

Параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и переоценка степени кометно-метеоритной угрозы

© Ю.И. Лобановский

ПАО «Корпорация «Иркут», Москва, 125315, Россия

Описано применение математической модели, связывающей параметры движения небесных тел с их массоэнергетическими характеристиками и характеристиками взрывов, вызванных их разрушением в атмосфере. Модель была использована для расчета параметров метеороидов, вызвавших Челябинский и Тунгусский инциденты. При этом предполагалась близость их орбит, так как временной интервал между этими событиями согласуется с периодом обращения Челябинского метеороида. Расчеты показали, что диаметр Челябинского метеороида 180–185 м, масса близка к 1,8 Мт; энергия взрыва составила около 57 Мт в тротиловом эквиваленте. Диаметр Тунгусского метеороида оказался близок к 105 м, масса — 0,35 Мт, а энергия взрыва — приблизительно 14,5 Мт. Средняя плотность метеороидов оказалась одинаковой — около 570 кг/м³, что указывает на общность происхождения этих небесных тел.

Ключевые слова: Челябинский метеорит, Тунгусский метеорит, комета, метеороид, траектория, взрыв, энергия, ударная волна.

Введение. Идея о том, что небесные тела время от времени сталкиваются с Землей, вызывая катастрофические последствия, была популярна еще в античное время. Но в XIX в. подобные представления изменились, после того как Ч. Дарвин выпустил в свет сочинение «Происхождение видов» — развитие биосферы Земли стали представлять как чисто эволюционный процесс [1]. Однако около полувека тому назад идеи катастрофизма, связанного с воздействием космоса на Землю, в том числе и на ее биосферу, были возвращены в рамки научной парадигмы в связи с появлением представлений о транснептуновых зонах — поясе Койпера и облаке Оорта. Эти зоны представляемой собой гигантские хранилища комет, которые из-за возмущений время от времени оказываются на траекториях, проходящих через внутренние области Солнечной системы, и могут стать опасными для нашей планеты. За прошедшие с той поры десятилетия постоянно увеличивалась предполагаемая вероятность падений небесных тел, способных вызвать как глобальную, так и региональную катастрофы на Земле [1].

Этому способствовали и астрономические наблюдения так называемых околоземных объектов — нескольких тысяч астероидов, «спящих» комет и других крупных метеороидов, способных столкнуться с Землей. Уже в начале XXI в. на основе известных сближений таких небесных тел с Землей были получены данные о том, что объекты класса Тунгусского метеороида могут сталкиваться с Землей

раз в 300 лет. Взрыв метеороида 15 февраля 2015 г. в небе к юго-юго-западу от Челябинска послужил поводом для значительной переоценки научным сообществом степени кометно-метеоритной угрозы в сторону ее увеличения, что, возможно повлияет и на представления о дальнейшем развитии человечества.

Была создана математическая модель, связывающая параметры движения небесных тел как в сфере действия Солнца, так и в сфере действия Земли, с их массоэнергетическими характеристиками и характеристиками взрывов, вызванных их разрушением в атмосфере, которые, в свою очередь, увязываются с явлениями, наблюдающимися при этом на подстилающей поверхности [2, 3]. Модель тогда же была использована для расчета характеристик Челябинского, а также Тунгусского метеороидов, которые в этих, а также в последующих работах автора [15, 19] связаны единством происхождения и, соответственно, близостью своих орбит. Таким образом, путем регулярных физико-математических расчетов, без каких-либо умозрительных гипотез и/или предположений, были получены основные данные, полностью характеризующие эти более чем примечательные явления.

Первоначальные расчеты, проведенные в марте-апреле 2013 г., были обоснованы предварительной информацией, полученной в течение первых 2–3 недель после Челябинского инцидента, и собственными оценками автора некоторых ключевых параметров этого явления, которые, по очевидным причинам, в тот момент не могли обладать высокой точностью. В ноябре 2013 г. журналы Nature и Science опубликовали составленные двумя крупными авторскими коллективами (всего 33 и 59 соавторов соответственно) две большие обзорные статьи о Челябинском инциденте. В них были представлены в основном достоверные и относительно подробные данные, полученные на основе видеоизображений, докладов и сообщений очевидцев, о параметрах траектории метеороида и явлениях, сопутствовавших его пролету и взрыву [4, 5]. После этого было решено заново провести расчеты, исходя из материалов, существенно уточняющих наблюдавшееся явление, так как предварительных данных из экспресс-отчетов в СМИ и фрагментарных личных сообщений очевидцев, использовавшихся ранее, было недостаточно. Результаты расчета характеристик Челябинского и Тунгусского метеороидов по таким данным представлены в этой статье, препринт которой был размещен на сайте Корнельского университета Archive.org [3].

Расчетная модель. Построенная математическая модель полностью увязывает все существенные характеристики описываемого события — от параметров траектории небесного тела и его физических свойств вплоть до явлений, наблюдаемых в атмосфере и на подстилающей поверхности, при его взаимодействии с элементами полной

системы рассматриваемых объектов и явлений. В этом ее кардинальное отличие от попыток фрагментарных исследований отдельных компонент системы без всякого увязывания их между собой, что было продемонстрировано в известных автору публикациях на эту тему [4, 5].

Полное и детальное описание модели не является целью настоящей работы. Главное, по мнению автора, дан ответ на более важный вопрос: каковы основные параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов. Поэтому математическая модель, состоящая из взаимосвязанного набора расчетных блоков, большая часть из которых или достаточно очевидна, или уже описана [6, 7], представлена здесь фрагментарно: так, чтобы читатель мог составить о ней только общее представление. Тем не менее наиболее нетривиальные ее фрагменты описаны подробнее.

Модель расчета параметров движения космических тел — достаточно традиционна. При заданной орбите объекта и известной орбите Земли, которая из-за ее очень малого эксцентриситета для простоты считается круговой, по законам сохранения энергии и момента импульса в первую очередь определяются параметры движения объекта по эллиптической орбите вокруг Солнца в любой ее точке. Затем, по геометрическим соображениям, вычисляются углы и модули скорости в солнцезентрической 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 перерасчеты скорости и энергии. Принципы, на которых основывается такой асимптотический подход к описанию движения тел в центральных полях тяготения, изложены, например, в работе [8].

При переходе к рассмотрению гиперболического движения объекта в гравитационном поле Земли возникает проблема вычисления так называемого прицельного расстояния — длины перпендикуляра, проведенного из вектора геоцентрической скорости объекта на параллельную ему линию, проходящую через центр Земли [8]. Этот параметр, определяющий движение объекта относительно Земли, в рамках данной модели можно вычислить 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 проводится для учета наклона оси вращения Земли по отношению к плоскости траектории объекта. Второе вращение выполняется так, чтобы плоскость траектории объекта оказалась в плоскости экватора новой системы координат. Тогда задача пространственного

движения объекта около Земли переходит в задачу его плоского гиперболического движения, в котором полетный радиус объекта в полярной системе координат с начальной точкой, расположенной в центре Земли, описывается только через один угловой параметр — полярный угол φ (в рамках данной задачи его удобнее называть азимутальным).

Поскольку существуют две ветви гиперболы, имеются два набора углов, обеспечивающих второй поворот системы координат. Из условия нахождения точки взрыва объекта ближе к перигею, чем точки входа, можно выбирать единственное решение, отвечающее условиям задачи.

Тогда остается проблема учета влияния атмосферы Земли на движение объекта в финальной части его траектории. Она имеет заметное практическое значение при малых углах входа объекта в атмосферу и, соответственно, на 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 вычислить — основной вопрос при разработке рассматриваемого модуля расчетного алгоритма. На основании данных о взрыве объекта (полученных уже после расчета траектории) можно рассчитать соотношение его оставшейся кинетической энергии непосредственно перед взрывом E_f , равной энергии взрыва E_e , и начальной энергии E_0 . Тогда при условии пренебрежения потерей массы объекта при движении в атмосфере получим

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

где v_f — скорость объекта перед взрывом (конечная скорость); v_0 — скорость объекта на входе в атмосферу (начальная скорость).

