно повлияла на геометрию приземной части ударной волны, в среднем снизив уровни давления и величину разрушений в тех «заэкранированных» районах города и, видимо, полностью преобразовала описанный выше модельный переход на гладкой твердой поверхности от регулярного отражения ударной волны к маховскому в нечто существенно более сложное и хаотическое.

Следует также отметить, что до Челябинского взрыва было только 2 случая прохождения сильных ударных волн через сплошную городскую застройку на протяжении километров – в Хиросиме и Нагасаки, и, в значительно меньшем масштабе, по-видимому, еще 2, в Галифаксе и Техас-Сити [22 – 24]. Но там энергия взрывов была в несколько тысяч или десятков тысяч раз меньше, чем при взрыве над Челябинском, и длины пробега интенсивных волн были, как минимум, на порядок – полтора меньшими. Кроме того, основная застройка этих двух японских городов состояла из одно-двухэтажных деревянных домиков [22]. Это резко контрастирует с многоэтажными домами в Челябинске. Известные соотношения между количеством разбитых стекол и перепадами давления на волне были выведены по данным о распространении ударных волн по городской застройке Хиросимы и Нагасаки, или вообще по голой степи Семипалатинского полигона с отдельно стоящими зданиями-мишенями, когда затухание этих волн из-за препятствий было слабым. Вследствие этого такие данные не вполне адекватны для всего Челябинска, а только для направления на «Уральскую молнию» и цинковый завод, где имеются обширные зоны без многоэтажной застройки. Это утверждение справедливо даже без учета различия воздействия на препятствия прямой и косой ударных волн.

В рассматриваемом контексте следует также отметить, что существует еще один фактор, из-за которого высотный взрыв оказывает значительно меньшее влияние на подстилающую поверхность, чем приземный взрыв с той же энергией при равных удалениях от центра взрыва. Это – уменьшение плотности атмосферы в точке взрыва при росте его высоты. Для высот 25 – 30 км только этот фактор может привести к уменьшению перепада давления на подстилающей поверхности в несколько раз. Влияние этого фактора было подробно исследовано в статье [10].

Дальнейшие расчеты продемонстрировали, что условие  $p = 7.5 \pm 0.5$  кПа на удалении 39.5 км от эпицентра взрыва практически эквивалентно условию  $p = 5.0$  кПа на удалении  $80 \pm 6$  км, что прекрасно согласуется с ранее сделанными оценками модельной зоны поражения. Таким образом, предыдущий анализ показывает, что величины перепада давления на ударной волне 7 – 8 кПа в районе Челябинска, лежащего в окрестностях цинкового завода [5], являются наиболее точным известным граничным условием при решении рассматриваемой задачи.

## V. Результаты расчетов параметров Челябинского и Тунгусского метеороидов и характеристик их взрывов

Было выполнено несколько десятков расчетов различных вариантов входов в атмосферу и взрывов Челябинского и Тунгусского метеороидов, и результаты 11 из них как наиболее представительные показаны ниже в таблицах 1 – 4. В таблицах 1 – 2 продемонстрировано влияние изменения высоты точечного взрыва на характеристики Челябинского метеороида (ЧМ), а также на перепад давления на ударной волне от его взрыва на нескольких расстояниях от эпицентра. Как было указано в разделе II этой работы, скорость входа объекта в атмосферу составляла 18.85 км/с. Минимальная высота точечного взрыва, аппроксимирующего реальный взрыв Челябинского метеороида равна, как было показано выше, 27.0 км. В расчетах от этого значения она увеличивалась с шагом 0.5 км при граничном условии 5.00 кПа на расстоянии 80.0 км от эпицентра взрыва. Номинальная высота атмосферы при этом принималась равной 90.0 км, что, по данным [3, 4] приблизительно соответствует началу ее воздействия на объект рассматриваемого типа.

