

УДК [523.44+523.51+523.6]:577.47

ПАРАМЕТРЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА: АНАЛИЗ ДАННЫХ

***О.П. Попова, В.В. Шувалов, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов,
Д.О. Глазачев¹, В.В. Емельяненко, А.П. Карташова²,
П. Дженнискенс³***

¹Институт динамики геосфер РАН, ²ИНАСАН, ³SETI

Ударная волна, возникшая при входе в атмосферу крупного метеороида 15 февраля 2013 года в Челябинской области, привела к возникновению значительной области повреждений. По официальным данным, пострадали 7320 зданий и 1613 человек обратились за медицинской помощью. Это первое событие, демонстрирующее к каким последствиям может привести вход в атмосферу Земли даже не очень крупного (16–20 метров в диаметре) космического объекта. Другая особенность Челябинского события состоит в том, что имеется большое количество разнообразных данных, в том числе инструментальных, которые позволяют изучить это событие и его последствия более детально, чем это обычно удастся сделать. С 9 по 24 марта сотрудники ИДГ и ИНАСАН посетили район падения и собрали информацию об области разрушений. Анализ инфразвуковых данных, данных по излученной энергии и по разрушению остекления зданий и сооружений, позволил оценить начальную кинетическую энергию Челябинского болида в 300–600 кт ТНТ. Предложенная модель энерговыделения позволила описать область разрушений, вытянутую до 90 км в направлении, перпендикулярном траектории. Эта модель согласуется и с зарегистрированными временами прихода ударной волны в различные точки. Принципиальным в этой модели является распределенный вдоль траектории падения характер энерговыделения, связанный как с пролетом через атмосферу так и с разрушением метеороида, в основном на высотах 40–23 км.

Введение

Основным механизмом возмущений атмосферы при входе космических тел является ударная волна, распространение которой приводит к образованию нагретой излучающей области, генерации акустических, инфразвуковых и сейсмических волн. Звуковые возмущения (в полосе частот 20 Гц – 20 кГц) в основном распространяются на небольшие расстояния, не превышающие 2–2,5 высоты разрушения болида (зона прямой слышимости). Инфразвуковые волны являются частью акустических волн в спектральном интервале между 20 Гц и выше предельной аку-

стической частоты ($3 \cdot 10^{-3}$ Гц) [Госсард и Хук, 1975]. Затухание инфразвуковых волн в атмосфере очень слабо, поэтому инфразвук, вызванный болидами (и другими источниками), может быть зарегистрирован на весьма больших расстояниях. Инфразвуковые возмущения распространяются в атмосферных волноводах, сформированных на различных высотах градиентами температуры, скорости и направления ветра, на расстояния, достигающие несколько тысяч километров [Госсард и Хук, 1975]. Ударная волна, распространяющаяся вниз, достигая поверхности Земли, возбуждает сейсмические волны, которые регистрируются на расстояниях в сотни километров и более.

Челябинский болид 15.02.2013 выделяется в ряду других входов метеороидов прежде всего наличием большой области задокументированных разрушений (выбитые стекла, сорванные подвесные потолки, выломанные оконные петли, и т.д.), и, кроме того, большим количеством разнообразных данных, в том числе инструментальных (видео и фоторегистрации; излучение, зарегистрированное спутниковой системой наблюдения; инфразвуковые и сейсмические сигналы; спутниковая и наземная регистрация пылевого следа в атмосфере; наличие протяженного поля рассеяния фрагментов метеорита).

Траектория Челябинского болида

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на 540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и на 900–1000 км с запада на восток (от Самары, Оренбурга до Тюмени) [Емельяненко и др., 2013]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить траекторию пролета болида [Zuluaga et al., 2013; Borovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013]. Все эти траектории, различаясь в деталях, согласуются между собой – траектория полета болида проходила примерно в 30 км к югу от Челябинска с азимутом 283° , приблизительно через поселки Еткуль и Первомайский. Эта траектория согласуется также с траекторией, определенной на основе снимков следа болида спутниками Meteosat [Miller et al., 2013]. Пеленг по инфразвуковым сигналам, зарегистрированным целым рядом инфразвуковых станций на расстояниях от 520 до 5700 км (в основном 1500 км) [Рыбнов и др., 2013] также позволил независимо определить местоположение источника возмущений. Согласно этим данным разрушение болида происходило между пунктами Коркино-Еманжелинск-Первомайский. Это хорошо согласуется с другими данными по пролету и разрушению [Borovička et al., 2013; Zuluaga et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Miller et al., 2013].

Сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы большим числом сейсмических станций на расстояниях в сотни и тысячи километров. Приблизительные координаты источника сейсмических колебаний 55.150°N , 61.410°E (USGS web-site: <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lra1#summary>) находятся достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида. Магнитуда соответствующего землетрясения оценивается в 2,7–4 по разным источникам

Энергия Челябинского метеороида

Скорость входа Челябинского метеороида в атмосферу оценивается в 17,7–19,3 км/с по видеозаписям [Borovička et al., 2013; Zuluaga et al., 2013; Емельяненко

ко и др., 2013; Miller et al., 2013]. Энергию (и массу) метеороидов оценивают различными методами.

Один из способов основан на измерении периода (или частоты) максимальной амплитуды инфразвуковых (ИЗ) колебаний, используя аппроксимации, нормированные по различным взрывам. Разброс оценок достаточно велик. В работе [Ens et al., 2012] приведено сравнение различных оценок амплитуды давления на расстоянии 1000 км для энергии взрыва 1 кт ТНТ, которое показывает, что оценка амплитуды давления может различаться почти на два порядка. Энергии 70 спутниковых болидов (в диапазоне 0,02–20 кт ТНТ), для которых одновременно со световой вспышкой был зарегистрирован инфразвуковой сигнал, позволил выбрать наиболее достоверную аппроксимацию в рассматриваемом диапазоне энергий [Ens et al., 2012]. Применение ее к инфразвуковым данным Челябинского события приводит к начальной кинетической энергии в 1000 кт ТНТ, хотя следует отметить, что эта величина значительно превышает энергии событий, рассмотренных Ens et al. (2012).

Характерные частоты в спектрах ИЗ сигналов, проанализированных в работе [Рыбнов и др., 2013], составляют 0,029–0,039 Гц, что позволяет оценить энергию метеороида в 220–534 кт ТНТ (таблица 1). Среднее значение энергии равно 415 кТ при стандартном отклонении ± 97 кТ.

Можно ожидать увеличение оценки энерговыделения в несколько раз при учете зависимости от высоты источника [Рыбнов и др., 2013].

Таблица 1

Название станции	Энергия болида	Расстояние до источника
IS43 (Дубна)	442 кТ	≈ 1513 км
IS44 (Камчатка)	221 кТ	≈ 5780 км
IS46 (Залесово)	462 кТ	≈ 1520 км
IS31 (Актюбинск)	534 кТ	≈ 520 км
ГФО «Михнево» (Московская обл.)	457 кТ	≈ 1500 км
ИДГ РАН (Москва)	445 кТ	≈ 1500 км
НПО «Тайфун» (Обнинск)	474 кТ	≈ 1520 км
ТГУ (Томск)	328 кТ	≈ 1500 км

Оптическое излучение Челябинского болида было очень ярким, он относится к суперболидам, то есть болидам ярче –17 звездной величины. Такие болиды регистрируются датчиками, расположенными на геостационарных спутниках Министерства Обороны США [Tagliaferri и др., 1994]. Эта спутниковая наблюдательная сеть предназначена для контроля за ядерными испытаниями, а наблюдения болидов – побочный продукт этой системы наблюдений. К сожалению, полная информация о событиях, регистрируемых со спутников, сейчас недоступна для независимого научного анализа. В некоторых случаях (Витимский болид, астероид TC₃2008) становилась доступна частичная информация. Для Челябинского события были опубликованы координаты места максимальной яркости (54.8N, 61.1E), соответствующая высота и скорость (23,3 км и 18,6 км/с), а чуть позднее и величина излученной энергии (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>).