Следует отметить, что это априорное предположение спустя почти год в начале 2014 г. было полностью подтверждено оценками массы следа Челябинского метеороида [9] — потеря его массы в следе составила не более 1...1,5 % исходной массы.

Для приближенного расчета средней скорости объекта также использовался асимптотический подход — поиск решения проводился для плоских траекторий при малых углах входа. В этом случае разница между точкой взрыва метеороида и перигеем его траектории

невелика. В пределе они совпадают. Тогда (при малых углах входа и малых изменениях скорости) нетрудно получить, что превышение высоты траектории Δz над высотой ее перигея в первом приближении пропорционально квадрату изменения азимутального угла φ :

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

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 величину a — ускорение, тормозящее объект, в первом приближении можно описать следующим образом:

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

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

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, $\varphi_f \approx 0$.

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 [10]. 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 при $\xi_0 \geq \xi \geq 1$ скорость полета v 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 $0 \dots \xi_0$ изменения параметра ξ легко определить среднюю скорость объекта $\langle v \rangle$ на всем атмосферном участке траектории через статистические коэффициенты α и β , начальное и конечное ее значения:

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

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 и приведенной высоте атмосферы $h = 8,00$ км [3], $\xi_0 = 2,78$, коэффициенты α и β соответственно имеют значения 0,820 и 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 (нижний) участок его траектории при изменении высоты, соизмеримой со значением приведенной высоты h . Поэтому в приближенных вычислениях формулы (3)–(5) вполне могут применяться за пределами ограничений, которые накладывались при их выводе. К тому же если траектория объекта становится все круче, то потери скорости при торможении, по крайней мере, для интересующих нас достаточно крупных объектов (класса Тунгусского метеороида и выше), 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 [7]. 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 погрешностей 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 любой ее 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 при заданном удалении от эпицентра однозначно определяют характеристики взрыва, вызванного разрушением объекта и очень резким торможением его обломков, которые лавинообразно дробятся вплоть до мелких крошек и пыли, а затем испаряются и превращаются в облако плазмы.

Из описания модуля расчета скорости на атмосферном участке траектории становится ясно — 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 в точке входа объекта в атмосферу, как и прицельное расстояние или длина атмосферного участка траектории. 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 до сходимости этой итерационной процедуры. Следовательно, все расчетные модули, в том числе и тот, который определяет торможение объекта в атмосфере, должны быть максимально просты в использовании, что и достигается с помощью описанного выше алгоритма.

Следует отметить, что модуль расчета взрывов и столкновений из источника [6] также полностью соответствует 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 ($\delta \leq 10^\circ \dots 15^\circ$), 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 [6], его движение рассматривается без учета кривизны земной поверхности, что для длинных плоских траекторий приводит к неточности определения 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 дала возможность перейти от полной неопределенности и умозрительных размышлений на тему инцидентов со входами космических тел в атмосферу планет к регулярному, хотя и приближенному, 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, точнее описывающие любой из элементов рассматриваемого явления, и получать более точные результаты. Однако их точность лимитирована также и точностью определения параметров явлений, наблюдающихся на подстилающей поверхности. А она, как правило, не слишком высока. Поэтому такое уточнение расчетной модели может оказаться практически бесполезным.

Способ получения максимально достоверных и точных параметров траектории Челябинского метеороида. Известно, что параметры орбиты Челябинского метеороида, полученные в первые 2–3 недели после инцидента и ставшие исходными данными в расчетах, результаты которых представлены в работе [2], характеризовались значительными разбросами [11]. Данные, которые имеются на сегодня, точнее, тем не менее сравнение результатов из нескольких более поздних источников показывает, что разброс параметров в них хотя и значительно уменьшился, но остался вполне заметным [4, 5, 12, 13]. Поэтому при подготовке новых численных расчетов основное внимание было уделено достоверности и точности входных параметров численного алгоритма. Для этого после консультаций с учеными-астрономами в качестве одного из трех необходимых для расчета исходных 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. Значение этой величины было непосредственно получено по видеоизображениям и в силу этого, в принципе, отличалось минимальными погрешностями, вносимыми алгоритмами вычисления и перерасчета.

Второй параметр — значение большой полуоси орбиты с высокой степенью точности получается из ее резонанса 13:6 с орбитой Земли [2, 3] (практически все поздние источники дают очень близкие к резонансному периоды обращения метеороида).

В Солнечной системе известно большое количество орбитальных резонансов с участием планет, карликовых планет, крупных спутников и астероидов [14]. Кроме того, типичные метеорные потоки также находятся на резонансных с Землей орбитах — иначе не появлялись бы регулярно в небе. Поэтому естественно ожидать, что если некая орбита отличается от резонансной в пределах точности изме-

рений, то будем ее считать резонансной. Более того, практически бесспорные доказательства того, что Челябинский метеороид может быть не случайным независимым объектом, а членом некоего «роя» обломков ядра кометы, которые в соответствии с этим орбитальным резонансом периодически, время от времени, сталкивались в прошлом с Землей, приведены в работе [15].

Итак, значение большой полуоси орбиты Челябинского метеороида $a = 1,674$ а. е. известно 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 незначительно округленное значение $i = 5,0^\circ$ было взято из работы [5].

Далее постараемся максимально точно определить по последним опубликованным данным скорость входа Челябинского метеороида в атмосферу Земли v . И тут снова возникают некоторые проблемы в связи с довольно заметными расхождениями даже этих новых и уточненных данных. Наименьшее значение скорости и наименьшая погрешность были заявлены Г. В. Ионовым — $v = 18,85 \pm 0,09$ км/с по двум сериям измерений [12]. Были приведены также следующие значения этого параметра: $v \approx 19,0$ км/с [4], $v = 19,16 \pm 0,15$ км/с [5], а также $v = 19,3 \pm 0,9$ км/с [13]. Принимая во внимание то, что точность результатов из источника [13], 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 [4, 5, 12] следует, что точность определения скорости входа объекта в атмосферу не лучше $0,3$ км/с $v = 19,0 \pm 0,3$ км/с.

Такой разброс значений скорости при указанных в источниках [5, 12] погрешностях, не превышающих $\pm 0,15$ км/с и $\pm 0,09$ км/с, позволяет утверждать, что как минимум в результатах одной из этих работ имеется систематическая ошибка $\sim 0,15$ км/с. Возможно, 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, ранее практически всегда и реализовывавшихся для объектов, масштаб которых был намного меньше масштаба Челябинско-

го метеороида. Другие замеченные проблемы и несоответствия данных в статье [5], рассмотренные в отдельной работе, посвященной исключительно критике источников [9], позволили прийти к выводу, что эта систематическая ошибка имеется именно в работе [5]. Отсюда следует, что наиболее точные данные по скорости входа были получены Г. В. Ионовым, сделавшим видеозапись полета Челябинского болида буквально на пороге своего дома и потом многократно ночью переснимавшего небо с этой же позиции, уменьшив, таким образом, случайные погрешности измерений до уровня $\pm 0,09$ км/с [12].

Следовательно, скорость входа Челябинского метеороида (в соответствии с источником [12]) 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 значение большой полуоси орбиты Челябинского метеороида, используемое в настоящей статье, отличается от ее среднего значения, по данным из четырех работ, приведенным в источнике [5], ($a = 1,70 \pm 0,05$ а. е.) на — 1,6 %, а от результата работы [13] ($a = 1,67 \pm 0,10$ а. е.) — на +0,2 %. Для перигелия аналогичные сравнения таковы: источник [5] — $q = 0,77 \pm \pm 0,05$ а. е., т. е. отличие составляет +3,2 %, источник [13] — $q = = 0,73 \pm 0,01$ а. е., отличие — 2,1 %. Так что имеется вполне приемлемое согласие между всеми этими данными.