В таблице 1 показаны: var – вариант расчета Челябинского метеороида (ЧМ), H – высота взрыва в километрах,  $\delta$  – угол входа объекта в атмосферу на ее внешней границе в градусах,  $\rho$  – средняя 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,  $E_c$  – энергия взрыва объекта в тех же единицах.

Таблица 1

var	H (км)	$\delta$ (°)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	D (м)	m (Мт)	$E_0$ (Мт)	$E_c$ (Мт)
ЧМ-1	27.0	7.22	870	158.5	1.81	76.6	52.6
ЧМ-2	27.5	7.19	740	167.5	1.82	77.3	54.4
ЧМ-3	28.0	7.17	630	177	1.83	77.8	56.2
ЧМ-4	28.5	7.14	540	187	1.85	78.3	57.8
ЧМ-5	29.0	7.11	460	197.5	1.86	78.9	59.6

Как следует из таблицы 1, увеличение высоты точечного воздушного взрыва с 27 до 29 км при указанных условиях приводит уменьшению угла входа объекта в атмосферу на 0.1° и падению плотности вещества объекта в 1.9 раза – с 870 до 460 кг/м<sup>3</sup>. При этом диаметр его растет примерно на 25 % – со 160 до 200 м, при одновременном увеличении его массы и кинетической энергии на входе в атмосферу на 3 %: m = 1.81 – 1.86 Мт,  $E_0$  = 76.6 – 78.9 Мт в тротиловом эквиваленте. Таким образом, эта энергия увеличивается на 2.3 Мт, в то время как энергия взрыва  $E_c$  возрастает более интенсивно – с 52.6 до 59.6 Мт, то есть на 7.0 Мт или на 13 % от первоначальной величины. Это связано со снижением потерь энергии менее плотного метеороида при его торможении на больших высотах, то есть при меньшей плотности атмосферы.

В таблице 2 приведены значения основного на этих расстояниях фактора влияния ударной волны взрыва на наземные препятствия – перепада давления на ней. Здесь: 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 того столбца, где приведены значения перепадов давления.

Таблица 2

var	L <sub>0</sub> (км)	p <sub>0</sub> (кПа)	L <sub>1</sub> (км)	p <sub>1</sub> (кПа)	L <sub>2</sub> (км)	p <sub>2</sub> (кПа)	L <sub>3</sub> (км)	p <sub>3</sub> (кПа)	L <sub>4</sub> (км)	p <sub>4</sub> (кПа)
ЧМ-1	0	11.6	20	9.4	35	8.1	39.5	7.67	80	5.0
ЧМ-2	0	11.4	20	9.3	35	8.0	39.5	7.60	80	5.0
ЧМ-3	0	11.2	20	9.2	35	7.9	39.5	7.53	80	5.0
ЧМ-4	0	11.0	20	9.0	35	7.8	39.5	7.46	80	5.0
ЧМ-5	0	10.8	20	8.9	35	7.7	39.5	7.39	80	5.0

В эпицентре (при L<sub>0</sub> = 0) на поверхности земли реализуются максимальные перепады давления на ударной волне. Чем мощнее и выше взрыв, тем они ниже. Дистанция L<sub>1</sub> = 20 км является характерной для Тунгусского взрыва, сравниваемого здесь с Челябинским, дистанция L<sub>2</sub> = 35 км примерно соответствует расстоянию до центра Челябинска, а также до ледового дворца «Уральская молния». На удалении L<sub>3</sub> = 39.5 км расположен Челябинский цинковый завод, дистанция L<sub>4</sub> = 80 км – это расстояние, на котором проходит граница расчетного перепада давления в 5.0 кПа для круговой зоны точечного взрыва, аппроксимирующей реальную зону разрушений.

Даже в эпицентре номинальный перепад на прямой ударной волне не достигал 12 кПа, на расстоянии 35 км (в центре Челябинска) он был уже около 8 кПа и ниже, а в зоне цинкового завода уровень давления

составил 7.7 – 7.4 кПа. Как указывалось ранее, именно здесь после реализации маховского отражения и возникновения у поверхности земли прямой ударной волны реализуются условия, сопоставимые с теми, что имели место при мощных низковысотных взрывах. Так как именно для этих условий приводятся все данные по разбитию оконных стекол во всех имевшихся до сих пор материалах, именно эта зона и должна использоваться для окончательной настройки параметров расчетной модели, наилучшим образом описывающей произошедшее в реальности явление.