Согласно данным спутниковой системы наблюдения, излученная энергия Челябинского болида составила $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 кт ТНТ (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>). В работе [Nemtchinov et al., 1997] было получено

выражение для интегральной эффективности высвета, то есть отношения полной энергии излучения к начальной кинетической энергии:

$$\eta = E_r/E_k$$

где E_r – это энергия излучения, зарегистрированная детектором, E_k – кинетическая энергия метеороида. Для энергии в излучении ~ 90 кт ТНТ интегральная эффективность составляет 14–16,5%, что соответствует кинетической энергии 540–640 кт ТНТ. Авторы [Brown et al., 2002] оценили интегральную эффективность высвета по ряду событий, зарегистрированных спутниковой сетью, для которых имелись также независимые оценки начальной кинетической энергии (0.1–25 кт, в основном, по инфразвуковым данным). Для Челябинского болида эффективность составляет 20%, что соответствует начальной кинетической энергии в 450 кт ТНТ. Следует отметить, что энергия событий, используемых для получения аппроксимации, которая экстраполировалась для получения оценок энергии Челябинского события, была заметно меньше, чем энергия Челябинского метеороида.

Факт разрушения оконных стёкол и доля таких разрушений в Челябинске также даёт возможность оценить энергию источника. Оценка энергии зависит от принятой величины избыточного давления в ударной волне, при которой разрушаются оконные стёкла. Согласно данным Mannan and Lees (2005) при избыточном давлении в ударной волне $\Delta p = 700$ Па разрушается 5% окон, а при $\Delta p = 1000$ Па доля разрушений составляет 50%. Можно принять интервал 500–1000 Па для избыточного давления ударной волны в центре Челябинска.

Если использовать зависимости избыточного давления от расстояния, характерные для сферического и цилиндрического источников в экспоненциальной изотермической атмосфере [Цикулин, 1969], то, принимая диапазон давлений разрушения стекол (500–1000 Па), можно найти, что для максимальных расстояний, 40–50 км от взрыва до районов, где зарегистрированы разрушения остекления, энергия метеороида должна составлять 100–340 кт ТНТ (рис. 1) (для источника горизонталь-

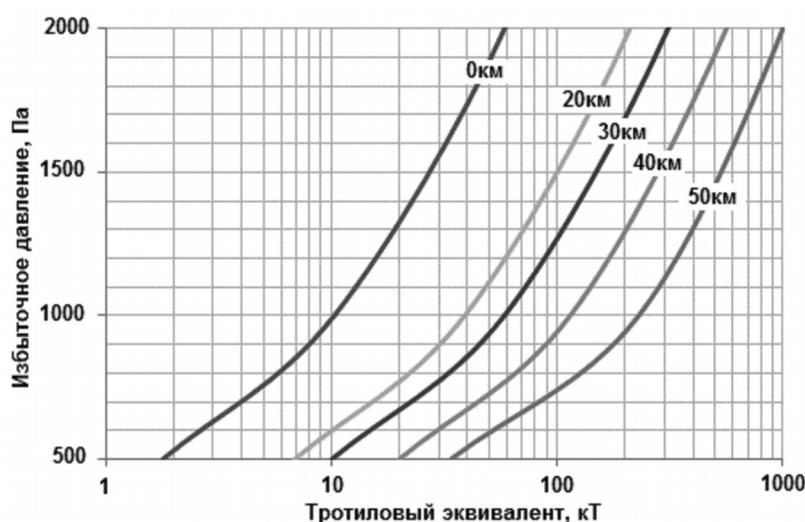


Рис. 1. Зависимость избыточного давления на поверхности Земли (на разных расстояниях от проекции траектории на поверхность) от тротилового эквивалента для цилиндрического источника энергии длиной 20 км горизонтально расположенного на высоте 22 км

но расположенного на высоте 22 км). Наличие приземной температурной инверсии (повышение температуры с высотой) в Челябинске 15.02.2013 уменьшает амплитуду ударной волны в среднем на 15% [Бреховских, 1957]. Учет этого эффекта может увеличить оценку энергии, так же как и большая высота энерговыделения.

Описанные выше оценки позволяют принять в первом приближении диапазон энергий космического тела при входе в атмосферу 300–600 кт ТНТ. В этом случае, при скорости входа равной 18,8 км/с [Емельяненко и др., 2013] масса метеороида составит 7000–14 000 т. При плотности 3,2 г/см³ диаметр объекта находится в пределах от 16 до 20 м.