Кроме того, полученный в результате работы численного алгоритма базовый вариант при $v = 18,85$ км/с затем был перерасчитан на скорость, равную 19,00 км/с, и последствия этого возможного увеличения скорости входа метеороида были в статье проанализированы.

Способ получения максимально достоверных и точных данных, описывающих Челябинский взрыв. Важно 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, которые лавинообразно дробились вплоть до мелких крошек и пыли, а затем испарялись и превращались в облако плазмы, происходил не одномоментно. Было замечено два пика электромагнитного излучения, обусловленных этим взрывным процессом. Из данных источника [5] 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 [16] следует, что ударная волна оторвалась от огненного шара в этом интервале высот в окрестности его нижней границы.

Математическая модель взрыва, применяемая в описываемом расчетном методе, упрощена. В ней взрыв небесного тела подобен ядерному, т. е. происходит одномоментно и является сферически симметричным. Поэтому при расчетах важно указать именно ту «точку» взрыва, которая позволяет наилучшим образом аппроксимировать точно действительно 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 от него ударной волны, и получая наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных. При этом естественно полагать, что высота этого точечного взрыва лежит в интервале высот 27...30 км.

Усредненное значение географических координат точки траектории Челябинского метеороида с высотой, соответствующей середине этого весьма короткого участка траектории, по очень близким данным из источников [2, 5, 13], равна $54,87^\circ$ с. ш. и $61,20^\circ$ в. д. Отклонение по широте от данных, использованных в работе [2], составляет $0,02^\circ$, а по долготе различия вовсе не зафиксированы. Расчетное время взрыва не изменилось — 9:20:30 15 февраля 2013 г. Расчетный геодезический азимут траектории составил $283,2^\circ$ [5] — 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 только еще один параметр — где-нибудь, но достаточно далеко от эпицентра взрыва требуется узнать максимальный перепад давления на ударной волне. И в ранней статье автора [2], и в вышедших позднее работах крупных авторских коллективов [4, 5] подобные параметры определялись по состоянию остекления зданий в зоне разрушений, т. е. по наличию и/или доле разбитых оконных стекол в зоне действия ударной волны. На карте, приведенной в источнике [5], фрагмент которой представлен на рис. 1, по данным МЧС (светло-оранжевые точки), а также по полевым изысканиям соавторов статьи [5] (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 для нас пока не представляют. Не закрашенные точки показывают пункты, где значимые количества разбитых стекол не были обнаружены.

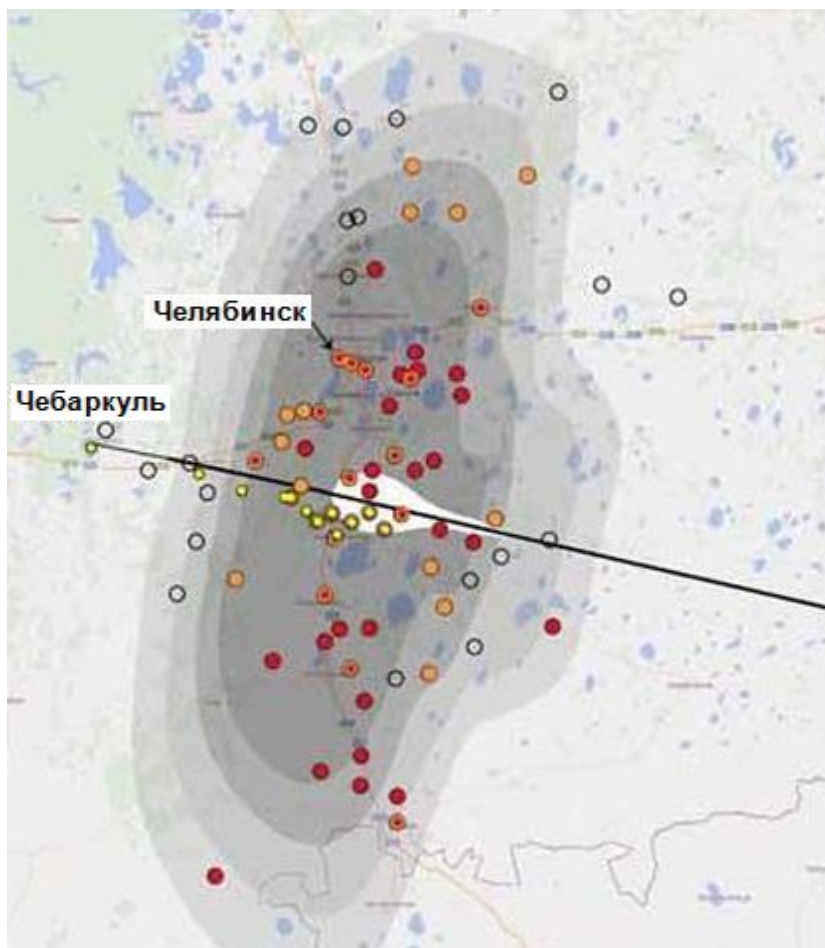


Рис. 1. Зона массового разбития стекол

Зона с разбитыми стеклами (см. рис. 1) представляет собой нечто похожее на несколько скругленный прямоугольник или деформированный эллипс. Черная линия — это проекция траектории движения метеороида на земную поверхность. Расстояние от эпицентра взрыва (по интерактивной Яндекс-карте) до максимально удаленного населенного пункта с разбитыми оконными стеклами в направлении, перпендикулярном проекции траектории полета, составило 105 км. Это означает, что 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.

Белая область на рис. 1 иллюстрирует изменение интенсивности излучения огненного шара по траектории полета, т. е. кривую блеска болида [5]. Серые области различной степени яркости показывают границы зон с постоянными перепадами давления на ударной волне, полученными при расчетах взрыва с помощью численного газодина-

мического кода [17] при условии, что энергия взрыва была распределена по траектории полета пропорционально кривой блеска [5]. Фиксируется если не количественное, то, по крайней мере, качественное подобие этих расчетных границ и экспериментальной границы зоны массового разбития стекол. При точечном взрыве, несмотря на пологую траекторию полета метеороида, этот газодинамический код так же, как и другие аналогичные методы, дает практически круговую симметричную картину границ областей постоянного перепада давления на ударной волне [2, 5].

Из представленных в работе [5] данных следует, что, в отличие от более чем в 3 раза меньшей высоты Тунгусского взрыва [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 о том, что зона выделения взрывной энергии в том первом случае должна была быть значительно короче, и поэтому Тунгусский взрыв был значительно более «точечным». Отсюда есть все основания заключить, что причины отклонения от круговой симметрии зон разрушения при Тунгусском и Челябинском инцидентах различны, вследствие чего они так не похожи по своей форме.

У Челябинска аппроксимация реальных границ зоны разрушений радиально-симметричными, требуемыми для работы используемого в алгоритме расчетного модуля [6], приводит к следующему граничному условию — перепаду давления в ударной волне, необходимому для разбития стекол, равному 5,0 кПа [9], и достигается на расстоянии 80 км от эпицентра взрыва. Эта дистанция была получена из условия равенства площадей реальной и модельной радиально-симметричной зон разрушения стекол, что является достаточно очевидным приближенным способом такой оценки. Проверочные расчеты затем проводились при радиусе 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 работе [4] сообщается, что в районе, окружающем Челябинский цинковый завод, доля разбитых стекол указывает на перепад давления на ударной волне, близкий к 7...8 кПа. Расположение на карте Челябинска и его окрестностей эпицентра взрыва 1 и склада концентрата этого завода 2, где произошло разрушение крыши, иллюстрирует рис. 2. Расстояние между ними составляет 39,5 км. Следует отметить, что ледовый дворец «Уральская молния» 3, у которого утром 15 февраля 2013 г. рухнула несущая балка, еще несколько балок были сильно погнуты, а из фасада была вырвана обшивка (не говоря уже о разбитых стеклах) [18], был

расположен на расстоянии 35 км от эпицентра и практически на той же прямой, которая соединяет эпицентр взрыва с заводским складом цинкового концентрата (отклонение от нее составляет не более 0,65 км, см. рис. 2).