При анализе данных из таблицы 2 следует понимать, что представленные там значения являются максимальными давлениями на фронте ударной волны, набегающей на поверхность, расположенную нормально к волне. При этом предполагается, что волна не ослаблена из-за рассеивания и многократных переотражений на препятствиях, лежащих ближе к эпицентру взрыва. Как уже описывалось выше, более-менее подобные условия в Челябинске реализовались только на направлении от эпицентра на Челябинский цинковый завод, а в остальных районах города из-за рассеивания энергии на многочисленных препятствиях реальные значения максимального давления на волне должны были быть ниже представленных в таблице 2 их номинальных значений.

Из данных таблицы 2 следует, что перепад давления на волне в 7.50 кПа на расстоянии 39.5 км (средний по данным источника [5]) реализуется при высоте взрыва 28.2 км. Это прекрасно согласуется с предварительными оценками: «на интервале от 27 до 30 км, но ближе к нижней границе высот», а также с данными источника [14]. Затем были проведены расчеты взрывов метеороида на высоте 28.2 км и при перепаде давления на ударной волне на расстоянии 39.5 км от 7.0 до 8.0 кПа. При этом была также скорректирована высота номинальной атмосферы: она была увеличена с 90.0 до 91.2 км. Итерационная расчетная процедура показала, что именно эта высота атмосферы соответствует началу ее воздействия на базовый (основной) вариант Челябинского метеороида ЧМ-7 (см. таблицу 3), взрыв которого и создает на указанной дистанции перепад давления в 7.50 кПа. Далее все расчеты проводились именно при такой высоте условной атмосферы. При этом можно отметить, что условный перигей расчетной траектории находился на высоте 28.07 км, то есть практически совпадал с высотой взрыва.

Расчетные данные для трех вариантов Челябинского объекта при давлениях на волне 7.00 кПа, 7.50 кПа и 8.00 кПа на дистанции  $L_3 = 39.5$  км представлены в первых трех строках таблиц 3 и 4. Величины и обозначения в них те же, что и раньше. Жирным шрифтом выделены базовые варианты Челябинского и Тунгусского метеороидов.

Таблица 3

var	v (км/с)	i (°)	H (км)	$\delta$ (°)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	D (м)	m (Мт)	$E_0$ (Мт)	$E_c$ (Мт)
ЧМ-6	18.85	5.00	28.2	7.22	635	173	1.71	72.7	52.1
ЧМ-7	<b>18.85</b>	<b>5.00</b>	<b>28.2</b>	<b>7.22</b>	<b>570</b>	<b>182.5</b>	<b>1.82</b>	<b>77.4</b>	<b>56.8</b>
ЧМ-8	18.85	5.00	28.2	7.22	515	193	1.93	82.1	61.8
ТМ-1	<b>18.72</b>	<b>- 5.00</b>	<b>8.25</b>	<b>50.5</b>	<b>570</b>	<b>105</b>	<b>0.35</b>	<b>14.6</b>	<b>14.4</b>
ЧМ-9	19.00	5.00	28.2	7.25	580	181	1.80	77.5	56.7
ТМ-2	18.87	- 5.00	8.33	50.0	580	104.5	0.35	14.8	14.6