Следует помнить, что точность оценок энергии метеороидов тем или иным методом не лучше чем 1,5–2 раза [Popova et al., 2011], сопоставление различных оценок позволяет получить достаточно достоверную оценку.

Ударная волна Челябинского болида

Сравнение модели распределения давления на поверхности с областью разрушений.

Ударная волна Челябинского болида привела к возникновению значительной области повреждений, вытянутой до 90 км в направлении, перпендикулярном траектории. По официальным данным, предоставленным управлением МЧС по Челябинской области, пострадали 7320 зданий и 1613 человек обратились за медицинской помощью.

Была проведена серия численных расчетов по программе SOVA [Shuvalov, 1999] с разным распределением выделенной энергии вдоль траектории при фиксированной полной энергии (т.е. кинетической энергии падающего тела) 300 кт. За основу брались данные по траектории, полученные [Borovička et al., 2013]. Угол наклона траектории составлял 16,5 градусов (к горизонту), координаты вспышек: (20,0,31.7) – самая яркая вспышка, (0,0,25.8) – средняя вспышка, (–16,0,21) – малая вспышка. Ось X направлена вдоль траектории в направлении, противоположном движению метеороида, ось Y перпендикулярна траектории (обе на поверхности Земли), ось Z вертикальна. Не учитывался конечный участок траектории на высотах 14–21 км, где свечение было слабым, основная масса метеороида уже, по-видимому, «сгорела», и заметно упала скорость полета оставшихся фрагментов.

Рассматривались 3 варианта. В первом вся энергия была выделена вдоль отрезка траектории между точками (X, Y, Z) (–16,0,21) и (100,0,55) пропорционально плотности воздуха. Таким было бы энерговыделение, если бы метеороид летел с постоянной скоростью и не разрушался (постоянное поперечное сечение). Во втором варианте вся энергия была выделена в точке (20,0,31.7), где произошла самая яркая вспышка. В третьем варианте половина энергии (т.е. 150 кт) была выделена вдоль траектории так же, как в первом варианте, 30% энергии (т.е. 90 кт) в точке (20,0,31.7), 15% энергии (т.е. 45 кт) в точке средней вспышки (0,0,25.8) и оставшиеся 5% (т.е. 15 кт) в конечной точке траектории (–16,0,21). Во всех случаях энерговыделение происходило не одновременно по всей траектории, а с задержкой, соответствующей скорости движения метеороида. Расчетная сетка была довольно подробной: 500×250×250 точек по осям X , Y и Z соответственно.

На рис. 2 показаны распределения давления в плоскости (X, Z) для третьего варианта. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию энерговыделения. Во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (сфериче-

ские) и основная баллистическая ударная волна, производимая летящим метеороидом. Баллистическая волна имеет вид конуса с очень маленьким углом раствора потому, что скорость метеороида (18 км/с) много больше скорости звука, к которой распространяется быстро затухающая ударная волна. Важно отметить, что момент прихода ударной волны в какую-либо точку не зависит от того, в какой точке была основная вспышка. С хорошей точностью можно считать, что первый звук всегда приходит из ближайшей точки траектории. Поэтому нельзя определять расстояние до основной вспышки по времени между вспышкой и приходом звука.