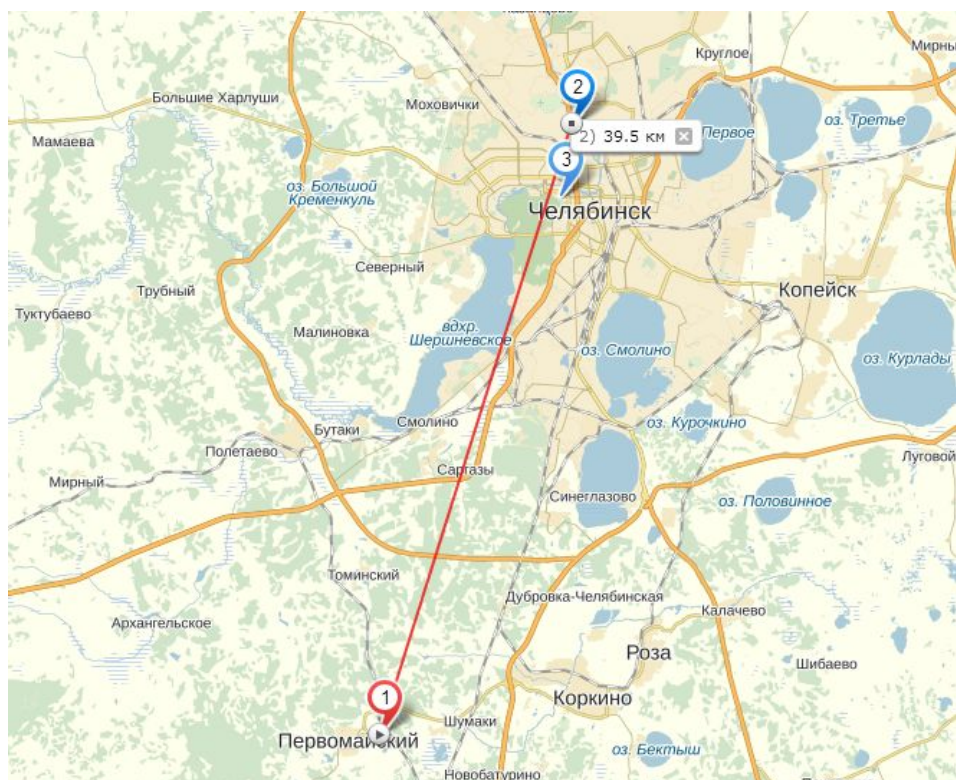


Рис. 2. Линия распространения ударной волны от эпицентра взрыва на ледовый дворец «Уральская молния» и Челябинский цинковый завод

Поскольку авторы работы [4] оценили по разбитым стеклам «средний по Челябинску» уровень перепада давления на ударной волне $3,2 \pm 0,6$ кПа, то перепад $7,5 \pm 0,5$ кПа в зоне, расположенной от эпицентра взрыва на несколько километров дальше, чем центр города, их несколько удивил. Они попытались объяснить его, применяя такие термины, как «каустика» и «конструктивная акустическая интерференция». Однако просто слова, какими бы глубокомысленными они не были 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, т. е. линейных, эти механизмы достаточно прозрачны. Видимо, ни одного такого среди 33 соавторов работы [4] не нашлось. В этом контексте стоит отметить, что самая первая и уже очень давняя статья автора

настоящей работы (написанная вместе с В.В. Келдыш) [19] была посвящена именно взаимодействию и пространственной интерференции скачков уплотнения — ударных волн в той системе отсчета, в которой они оказываются неподвижными [19]. 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 расстояние до мишени, 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 построены зависимости количества разбитых стекол от номинального перепада давления на ударной волне, низковысотные. Расстояние от них до зон, где была возможность подсчитать разбитые стекла при целых стенах зданий, оказалось много больше, чем высота этих взрывов (типовая высота воздушного взрыва боезаряда с энергией порядка 1 Мт составляет примерно 1,5 км при характерном радиусе разбития стекол около 20...40 км [16]). В таком случае на повернутую в сторону взрыва грань препятствия, например на стену дома с окнами, в этом масштабе рассмотрения набегает прямая ударная волна, плоскость которой параллельна этой грани. Если взрыв высотный, как Челябинский, то непосредственно вдоль поверхности Земли распространяется косая (наклоненная к этой поверхности) ударная волна, представляющая собой в этом масштабе практически плоский участок сферической ударной волны. При этом, по геометрическим соображениям, чем дальше от эпицентра, тем больше становится ее наклон к поверхности Земли (т. е. 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 газодинамических расчетов хорошо известно, что любая косая ударная волна «слабее», чем прямая, и ее воздействие на препятствие должно быть менее значительным. Именно поэтому доля разбитых стекол в районе эпицентра взрыва была далеко не стопроцентной [5] (можно также отметить, что одна только снеговая нагрузка на крыши в дан-

ном регионе России соизмерима с максимальными оценками воздействия ударной волны от взрыва Челябинского метеороида в районе эпицентра, поэтому сохранность там даже плоских крыш не кажется необъяснимой [9]).

Картина, подобная взаимодействию в окрестностях эпицентра ударной волны с островерхой крышей, состоящей из двух или трех граней, будет реализовываться и при набегании этой волны на стандартную многоэтажную городскую постройку с плоской крышей при средних ракурсах ее подхода, когда высота взрыва и расстояния до него соизмеримы. Поэтому пока вдоль Земли распространяется косая ударная волна, доля разбитых ею оконных стекол будет 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 геометрическим соображениям, растет, что в некоторый момент приводит к невозможности реализации регулярного отражения. С этого момента отражение становится так называемым маховским [20], которое схематично можно изобразить в виде буквы Y, т. е. 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 воздействию на подстилающую поверхность становится эквивалентным низковысотному взрыву, и только тогда можно сравнивать долю разбитых стекол из всех имевшихся ранее источников с их долей, получившейся после взрыва Челябинского метеороида. И именно поэтому граничные условия в расчетной модели должны быть установлены на таком большом расстоянии, где гарантированно обеспечивалось бы нерегулярное или маховское отражение ударной волны.

Все описанное выше подтверждает простой и очевидный, но, видимо, практически никем неучтенный факт: 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 ясно, что именно там, где соавторы работы [4] 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. Переход от регулярного отражения к маховскому можно было бы назвать «конструктивной интерференцией» падающей и отраженной волн, которая приводит к значительному росту реального, а не номинального давления на вертикальных стенах, как это сделали авторы работы [4].

Рассмотрим вопрос: почему эта «конструктивная интерференция» была замечена только в одном районе Челябинска?

Для ответа обратимся к картам и спутниковым снимкам местности. Даже на крупномасштабной карте (см. рис. 2) видно, что по линии распространения ударной волны от взрыва Челябинского метеороида на расстоянии около 35 км вплоть до спортивного дворца «Уральская молния» лежат в основном незастроенные равнины, покрытые полями или перелесками. На этой линии оказывается также прибрежная часть Шершневского водохранилища, в момент взрыва покрытого льдом, а далее располагается Челябинский городской бор (зеленое пятно на рис. 2, пересекаемое красной линией). Если «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 силу разрушений в «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 хаотичное.