Углы входа  $\delta$  во всех трех вариантах расчетов (ЧМ-6 – ЧМ-8) совпадают с точностью до третьего знака после десятичной точки. При этом плотность объектов  $\rho$  с ростом перепада давления на заданной дальности уменьшается на 23 % – с 635 до 515 кг/м<sup>3</sup>, а его диаметр D увеличивается на 11.5 % – со 173 до 193 м. Соответственно, масса m растет практически на такую же величину, а энергия взрыва  $E_c$ , обеспечивающая требуемое давление, увеличивается на 19 %. При этом достигается динамическое равновесие в точке разрушения метеороида и его взрыва: более крупный, но менее плотный объект разрушается на той же высоте, что и меньший, но более плотный. Рост масс и энергий объекта при увеличении перепада давления на ударной волне на заданном расстоянии от эпицентра взрыва вполне естественен. При перепаде давления 7.50 кПа масса базового расчетного варианта Челябинского метеороида ЧМ-7 составляет 1.82 Мт при диаметре 182.5 м, а энергия его взрыва – 56.8 Мт в тротиловом эквиваленте, что только на 1.0 Мт (на 1.8 %) меньше, чем в раннем расчете [1, 2]. При этом его полная энергия  $E_0$  оказалась на 2.5 % выше вследствие большей начальной скорости полета.

Таблица 4

var	L <sub>0</sub> (км)	P <sub>0</sub> (кПа)	L <sub>1</sub> (км)	P <sub>1</sub> (кПа)	L <sub>2</sub> (км)	P <sub>2</sub> (кПа)	L <sub>3</sub> (км)	P <sub>3</sub> (кПа)	L <sub>4</sub> (км)	P <sub>4</sub> (кПа)
ЧМ-6	0	10.3	20	8.5	35	7.3	39.5	7.00	73.9	5.0
ЧМ-7	<b>0</b>	<b>11.1</b>	<b>20</b>	<b>9.1</b>	<b>35</b>	<b>7.9</b>	<b>39.5</b>	<b>7.50</b>	<b>80.0</b>	<b>5.0</b>
ЧМ-8	0	12.0	20	9.8	35	8.4	39.5	8.00	85.5	5.0
ТМ-1	<b>0</b>	<b>82.9</b>	<b>20</b>	<b>30.0</b>	<b>35</b>	<b>11.8</b>	<b>39.5</b>	<b>9.8</b>	<b>63.4</b>	<b>5.0</b>
ЧМ-9	0	11.1	20	9.1	35	7.8	39.5	7.50	80.0	5.0
ТМ-2	0	81.6	20	30.0	35	12.0	39.5	9.9	63.8	5.0

Перейдем теперь к Тунгусскому метеороиду и его взрыву. Ранее в работе [15] была доказана возможность общности его происхождения с Челябинским метеороидом, так как оба они являются членами одного и того же семейства кометных обломков. Это приводит к близости орбит двух данных объектов. Поэтому для оценки характеристик Тунгусского объекта была использована та же орбита, что и для Челябинского метеороида за единственным исключением – угол наклона ее плоскости  $i$  получил противоположный знак (см. таблицу 3). Тогда, по оценкам, при сохранении долготы перигелия орбиты можно обеспечить ее пересечение с орбитой Земли в конце июня – начале июля, то есть в первое окно сближения с ней роя обломков ядра кометы, к которому принадлежали оба рассматриваемых здесь метеороида [15]. После этого, применив описываемую расчетную модель, можно сравнить полученные расчетные результаты с теми, что известны из многочисленных работ, посвященных Тунгусскому феномену, и выяснить, насколько было справедливо это предположение.

Взрыв Тунгусского метеороида (ТМ в таблицах 3 и 4) произошел летом 1908 года – 30 июня при ином взаимном расположении оси вращения Земли и вектора скорости объекта, в первое, а не во второе, как у Челябинского метеороида, окно сближения – при подходе объекта к Земле из внешней области Солнечной системы. Это 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:  $60.89^\circ$  северной широты и  $101.90^\circ$  восточной долготы [1, 2]. 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 геодезическом азимуте  $279^\circ$  ( $9^\circ$  наклона траектории к параллели на север в точке взрыва) [1, 2] он при указанных параметрах орбиты оказался равен  $50.5^\circ$ .