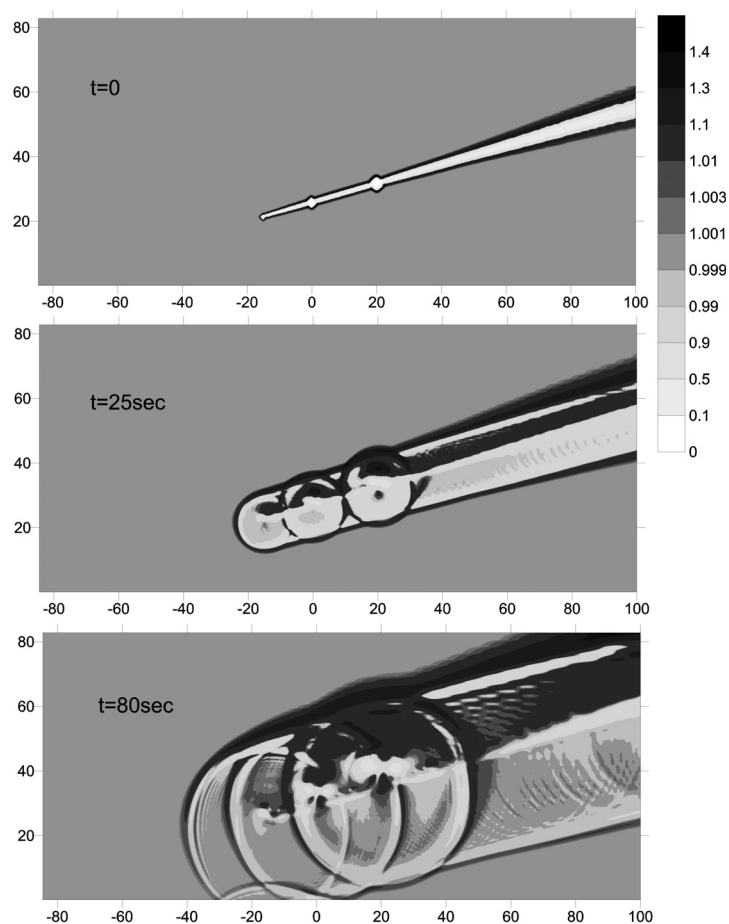


Рис. 2. Распределение относительного давления P/P_0 для варианта, когда половина начальной кинетической энергии выделяется во время трех вспышек и половина равномерно по траектории. Момент времени t_0 соответствует окончанию энергосвечения. Во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (сферические) и основная баллистическая ударная волна, производимая летящим метеороидом

На рис. 3 показано распределение давления для первого варианта в момент, когда ударная волна достигает поверхности. Изолинии соответствуют давлению 1000 Па. На рисунке видно, что метеорный след разваливается из-за развития неустойчивостей на отдельные фрагменты.

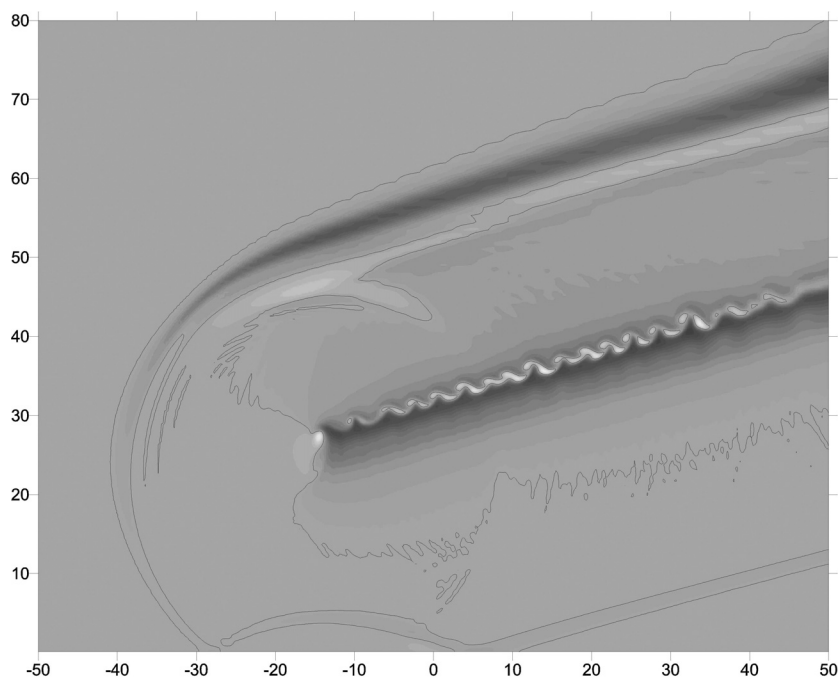


Рис. 3. Распределение давления в момент начала отражения ударной волны от поверхности для варианта, когда энергия равномерно (пропорционально плотности воздуха) выделяется вдоль траектории. Нарисованы изолинии избыточного давления 1000 Па

На рис. 4 показаны для всех трех вариантов площади поверхности, где избыточное давление превышало 500 и 1000 Па (то есть области разбитых окон). Видно, что площади сравнимы во всех случаях, несмотря на сильное различие в распределении энерговыделения вдоль траектории. Это связано с тем, что во всех случаях основная часть энергии выделяется примерно на одной и той же (и при этом достаточно большой) высоте, то есть размер источника сравним (или даже меньше) с расстоя-