Следует также отметить, что до Челябинского взрыва зафиксированы только два случая прохождения сильных ударных волн через

сплошную городскую застройку на протяжении нескольких километров — в городах Хиросиме и Нагасаки и в значительно меньшем масштабе, по-видимому, еще в двух — Галифаксе и Техас-Сити [21–23]. Но там энергия взрывов была в несколько тысяч или десятков тысяч раз меньше, чем при взрыве над Челябинском, и длины пробега интенсивных волн как минимум на порядок или полтора меньше. Кроме того, основная застройка двух японских городов состояла из одно-двухэтажных деревянных домиков [21]. Это резко контрастирует с многоэтажными домами в Челябинске. Известные соотношения между количеством разбитых стекол и перепадами давления на ударной волне были выведены по данным о распространении ударных волн по городской застройке городов Хиросимы и Нагасаки или вообще по голой степи Семипалатинского полигона с отдельно стоящими зданиями-мишенями, когда затухали эти волны из-за препятствий слабо. Вследствие этого такие данные не вполне адекватны для всего Челябинска, а только для направления на ледовый дворец «Уральская молния» и Челябинский цинковый завод, перед которыми в направлении движения ударной волны не было зон 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 его подробно исследовано в статье [9].

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 ± 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 [4], точнее известных граничных условий при решении рассматриваемой задачи.

Результаты расчетов параметров Челябинского и Тунгусского метеороидов и характеристик их взрывов. Выполнены несколько десятков расчетов различных вариантов входов в атмосферу и взрывов Челябинского и Тунгусского метеороидов, и результаты 11 из них, как наиболее представительные, показаны в табл. 1–4. В табл. 1, 2 продемонстрировано влияние изменения высоты точечного взрыва на характеристики Челябинского метеороида (в таблицах — ЧМ), а также на перепад давления на ударной волне от его взрыва на нескольких рас-

стояниях от эпицентра. Как было указано в рубрике «Расчетная модель» настоящей статьи, скорость входа объекта в атмосферу составляла 18,85 км/с. Минимальная высота точечного взрыва, аппроксимирующего реальный взрыв Челябинского метеороида равна 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 работ [6, 7], приблизительно соответствует началу ее воздействия на объект рассматриваемого типа.

Таблица 1

Параметры предварительных расчетных вариантов Челябинского метеороида

Вариант расчета	Высота взрыва H , км	Угол входа в атмосферу δ , град	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Диаметр D , м	Масса m , Мт	Кинетическая энергия на входе в атмосферу в тротиловом эквиваленте E_0 , Мт	Энергия взрыва объекта 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	177,0	1,83	77,8	56,2
ЧМ-4	28,5	7,14	540	187,0	1,85	78,3	57,8
ЧМ-5	29,0	7,11	460	197,5	1,86	78,9	59,6

Таблица 2

Характеристики предварительных вариантов взрыва Челябинского метеороида (номинальные значения)

Вариант расчета	Перепад давления, кПа				
	p_0 при L_0	p_1 при L_1	p_2 при L_2	p_3 при L_3	p_4 при L_4
ЧМ-1	11,6	9,4	8,1	7,67	5,0
ЧМ-2	11,4	9,3	8,0	7,60	5,0
ЧМ-3	11,2	9,2	7,9	7,53	5,0
ЧМ-4	11,0	9,0	7,8	7,46	5,0
ЧМ-5	10,8	8,9	7,7	7,39	5,0

Увеличение высоты точечного воздушного взрыва с 27 до 29 км при указанных условиях приводит к уменьшению угла входа объекта в атмосферу на 0,1° и снижению плотности вещества объекта в 1,9 раза — с 870 до 460 кг/м³ (см. табл. 1). При этом диаметр его увеличивается почти на 25 % — со 160 до 200 м при одновременном увеличении массы и кинетической энергии на входе в атмосферу на 3 %: $m = 1,81 \dots 1,86$ Мт, $E_0 = 76,6 \dots 78,9$ Мт в тротиловом эквиваленте. Таким образом, эта энергия увеличивается на 2,3 Мт, в то время как энергия взрыва E_c повышается более интенсивно — с 52,6 до 59,6 Мт, т. е. на 7,0 Мт, или на 13 % первоначального значения. Это связано со

снижением потерь энергии менее плотного метеороида при его торможении на больших высотах (при меньшей плотности атмосферы).

Значения основного на этих расстояниях фактора влияния ударной волны взрыва на наземные препятствия — перепада давления на ней приведены в табл. 2. В эпицентре (при $L_0 = 0$) на поверхности Земли реализуются максимальные перепады давления на ударной волне. Чем мощнее и выше взрыв, тем они меньше. Дистанция $L_1 = 20$ км является характерной для Тунгусского взрыва, сравниваемого здесь с Челябинским, дистанция $L_2 = 35$ км примерно соответствует расстоянию до центра Челябинска, а также до ледового дворца «Уральская молния». На удалении $L_3 = 39,5$ км расположен Челябинский цинковый завод, дистанция $L_4 = 80$ 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 Челябинского 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 возникают условия, сопоставимые с имевшими 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 в табл. 2 следует понимать, что в ней представлены максимальные значения давления на фронте ударной волны, которая набегаёт на поверхность, расположенную нормально к волне. При этом предполагается, что волна не ослаблена из-за рассеяния и многократных переотражений на препятствиях, лежащих ближе к эпицентру взрыва. Как отмечено выше, более или менее подобные условия в Челябинске реализовались только на направлении от эпицентра к Челябинскому цинковому заводу, а в остальных районах города из-за рассеяния энергии на многочисленных препятствиях реальные значения максимального давления на ударной волне должны были быть существенно ниже их номинальных значений, представленных в табл. 2.

Согласно данным табл. 2, также следует, что перепад давления на волне в 7,50 кПа на расстоянии 39,5 км (средний по данным источника [4] в районе Челябинского цинкового завода) реализуется при высоте взрыва 28,2 км. Это согласуется с предварительными оценками: «на интервале от 27 до 30 км, но ближе к нижней границе высот»,

а также с данными, опубликованными в работе [13]. 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 (табл. 3), взрыв которого и создает на указанной дистанции перепад давления в 7,50 кПа. Далее все расчеты проводились именно при такой высоте номинальной атмосферы. При этом можно отметить, что условный перигей расчетной траектории находился на высоте 28,07 км.

Таблица 3

**Параметры расчетных вариантов
Челябинского и Тунгусского метеороидов**

Вариант расчета	Скорость входа в атмосферу v , км/с	Угол наклона орбиты к плоскости эклиптики i , град	Высота взрыва H , км	Угол входа в атмосферу на внешней границе δ , град	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Диаметр D , м	Масса m , Мт	Кинетическая энергия на входе в атмосферу E_0 , Мт	Энергия взрыва объекта в тротиловом эквиваленте E_e , Мт
ЧМ-6	18,85	5,00	28,2	7,22	635	173	1,71	72,7	52,1
ЧМ-7	18,85	5,00	28,2	7,22	570	182,5	1,82	77,4	56,8
ЧМ-8	18,85	5,00	28,2	7,22	515	193	1,93	82,1	61,8
ТМ-1	18,72	-5,00	8,25	50,5	570	105	0,35	14,6	14,4
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

Расчетные данные для трех вариантов Челябинского объекта при значениях давления на ударной волне 7,00 кПа, 7,50 кПа и 8,00 кПа на дистанции $L_3 = 39,5$ км представлены в табл. 3 и 4. Величины и обозначения в них те же, что и раньше (добавлены скорость входа метеороида в атмосферу v , км/с, и угол наклона орбиты метеороида к плоскости эклиптики i , град). Полужирным шрифтом выделены базовые варианты Челябинского и Тунгусского метеороидов.

Углы входа δ во всех трех вариантах расчетов (ЧМ-6–ЧМ-8) совпадают с точностью до третьего знака после запятой. При этом плотность объектов ρ с ростом перепада давления на заданной дальности уменьшается на 23 % — с 635 до 515 кг/м³, а его диаметр D увеличивается на 11,5 % — со 173 до 193 м. Соответственно, масса m растет практически на такое же значение, а энергия взрыва E_e , обеспечивающая требуемое давление, увеличивается на 19 %. При этом достигается динамическое равновесие в точке разрушения метеороида и в точке его взрыва: более крупный, но менее плотный объект разрушается

на той же высоте, что и меньший, но более плотный. Увеличение массы и энергии объекта при увеличении перепада давления на ударной волне на заданном расстоянии от эпицентра взрыва вполне естественно. 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 [2]. При этом его полная энергия E_0 оказалась на 2,5 % выше вследствие большей начальной скорости полета.