Для Тунгусского взрыва имеются два граничных условия на ударной волне: перепад давления, равный 30 кПа на расстоянии 20 км от эпицентра взрыва, что является аппроксимацией границы зоны лесоповала (без учета «крыльев бабочки» – зон, вызванных баллистической ударной волной) [1, 2], и стандартная граница массового разбития стекол с уровнем перепада давления 5.0 кПа – около 63.5 км. Именно на такой дистанции от эпицентра взрыва (63 – 64 км) расположен поселок (фактория) Ванавара. Очевидцы, ее жители, сообщали следующее: «Потом оказалось, что многие стекла в окнах выбиты» [25]. Таким образом, скорости и угла входа Тунгусского метеороида, которые были получены из астрономического блока численного метода расчета, и этих двух условий на ударной волне вполне достаточно для проведения вычислений аналогичных тем, что были выполнены ранее для Челябинского метеороида.

Подобные крутые траектории входа считаются гораздо проще и быстрее, чем пологие. При этом для получения более точных данных в отличие от ранних расчетов [1, 2] и здесь в полной мере применялся модуль расчета скорости на атмосферном участке траектории. На крутой и короткой траектории приближенность алгоритма этого модуля уже почти не оказывает влияния на конечный результат, так как само влияние атмосферы на траекторию вплоть до взрыва объекта является минимальным. Это видно из того, что его энергия на атмосферном участке траектории уменьшилась всего на 1.4 % (см. строку ТМ-1 таблицы 3).

Интерактивный модуль, описывающий разрушение метеороидов в атмосфере [3, 4], работает в рамках «плоской земли». Это, как уже упоминалось выше, вносит дополнительную погрешность в результаты вычислений длинных и плоских траекторий. То есть, вычисленные углы входа Челябинского метеороида отличаются от реальных, и они могут считаться только оценками (с учетом кривизны Земли для базового варианта ЧМ-7 угол входа равен  $15.6^\circ$ , что достаточно близко к значению  $18.3^\circ$  из источника [6]). Но данные расчетов крутой и короткой траектории Тунгусского метеороида являются практически точными, а все их возможные погрешности определяются только отклонением его расчетной орбиты от реальной, которая, конечно, могла и даже должна была несколько отличаться от орбиты Челябинского метеороида не только углом некомпланарности с плоскостью эклиптики. Тем более важным фактом при всех этих обстоятельствах является то, что средние плотности обоих небесных тел после проведения этих расчетов оказались совершенно одинаковыми – около  $570 \text{ кг/м}^3$ , см. строки ЧМ-7 и ТМ-1 таблицы 3, что является необходимым условием признания общности происхождения Тунгусского и Челябинского метеороидов. Следовательно,

значение плотности достаточно правильно было вычислено и для Челябинского метеороида. Это также означает, что в представленном подходе нет внутренних противоречий, а неизбежные расчетные ошибки незначительны. Здесь можно отметить также то, что оценка энергии Тунгусского взрыва по сейсмограммам приводит к величине его энергии  $12.5 \pm 2.5$  Мт, а по барограммам –  $12 \pm 2.5$  Мт [26, 27], что находится в хорошем согласии с полученным в расчетах значением – 14.4 Мт (см. строку ТМ-1 таблицы 3). Таким образом, предположение о единстве происхождения и близости орбит Челябинского и Тунгусского метеороидов приводит к правильным значениям энергии взрыва последнего.