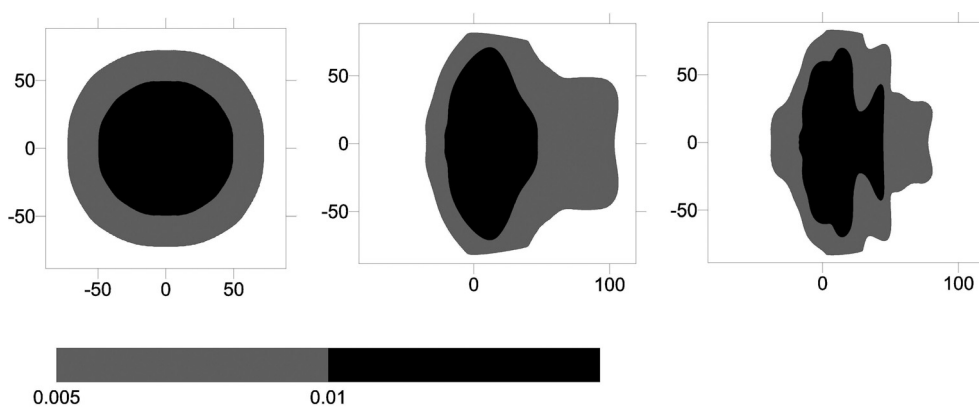


Рис. 4. Области избыточного давления на поверхности Земли для вариантов 1 (в середине), 2 (слева) и 3 (справа). Серым цветом закрашена область, где избыточное давление превышает 500 Па, черным – 1000 Па

нием до него. При точечном энерговыделении (второй вариант) зона разбитых стекол, естественно, симметрична, имеет форму круга. В обоих вариантах с выделением энергии (всей или частично) вдоль траектории зона разбитых окон вытянута в направлении, перпендикулярном траектории (что соответствует реальной картине).

На рис. 5 показаны распределения избыточного давления на поверхности Земли вдоль траектории. В третьем варианте (когда на фоне непрерывного энерговыделения имеются 3 вспышки) отчетливо видны пики избыточного давления в точках, где пересекаются ударные волны от отдельных пиков. В первом варианте (непрерывное выделение энергии вдоль траектории) имеется один ярко выраженный пик, который соответствует переходу от цилиндрического взрыва к точечному. Во втором варианте имеется один (не очень острый) пик, толщиной порядка радиуса кризисной падающей ударной волны.

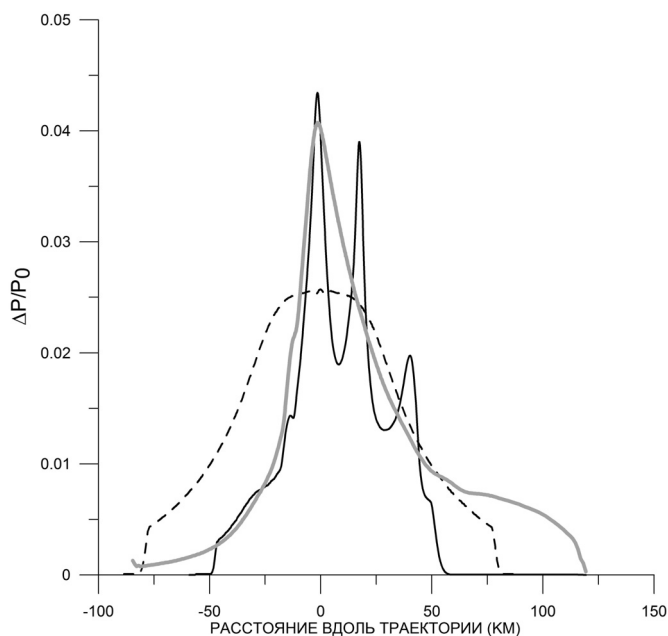


Рис. 5. Распределение давления на поверхности Земли под траекторией метеороида для варианта 1 (сплошная серая кривая) варианта 2 (пунктирная кривая) и варианта 3 (сплошная черная кривая)

На рис. 6 (см. цв. вкл.) приведено сравнение области избыточного давления на поверхности Земли для варианта 3 с областью разрушений на поверхности. Голубыми метками отмечены наиболее пострадавшие населенные пункты согласно данным управления МЧС по Челябинской области. Распределение повреждений в модели и в реальности неплохо совпадают.