Таблица 4

**Характеристики вариантов взрывов
Челябинского и Тунгусского метеороидов**

Вариант расчета	Перепад давления, кПа				Граница расчетного значения перепада давления ($p_4 = 5,0$ кПа) L_4 , км
	p_0 при L_0	p_1 при L_1	p_2 при L_2	p_3 при L_3	
ЧМ-6	10,3	8,5	7,3	7,00	73,9
ЧМ-7	11,1	9,1	7,9	7,50	80,0
ЧМ-8	12,0	9,8	8,4	8,00	85,5
ТМ-1	82,9	30,0	11,8	9,8	63,4
ЧМ-9	11,1	9,1	7,8	7,50	80,0
ТМ-2	81,6	30,0	12,0	9,9	63,8

Перейдем теперь к Тунгусскому метеороиду и его взрыву. В работе [15] показана возможная общность его происхождения с Челябинским метеороидом. Предполагалась близость орбит этих двух 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. табл. 3). Тогда, по оценкам, при сохранении долготы перигелия орбиты возможно обеспечение ее пересечения с орбитой Земли в конце июня — начале июля, т. е. в первое «окно» сближения с ней «роя» обломков, которому принадлежали оба рассматриваемых здесь метеороида [15]. После этого, применив описываемую расчетную модель, можно сравнить полученные расчетные результаты с известными из многочисленных работ, посвященных Тунгусскому феномену, и выяснить, насколько справедливо это предположение.

Взрыв Тунгусского метеороида (ТМ в табл. 3 и 4) произошел 30 июня 1908 г. 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 привело к зеркальному отражению вектора скорости объекта относительно вектора скорости пла-

неты по сравнению с тем, что было в феврале 2013 г. Тунгусский взрыв произошел заметно севернее Челябинского — его координаты: $60,89^\circ$ с. ш. и $101,90^\circ$ в. д. [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° (9° наклона траектории к параллели на север в точке взрыва) [2] он при указанных параметрах орбиты оказался $50,5^\circ$.

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) [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 (63,5...64,0 км) расположен пос. Ванавара (фактория). Очевидцы сообщали следующее: «Потом оказалось, что многие стекла в окнах выбиты» [24]. Таким образом, скорость и угол входа Тунгусского метеороида в атмосферу, которые были получены из астрономического блока численного метода расчета, и этих двух условий на ударной волне вполне достаточно для проведения вычислений, аналогичных выполненным ранее для Челябинского метеороида.

Подобные крутые траектории входа считаются гораздо проще и быстрее, чем пологие. При этом для получения наиболее точных данных, в отличие от ранних расчетов [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 влияние атмосферы на траекторию вплоть до взрыва объекта минимально. Это видно из того, что его энергия на атмосферном участке траектории уменьшилась всего на 1,4 % (см. табл. 3).

Интерактивный модуль, описывающий разрушение метеороидов в атмосфере [6, 7], применим в рамках «плоской» Земли. Это, как упоминалось выше, вносит дополнительную погрешность в результаты вычислений длинных и пологих траекторий. Таким образом, вычисленные углы входа Челябинского метеороида отличаются от реальных, и они могут считаться только справочными характеристиками (оценка угла входа с учетом кривизны поверхности Земли приводит для базового варианта ЧМ-7 к значению, равному $15,6^\circ$, что достаточно близко к значению $18,3^\circ$ из источника [5]). Но данные расчетов крутой и сравнительно 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 средняя плотность обоих небесных тел после проведения этих расчетов оказалась совершенно одинаковой — около 570 кг/м^3 (см. табл. 3), что является необходимым условием признания общности происхождения Тунгусского и Челябинского метеороидов (из табл. 1 следует, насколько этот параметр чувствителен даже к небольшим изменениям траекторных данных). Это означает, что в представленном подходе нет внутренних противоречий, а неизбежные расчетные ошибки незначительны. Отметим также то, что оценка энергии Тунгусского взрыва по сейсмограммам приводит к значению его энергии $12,5 \pm 2,5 \text{ Мт}$, а по барограммам — $12 \pm 2,5 \text{ Мт}$ [25, 26], что находится в хорошем согласии с полученным в расчетах значением — $14,4 \text{ Мт}$ (см. табл. 3). Таким образом, предположение о единстве происхождения и близости орбит Тунгусского и Челябинского метеороида приводит к адекватным оценкам значений энергии взрыва последнего.

При представлении процессов эволюции ядер комет и их обломков должно быть ясно, что приводимые в других источниках значения плотности Челябинского метеороида — 3300 кг/м^3 [5] относятся к его внешней поверхностной хондритной корке. 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, по размерам крупнейшего сохранившегося осколка Челябинского метеороида, [27]) 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 [28–30].

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 (см. табл. 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 раза больше, чем при взрыве Челябинского метеороида (см. табл. 4). При взрыве у Челябинска максимальный перепад давления у поверхности земли в $10 \dots 11 \text{ кПа}$, по имеющимся данным,

выдержали все крыши в окрестности эпицентра. А на стекла там действовал значительно меньший перепад давления (см. «Способ получения максимально достоверных и точных данных, описывающих Челябинский взрыв») и разбитых стекол 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 [25]. По мере удаления от эпицентра происходит постепенное сближение перепадов давления обоих взрывов, и на расстоянии 51,5 км от эпицентра они уравниваются. На больших расстояниях волна была сильнее у Челябинского взрыва существенно более мощного и произошедшего на значительно большей высоте.

Увеличение расчетной скорости входа в атмосферу Челябинского метеороида с 18,85 до 19,00 км/с в целом оказало на его характеристики незначительное влияние (см. табл. 3). Несколько уменьшился средний диаметр, слегка увеличились плотность и угол входа, а оба рассматриваемые значения энергии практически не изменились. Перепады давления на ударной волне также остались практически прежними (см. табл. 4). Примерно аналогично, но относительно заметнее повлияло бы на характеристики Тунгусского метеороида соответствующее увеличение скорости входа в атмосферу с 18,72 до 18,87 км/с (см. табл. 3, 4). Энергия его взрыва при этом увеличилась бы на 0,2 Мт — до 14,6 Мт, т. е. на 1,4 %.

Заключение. Утром 15 февраля 2013 г. в небе вблизи Челябинска на высоте около 28 км (28,2 км для модельного точечного взрыва) взорвался объект диаметром примерно 180...185 м, плотностью около 570 кг/м^3 и массой примерно 1,8 Мт. Энергия взрыва с учетом максимальных погрешностей в оценке 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 Челябинска оказалась практически равной энергии самого мощного термоядерного взрыва так называемой Царь-бомбы, составившей 58 Мт (другие обозначения боезаряда: АН602, Кузькина мать), произведенного бывшим Советским Союзом 30 октября 1961 г. на одном из островов архипелага Новая Земля [31]. Сопоставление этих двух катастрофических событий проведено в работе [9]. Определение энергии Челябинского взрыва с помощью акустических методов приводит к значению, совпадающему с рассчитанным здесь, но с меньшими погрешностями — $56,8 \pm 1,1$ Мт [32]. Это и есть наиболее точная оценка энергии взрыва.

За 104,6 года до этого — 30 июня 1908 г. над р. Подкаменная Тунгуска 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 [33]. Полученная в работе энергия его взрыва находится также в пределах 10...15 Мт, определенных по сейсмическим данным и барограммам [25, 26]. 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 их орбит.