В целом, диаметр у Тунгусского метеороида оказался, примерно, в 1.75 раза меньше, чем у Челябинского, его масса – в 5.2 раза меньше, а энергия взрыва – в 3.9 раза меньше (ср. строки ЧМ-7 и ТМ-1 таблицы 3). Но, так как взрыв произошел на высоте в 3.4 раза меньшей, его воздействие на подстилающую поверхность было не в пример более сильным. В эпицентре перепад давления на прямой ударной волне у него был по расчетам в 7.5 раз больше, чем при взрыве Челябинского метеороида (см. строки ЧМ-7 и ТМ-1 таблицы 4). При взрыве у Челябинска максимальный перепад давления у поверхности земли в 10 – 11 кПа, по имеющимся данным, выдержали все крыши в окрестности эпицентра. А на стекла там действовал значительно меньший перепад давления, что было достаточно подробно разъяснено в предыдущем разделе работы, и разбитых стекол там было относительно немного. Напротив, в Тунгусской тайге был сплошной лесоповал в радиусе не менее 20 км за исключением самого эпицентра, где стоял мертвый лес стволов деревьев совершенно без веток [26]. По мере удаления от эпицентра происходит постепенное сближение перепадов давления обоих взрывов, и, на расстоянии 51.5 км от эпицентра они сравниваются. На больших расстояниях более сильная волна была у существенно более мощного и значительно более высотного Челябинского взрыва/

Увеличение расчетной скорости входа в атмосферу Челябинского метеороида с 18.85 до 19.00 км/с в целом оказало на его характеристики незначительное влияние (ср. строки ЧМ-7 и ЧМ-9 в таблице 3). Чуть уменьшился размер, чуть увеличились плотность и угол входа, а оба рассматриваемые значения энергии практически не изменились. Перепады давления на ударной волне также остались практически прежними (ср. строки ЧМ-7 и ЧМ-9 в таблице 4). Примерно аналогично, но несколько более заметно повлияло бы на характеристики Тунгусского метеороида соответствующее увеличение скорости с 18.72 до 18.87 км/с (ср. строки ТМ-1 и ТМ-2 в таблицах 3, 4). Энергия его взрыва при этом возросла бы на 0.2 Мт до 14.6 Мт, то есть на 1.4 %.

Любому, представляющему процессы эволюции ядер комет и их обломков должно быть ясно, что приводимые в других источниках значения плотности –  $3300 \text{ кг/м}^3$  (см., например, [6]) относятся к внешней поверхностной хондритной корке метеороида. Она возникает при абляции под действием солнечного излучения загрязненного хондритами снежно-ледяного композита, из которого, в основном, состоят ядра комет и, соответственно, их обломки. Поэтому плотность относительно тонкой корки (порядка полуметра – метра по размерам крупнейшего сохранившегося осколка Челябинского метеороида, см., например, фотографии из Челябинского краеведческого музея [28]) никак не характеризует среднюю плотность объекта до разрушения. Очевидно, что только малая часть этой корки сохранилась после взрыва, а снег и лед – основная часть вещества метеороида, испарились полностью. И по этим ничтожным остаткам особого тонкого поверхностного слоя крупного объекта нельзя судить о его средней плотности. Можно отметить, что расчетная средняя плотность Челябинского и Тунгусского обломков кометы находится на уровне, согласующемся с известными данными по ядрам комет (см., например, [29 – 31]).

## VI. Обсуждение результатов

Итак, утром 15 февраля 2013 года в небе вблизи Челябинска на высоте около 28 км (28.2 км для модельного точечного взрыва) взорвался объект с поперечным размером примерно 180 – 185 м, плотностью около  $570 \text{ кг/м}^3$  и массой примерно 1.8 Мт. Энергия взрыва с учетом максимальных погрешностей в оценке величины перепада давления на ударной волне с погрешностью  $\pm 0.5$  кПа составила  $56.8 \pm 4.9$  Мт в тротиловом эквиваленте. Таким образом, энергия взрыва в небе при Челябинске оказалась практически равна энергии самого мощного термоядерного взрыва так называемой Царь-бомбы, составившей 58 Мт (другие обозначения боезаряда – АН602, Кузькина мать), произведенного Советским Союзом 30 октября 1961 года на Новой Земле [32]. Определение энергии Челябинского взрыва с помощью акустических методов приводит к величине, совпадающей с рассчитанной здесь, но с меньшими погрешностями – 56.8 ± 1.1 Мт [33]. Это и есть наиболее точная оценка энергии этого взрыва.