Время прихода ударной волны

Данные стационарных видеокамер компании «Интерсвязь» были предоставлены ее генеральным директором Э.О. Калинин. Эти видеозаписи синхронизированы

Время прихода конической УВ от пролета метеороида можно оценить как $\Delta t = \Delta t(V, \beta, z_0)$, где z_0 – высота окончания энерговыделения, V – скорость входа тела, а β – угол наклона траектории:

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0} (x^2 + y^2 + z_0^2)^{1/2} \text{ при } x \leq z_0 \tan \alpha$$

Предположение о том, что основное энерговыделение закончилось на высотах порядка 29–34 км, не согласуется со временами прихода волны в пункты, близко

расположенные к траектории. Уменьшение высоты окончания энерговыделения до 23–25 км позволяет получить удовлетворительное согласие с наблюдаемыми данными. Можно заключить, что за формирование УВ отвечает выделение энергии на протяженном участке траектории, ниже 23 км выделилась незначительная доля начальной энергии.

Сравнение Челябинского события с другими

Спутниковая система наблюдений в среднем регистрирует около 30 световых вспышек на высотах 30–45 км в год на всем земном шаре. Длительность вспышек 1–3 с, энергия в излучении в среднем составляет порядка 0,01–1 кт TNT. Полные данные оптических наблюдений за 1994–1996 годы (51 событие) были проанализированы в [Nemtchinov et al., 1997], и позволили оценить кинетическую энергию метеороидов, внедряющихся в атмосферу Земли (от 0,06 до 40 кт TNT).

Среди доступных для анализа данных спутниковой системы наблюдений максимальная кинетическая энергия метеороида составляла около ~ 40 кт TNT [Попова, Немчинов, 2005], что заметно меньше оценок энергии Челябинского метеороида. В период с 1960 по 1974 гг. для некоторого числа болидов инфразвуковые (ИЗ) волны были зарегистрированы системами микробарометров, развернутых в этот период на территории США [ReVelle, 1997]. Наиболее крупное, зарегистрированное за эти 14 лет, событие (3 августа 1963, в районе островов Принца Эдуарда, Южная Африка) имело энергию порядка 300–1000 кт TNT [Silber et al., 2009], что сравнимо с энергией Челябинского метеороида (рис. 8). Если считать, что такие события происходят раз в 50 лет, то это согласуется с ожидаемой частотой таких событий в пределах погрешности [Nemtchinov et al., 1997; Brown et al., 2002].

Частота событий в зависимости от энергии тела

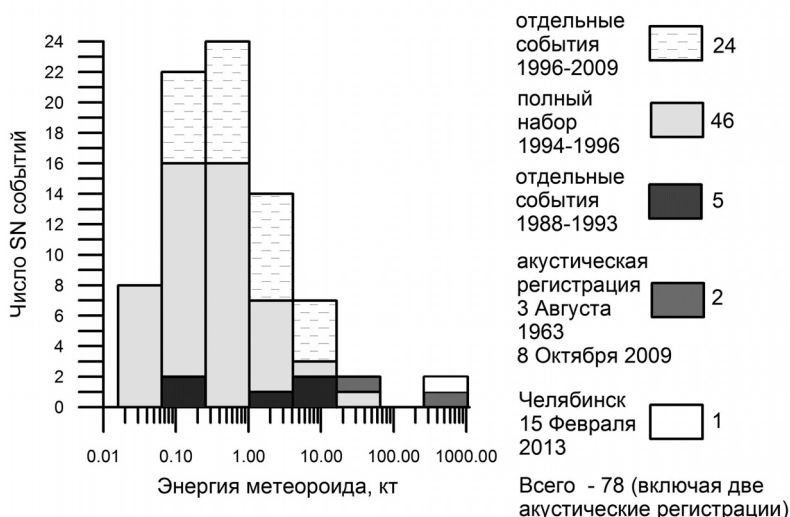


Рис. 8. Распределение спутниковых болидов по энергии: полные данные за 1994–1996 гг. – светло-серые, отдельные события 1988–1993 гг. – черные, отдельные события 1996–2009 гг. – с пунктиром. Только акустические данные – Индонезийский болид 2009 г., болид островов Принца Эдуарда 1963 г. – темно-серые. Челябинский болид – белый