То, что оба эти объекта — члены одного семейства кометных обломков, было в качестве гипотезы изложено в статье [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, представленным в данной работе, с высокой степенью точности. То же может быть сделано и с характеристиками объектов другого выявленного 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 угрожающих Земле вплоть до настоящего времени. К семейству Орла с высокой степенью вероятности принадлежал Большой Невадский болид 1894 г. [34], размеры и масса которого, по оценкам, оказались соизмеримыми с соответствующими параметрами Тунгусского метеороида. Из этого следует, что за 120 лет объекты такого класса столкнулись с Землей не менее 3 раз, что предполагает на порядок бóльшую вероятность подобных событий, чем ожидалось еще 10–15 лет тому назад.

Различия между представленными здесь и в некоторых иных работах на эту тему [4, 5] характеристиками Челябинского метеороида чрезвычайно велико. Все они тщательно рассмотрены в статье [9], где доказана ошибочность наиболее широко распространенной точки зрения. Краткое и наглядное представление самых очевидных и понятных доказательств этого, по существу, даже без всяких вычислений можно найти в статье [35].

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 массоэнергетическими ха-

раактеристиками, а также с характеристиками воздушных взрывов, вызываемых этими телами, оказались хорошо согласованы с данными, полученными в результате наблюдений.

2. Расчеты показали, что диаметр Челябинского объекта составлял 182,5 м, а его масса была близка к 1,82 Мт. Энергия его взрыва составила $(56,8 \pm 1,1)$ Мт в тротиловом эквиваленте.

3. Диаметр Тунгусского объекта оказался близок к 105 м, масса — к 0,35 Мт, а энергия взрыва — к 14,5 Мт.

4. Вследствие общности происхождения этих двух небесных тел их средняя плотность была одинакова и составляла около 570 кг/м^3 .

5. Разработанная 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.

6. Использование модели для оценок характеристик метеороидов позволяет утверждать, что за последние 120 лет объекты класса Тунгусского метеороида и более крупные сталкивались с Землей, по меньшей мере, 3 раза, и вероятность подобных инцидентов оказывается на порядок выше, чем предполагалось еще 10–15 лет тому назад.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Napier W. Hazards from Comets and Asteroids. *Global Catastrophic Risks*, N. Bostrom and M. Cirkovic, eds. Oxford University Press, 2008, pp. 222–237.
- [2] Lobanovsky Yu.I. Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *arXiv:1307.1967 [astro-ph.EP]*.
URL: <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
- [3] Lobanovsky Yu.I. Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes. *arXiv:1403.7282 [astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1403.7282>
- [4] Brown P.G., Assink J. D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, 503, no 7475, 14.11.2013, pp. 238–241.
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
- [5] Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342, no 6162, 29.11.2013, pp. 1069–1073.
URL: <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
- [6] Marcus R., Melosh H.J., Collins G. *Earth Impact Effects Program*, Imperial College (London), Purdue University, 2010.
URL: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>
- [7] Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. 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, pp. 817–840.
URL: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/effects.pdf>

- [8] Левантовский В.И. *Механика космического полета в элементарном изложении*. Москва, Наука, 1980, 512 с.
- [9] Лобановский Ю.И. Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7. URL: [http:// dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1497](http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1497)
- [10] Andrews L.C. *Special functions of mathematics for engineers*. Oxford University Press, 1998, 664 p.
- [11] Zuluaga J., Ferrin I. A Preliminary Reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. *arXiv:1302.5377 [astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1302.5377>
- [12] Ionov G.V. The Calculation of the Geometric Properties of the Chelyabinsk Bolide Trajectory by Car DVR Recordings. *International Scientific Conference «Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the Chebarkul lake»*, Chebarkul, June, 2013, pp. 1–17.
- [13] Голубаев А.В. Основные характеристики движения метеороида при выпадении Челябинского метеоритного дождя 15 февраля 2013 года. *Международная научно-практическая конференция «Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль»*, Чебаркуль, июнь 2013, с. 70–71.
- [14] *Orbital resonance*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_resonance
- [15] Лобановский Ю.И. Кометно-метеоритная угроза: исторический аспект. *Synergetic Group*, 30.07.2013–30.03.2015, с. 1–29. URL: <http://www.synerjetics.ru/article/history.pdf>
- [16] *Атмосферный ядерный взрыв*. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв
- [17] Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect. *Shock Waves*, 9, 1999, pp. 381–390.
- [18] Сегодня в Челябинске официально открыли ледовый дворец «Уральская молния». *Спорт@mail.ru*, 20.09.2013. URL: <http://sport.mail.ru/news/skating/14851524/>
- [19] Келдыш В.В., Лобановский Ю.И. Некоторые особенности пространственных течений с мостообразными скачками уплотнения. *Ученые записки ЦАГИ*, 7, № 5, 1976, с. 1–8.
- [20] *Основы газовой динамики*, под ред. Г. Эммонса. Москва, Издательство иностранной литературы, 1963, 704 с.
- [21] Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki
- [22] Halifax Explosion. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Halifax_Explosion
- [23] Texas City disaster. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Texas_City_disaster
- [24] Бронштэн В.А. *Тунгусский метеорит: история исследования*. Москва, Издательство Сельянов А. Д., 2000, 312 с.
- [25] Бронштэн В.А. *Метеоры, метеориты, метеороиды*. Глава 4. Тунгусский метеорит. Москва, Наука, 1987, 173 с. URL: <http://tunguska.tsc.ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>
- [26] Ben-Menahem A. 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, pp. 1–35. URL: <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
- [27] Абрамова И. Метеорит: увидеть и не умереть. *Новости*, Челябинский государственный краеведческий музей, 24.10.2013. URL: <http://www.chelmuseum.ru/news/uvidet-i-ne-umeret/>

- [28] Ball A., Gadowski S., Banaszkiwicz M., Spohna T. et al. An Instrument for in Situ Comet Nucleus Surface Density Profile Measurement by Gamma Ray Attenuation. *Planetary and Space Science*, 49, 2001, pp. 961–976.
- [29] Davidsson B., Gutieres P. An Estimate of the Nucleus Density of Comet 19P/Borrelly. *DPS 35th Meeting*, 1–6 September, 2003. URL: <https://aas.org/archives/BAAS/v35n4/dps2003/43.htm>
- [30] Samarasinha N. H., Gutierrez P.J., Belton M.J.S. et al. Bulk Density of Comet 9P/Tempel 1. *SAO/NASA ADS Astronomy Abstract Service*, p. 966.
- [31] Царь-бомба. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
- [32] Lobanovsky Yu.I. Acoustic Methods for Evaluation of High Energy Explosions. *arXiv:1311.6565 [astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1311.6565>
- [33] Светцов В., Потапова Т., Шувалов В. Вековая загадка Тунгуски. *В мире науки*, № 3, 2007, с. 1–7. URL: http://www.smoliy.ru/view_alonetext.php?g=74&outpdf
- [34] Mahood T. *Great Nevada Meteor of 1894 - Summary of Press Observations*. URL : [https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.otherrhand.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2012%2F03%2FSummary-of-press-observations.pdf&name=Summary-of-press observations.pdf&lang=en&c=5746ad26b414](https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.otherrhand.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2012%2F03%2FSummary-of-press-observations.pdf&name=Summary-of-press%20observations.pdf&lang=en&c=5746ad26b414)
- [35] Лобановский Ю.И. Каким был Челябинский метеороид на самом деле? *Synergetic Group*, 10.07.2014, с. 1–8. URL: http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm

Статья поступила в редакцию 21.01.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лобановский Ю.И. Параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и переоценка степени кометно-метеоритной угрозы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1503>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Лобановский Юрий Иосафович — канд. физ.-мат. наук, ПАО «Корпорация «Иркут». Область научных интересов: механика, термодинамика.
e-mail: streamphlow@gmail.com

Parameters of Chelyabinsk and Tunguska meteorites and reassessment of the comet and meteorite threat degree

© Yu. I. Lobanovsky

Irkut Corporation Joint-Stock Company, a UAC member, Moscow, 125315, Russia

The purpose of the article is to describe the application of a mathematical model relating the parameters of celestial bodies' motion with their mass and energetic features and characteristics of the explosions caused by the destruction of these bodies in the atmosphere. The model was used to calculate the meteoroid parameters that caused Chelyabinsk and Tunguska incidents. We assumed the closeness of their orbits, as the time interval between these events is consistent with the orbital period of Chelyabinsk meteoroid. The calculations showed that the diameter of Chelyabinsk meteoroid was 180...185 m, the weight was close to 1.8 Mt; the explosion energy was about 57 Mt of TNT. The diameter of Tunguska meteoroid was close to 105 meters, the weight was 0.35 Mt, and the explosion energy was about 14.5 Mt. The average density of the meteoroids was similar - about 570 kg / m³, which indicates a common origin of these heavenly bodies.

Keywords: Chelyabinsk meteorite, Tunguska meteorite, comet, trajectory, explosion, energy, the shock wave.

REFERENCES

- [1] Napier W. *Hazards from Comets and Asteroids. Global Catastrophic Risks*. N. Bostrom and M. Cirkovic, ed. Oxford University Press, 2008, pp. 222–237.
- [2] Lobanovsky Yu.I. Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *arXiv:1307.1967* [astro-ph.EP]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
- [3] Lobanovsky Yu.I. Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes. *arXiv:1403.7282* [astro-ph.EP]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1403.7282>
- [4] Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, 503, no. 7475, 14 November 2013, pp. 238–241. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
- [5] Popova O.P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342, no. 6162, 29.11.2013, pp. 1069–1073. Available at: <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
- [6] Marcus R., Melosh H.J., Collins G. *Earth Impact Effects Program*. Imperial College (London), Purdue University, 2010. Available at: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>
- [7] Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. 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, pp. 817–840. Available at: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/effects.pdf>
- [8] Levantovsky V.I. *Mekhanika kosmicheskogo poleta v elementarnom izlozhenii* [Mechanics of the space flight in the easy interpretation]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 512 p.
- [9] Lobanovsky Yu.I. Chelyabinskiy meteoroid: kritika istochnikov i obosnovanie vyvodov [Chelyabinsk meteoroid: criticizing the sources and grounding the

- reasons]. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2016, issue 7. Available at: dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1497
- [10] Andrews L.C. *Special functions of mathematics for engineers*. Oxford University Press, 1998, 664 p.
- [11] Zuluaga J., Ferrin I. A Preliminary Reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid. *arXiv:1302.5377* [astro-ph.EP]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1302.5377>
- [12] Ionov G.V. The Calculation of the Geometric Properties of the Chelyabinsk Bolide Trajectory by Car DVR Recordings. *International Scientific Conference "Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the Chebarkul lake"*, Chebarkul, June 2013, pp. 1–17.
- [13] Golubaev A.V. Osnovnye kharakteristiki dvizheniya meteoroida pri vypadenii Chelyabinskogo meteoritnogo dozhdya 15 fevralya 2013 goda [The main characteristics of the meteoroid motion in the Chelyabinsk meteorite rain on the 15 February, 2013]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Asteroidy i komety. Chelyabinskoe sobytie i izuchenie padeniya meteorita v ozero Chebarkul"* [International scientific and practical conference Asteroids and Comets. Chelyabinsk event and examination of the meteorite fall in Chebarkul lake]. Chebarkul, June 2013, pp. 70–71.
- [14] *Orbital resonance*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_resonance
- [15] Lobanovsky Yu.I. *Kometno-meteoritnaya ugroza: istoricheskiy aspekt* [Comet and meteorite threat: historical aspect]. Synergetic Group, 30 July, 2013 – 30 March, 2015, pp. 1–29. Available at: <http://www.synerjetics.ru/article/history.pdf>
- [16] *Atmosfernyi yadernyi vzryv* [Atmospheric nuclear explosion]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Atmosfernyi_yadernyi_vzryv
- [17] Shuvalov V.V. *Shock Waves*, 1999, no. 9, pp. 381–390.
- [18] Segodnya v Chelyabinske ofitsialno otkryli ledovyi dvorets "Uralskaya molniya" [Today in Chelyabinsk there was officially opened the ice palace The Ural lightning]. *Sport@mail.ru*, 20 September, 2013. Available at: <http://sport.mail.ru/news/skating/14851524/>
- [19] Keldysh V.V., Lobanovsky Yu. I. *Uchenyi zapiski TsAGI — Proceedings of Central Aerohydrodynamic Institute*, July 1976, no. 5, pp. 1–8.
- [20] Emmons G. *Osnovi gazovoi dinamiki* [The fundamentals of gas dynamics]. Moscow, Izd. inostrannoi literatury Publ., 1963, 704 p.
- [21] *Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki*. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki
- [22] *Halifax Explosion*. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Halifax_Explosion
- [23] *Texas City disaster*. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Texas_City_disaster
- [24] Bronshten V.A. *Tungusskiy meteorit: istoriya issledovaniya* [Tunguska meteorite: history of the exploration]. Moscow, Seliyanov A.D. Publ., 2000, 312 p.
- [25] Bronshten V.A. *Meteory, meteority, meteoroidy* [Meteors, meteorites, meteoroids]. Chapter 4. Tunguska meteorite. Moscow, Nauka Publ., 1987, 173 p. Available at: <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>
- [26] Ben-Menahem A. 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*, 1975, 11, no. 1, pp. 1–35. Available at: <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
- [27] Abramova I. Meteorit: uvidet i ne umeret [Meteorite: to see and not to die]. *Novosti, Chelyabinskiy Gosudarstvenny Kraevedcheskiy Musey* [Novosti, Chelyabinsk State Museum of Local History], 24 October 2013. Available at: <http://www.chelmuseum.ru/news/uvidet-i-ne-umeret/>

- [28] Ball A., Gadowski S., Banaszkiwicz M., Spohna T. et al. An Instrument for in Situ Comet Nucleus Surface Density Profile Measurement by Gamma Ray Attenuation. *Planetary and Space Science*, 2001, 49, pp. 961–976.
- [29] Davidsson B., Gutierrez P. An Estimate of the Nucleus Density of Comet 19P/Borrelly. *DPS 35th Meeting, 1–6 September 2003*. Available at: <https://aas.org/archives/BAAS/v35n4/dps2003/43.htm>
- [30] Samarasinha N.H., Gutierrez P.J., Belton M.J.S., et al. Bulk Density of Comet 9P/Tempel 1. *SAO/NASA ADS Astronomy Abstract Service*, p. 966.
- [31] *Tsar-bomba* [Tsar-bomb]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
- [32] Lobanovsky Yu.I. Acoustic Methods for Evaluation of High Energy Explosions. *arXiv:1311.6565* [astro-ph.EP]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1311.6565>
- [33] Svetsov V., Potapova T., Shuvalov V. *V mire nauki - In the world of science*, 2007, no. 3, pp. 1–7. Available at: http://www.smoliy.ru/view_alonetext.php?g=74&outpdf
- [34] Mahood T. *Great Nevada Meteor of 1894 – Summary of Press Observations*. Available at: [https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.otherhand.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2012%2F03%2FSummary-of-press-observations.pdf&name=Summary-of-press observations.pdf&lang=en&c=5746ad26b414](https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwww.otherhand.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2012%2F03%2FSummary-of-press-observations.pdf&name=Summary-of-press%20observations.pdf&lang=en&c=5746ad26b414)
- [35] Lobanovsky Yu.I. Kakim byl Chelyabinskiy meteoroid na samom dele? [What was Chelyabinsk meteoroid like?]. *Synergetic Group*, 10 July 2014, pp. 1–8. Available at: http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm

Lobanovsky Y.I., Cand. Sci. (Phys.-Math.). Specialises in mechanics, thermodynamics. Irkut Corporation Joint-Stock Company, a UAC member, Russian Federation. e-mail: streamflow@gmail.com