За 104.6 года до этого 30 июня 1908 года над Подкаменной Тунгуской взорвался метеороид заметно меньшего размера, однако, до сих пор ошибочно считавшийся самым крупным небесным телом, вошедшим в атмосферу Земли в историческое время. При той же плотности его минимальный поперечный размер составлял около 105 м, а масса – 0.35 Мт. Энергия его взрыва была около 14.4 Мт, но вследствие в 3.4 раза меньшей высоты, на которой он произошел, и составлявшей 8.25 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 [34]. Полученная в работе энергия его взрыва находится также в границах 10 – 15 Мт, определенных по сейсмическим данным и барограммам [26, 27]. Совпадение плотностей этих двух метеороидов, а также согласование полученных в этой работе данных с наиболее достоверными оценками энергии Тунгусского взрыва являются основаниями для того, чтобы признать возможным общность их происхождения и близость орбит.

То, что оба этих объекта являлись членами одного семейства кометных обломков, было в качестве гипотезы изложено в статьях [1, 2] и доказано в статье [15]. Вследствие близости орбит членов этой группы, названной семейством Тунгуса, при минимальной информации характеристики любого из них могут быть рассчитаны методом из данной работы с хорошей степенью точности. То же может быть проделано и с характеристиками объектов другого родственного семейства – семейства Орла [15]. Таким образом, эта работа снова подтверждает изложенную сразу после Челябинского инцидента концепцию существования двух семейств кометных обломков, угрожавших в историческом прошлом и все еще угрожающих Земле вплоть до настоящего времени [35].

Различие между показанными здесь характеристиками Челябинского метеороида и тем, что было представлено в некоторых иных работах на эту тему (см., например, [5, 6]), растиражированных средствами массовой информации в бесчисленном количестве экземпляров, чрезвычайно велико. Однако, все эти различия тщательно рассмотрены в статье [10], где доказана ошибочность наиболее широко распространенной точки зрения. Краткое и наглядное представление самых очевидных и понятных по существу даже без всяких вычислений на чисто интуитивном уровне доказательств этого можно увидеть в статье [36].

## 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 составлял 182.5 метра, а его масса была близка к 1.82 мегатонны. Энергия его взрыва была равна  $56.8 \pm 1.1$  мегатонны в тротиловом эквиваленте.
3. Размер Тунгусского объекта оказался близок к 105 метрам, масса – к 0.35 мегатонны, а энергия взрыва – к 14.5 мегатонны.
4. Вследствие общности происхождения этих двух небесных тел их средняя плотность была одинакова и составляла около  $570 \text{ кг/м}^3$ .
5. Эта математическая модель может быть использована также для расчетов характеристик других небесных тел, входящих в атмосферу Земли, для того, чтобы догадки, предположения и мифы заменить действительно научными данными.

## Литература

1. Ю. И. Лобановский – Параметры Челябинского и Тунгусского объектов и характеристики вызванных ими взрывов. *Synerjetics Group*, 12.04.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/objects.htm>
2. Yu. I. Lobanovsky – Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *Arxiv.org*, 08.07.2013 // <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
3. 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](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)
4. 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>
5. P. G. Brown et al – A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, **503**, no 7475, 14.11.2013 // <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
6. O. P. Popova et al – Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, **342**, no 6162, 29.11.2013 // <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
7. Yu. Lobanovsky – Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes. *Arxiv.org*, March 28, 2014 // <http://arxiv.org/abs/1403.7282>