Заключение

Челябинское событие выделяется из общего ряда метеорных явлений своим масштабом (энергией) и возникновением обширной зоны разрушения. Диапазон оценок энергии Челябинского события на данный момент составляет 300–600 кт, что при скорости входа $V \sim 19$ км/с дает возможность оценить массу метеороида в $M \sim 7\text{--}14 \cdot 10^6$ кг, что соответствует диаметру тела в $\sim 16\text{--}20$ м. Уже определены траектория, световая кривая этого метеороида, оценены высоты разрушения, тип этого разрушения [Емельяненко и др., 2013].

Показано, что при объяснении как наблюдающейся картины разрушений, так и времен прихода ударной волны, принципиальным является распределенный характер энерговыделения, основное выделение энергии произошло на высотах 40–23 км, там где и произошло основное разрушение метеороида.

Другая особенность Челябинского события состоит в том, что имеется большое количество разнообразных данных, в том числе инструментальных, которые позволяют изучить это событие и его последствия более детально, чем это обычно удастся. Большая часть этой информации еще не обработана и не опубликована, и полный анализ явления потребует немало времени. Предстоит уточнить долю вещества, оставленную в атмосфере в виде пыли и оценить полную массу упавших метеоритов, объяснить ионосферные эффекты, построить физико-математическую модель фрагментации метеороида, и т.д. Имеющиеся в ИДГ наработки позволяют производить комплексный интерактивный анализ разнородных данных и верифицировать компьютерные модели с подгонкой под инструментальные и наблюдательные данные.

Литература

- Borovička J., Spurný P., Šrbený L.* Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide // CBET, 3423, D.W.E. Green, ed., Central Bureau for Astronomical Telegrams, International Astronomical Union, p. 1–1, 2013.
- Brown, P.G., Spalding R.E., et al.* The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // *Nature*. 2002. V. 420. P. 294–296.
- Ens T.A., Brown P.G., Edwards W.N., Silber E.A.* Infrasound production by bolides: A global statistical study // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012. V. 80. P. 208–229.
- <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>
- <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lra1#summary>
- Mannan S., Lees F.P.* Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control // V. 1, 3 rd ed: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005.
- Miller S.D., Straka W.C., Bachmeier A.S., Schmit T.J., Partain P.T., Noh Y.-J.* Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event // 2013, DOI:10.1073/pnas.1307965110
- Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B., et al.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // *Icarus*. 1997. V. 130. № 2. P. 259–274.
- Popova O., Borovička J., Hartmann W., Spurný P. et al.* Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteorit. Planet. Sci.* 2011. V. 46. P. 1525–1550.
- ReVelle D.O.* Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // In: Remo JL (ed.) *Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects – the United Nations international conference*, New York Academy of Sciences. 1997. V. 822. P. 284–302.

- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. P. 381–390.
- Silber E., ReVelle D.O., Brown P., Edwards W.* An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements // *JGR*. 2009. V. 114. E08006.
- Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., et al.* Detection of meteoroid impacts by optical sensors in Earth orbit // *Hazards due to Comets and asteroids* / Ed. T. Gehrels. Tucson and London: Univ. Arizona Press. 1994. P. 199–220.
- Zuluaga Jorge I., Ferrin Ignacio, Geens Stefan.* The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage // *arXiv.org*. 2013. arXiv:1303.1796.
- Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах // М.: Изд. АН СССР, 1957. 502 с.
- Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере // Мир: 1975. 532с.
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др.* Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический вестник*. 2013 (в печати).
- Попова О.П., Немчинов И.В.* Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // *Катастрофические воздействия космических тел* / Ред. В.В. Адушкин и И.В. Немчинов. М.: Академкнига. 2005. С. 92–117.
- Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А., Соловьев А.В., Русаков Ю.С., Глухов А.Г., Silber E., Подобная Е.Д., Суркова Д.В.* Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 4: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2013 (в печати).
- Цикулин М.А.* Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел // М.: Наука. 1969. 132 с.