8. В. И. Левантовский – Механика космического полета в элементарном изложении. Москва, Наука, 1980.
9. Ю. И. Лобановский – Асимптотический метод расчета захвата объекта системой двух небесных тел. *Synerjetics Group*. Декабрь 2003 // <http://synerjetics.ru/article/capture.htm>
10. Ю. И. Лобановский – Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. *Synerjetics Group*, 14.02 – 30.01.2016 // [http://www.synerjetics.ru/article/springs\\_critique.htm](http://www.synerjetics.ru/article/springs_critique.htm)
11. L. C. Andrews – Special functions of mathematics for engineers. Oxford University Press, 1998.
12. J. Zuluaga, I. Ferrin – A Preliminary Reconstruction of the Orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. *Arxiv.org* // <http://arxiv.org/pdf/1302.5377v1.pdf>
13. Г. В. Ионов – Расчет геометрических характеристик траектории Челябинского болида по записям автомобильных видеорегистраторов. *Международная научно-практическая конференция «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль»*, Чебаркуль, июнь 2013.
14. А. В. Голубаев – Основные характеристики движения метеороида при выпадении Челябинского метеоритного дождя 15 февраля 2013 года. *Астрономический Вестник*, 2015, **49**, N 3.
15. Ю. И. Лобановский – Кометно-метеоритная угроза: исторический аспект. *Synerjetics Group*, 30.07.2013 – 30.03.2015 // <http://www.synerjetics.ru/article/history.htm>
16. Атмосферный ядерный взрыв. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный\\_ядерный\\_взрыв](http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв)
17. V. V. Shuvalov – Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect. *Shock Waves*, **9**, 1999.
18. Ю. И. Лобановский – Оценка адекватности условий на ударной волне вдали от эпицентра взрыва. *Synerjetics Group*, 19.04.2013 // <http://synerjetics.ru/article/border.htm>
19. Сегодня в Челябинске официально открыли ледовый дворец «Уральская молния». *Snopm@mail.ru*, 20.09.2013 // <http://sport.mail.ru/news/skating/14851524/>
20. В. В. Келдыш, Ю. И. Лобановский – Некоторые особенности пространственных течений с мостообразными скачками уплотнения. *Ученые записки ЦАГИ*, **7**, N 5, 1976 // <http://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-osobennosti-prostranstvennyh-techeniy-s-mostooobraznymi-skachkami-uplotneniya>
21. Основы газовой динамики, под ред. Г. Эммонса. Москва, Издательство Иностранной Литературы, 1963.
22. Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_bombings\\_of\\_Hiroshima\\_and\\_Nagasaki](http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki)
23. Halifax Explosion. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Halifax\\_Explosion](http://en.wikipedia.org/wiki/Halifax_Explosion)
24. Texas City disaster. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Texas\\_City\\_disaster](http://en.wikipedia.org/wiki/Texas_City_disaster)
25. В. А. Бронштэн – Тунгусский метеорит: история исследования. Сельянов А. Д., 2000.
26. В. А. Бронштэн – Метеоры, метеориты, метеороиды. Глава 4. Тунгусский метеорит. Москва, Наука, 1987 // <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>
27. A. Ben-Menahem – Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, **11**, no. 1, 1975 // <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
28. И. Абрамова – Метеорит: увидеть и не умереть. *Челябинский государственный краеведческий музей. Новости*, 24.10.2013 // <http://www.chelmuseum.ru/news/uvidet-i-ne-umeret/?filter=past&page=2>
29. A. Ball, S. Gdomski 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](http://www.people.fas.harvard.edu/~planets/sstewart/ahrens/Papers_pdf/Seismo_2033.pdf)
30. B. Davidsson, P. Gutieres – 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. Gutieres and others – Bulk Density of Comet 9P/Tempel 1. *SAO/NASA ADS Astronomy Abstract Service* // <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010DPS....42.2834S>
32. Царь-бомба. *Wikipedia* // <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
33. Ю. И. Лобановский – Акустические способы оценки энергии мощных взрывов. *Synerjetics Group*, 20.07. 2013 – 26.01.2014 // <http://synerjetics.ru/article/acoustics.htm>
34. 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](http://www.smoliy.ru/view_alonetext.php?g=74&outpdf)
35. Ю. И. Лобановский – Первоочередная задача оценки остроты кометно-метеоритной угрозы. Меморандум, *Synerjetics Group*, 28.03.2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/memorandum.htm>
36. Ю. И. Лобановский – Каким был Челябинский метеороид на самом деле? *Synerjetics Group*, 10.07.2014 // [http://www.synerjetics.ru/article/two\\_arguments.htm](http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm)