ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

В.В. Шувалов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова

Рассматривается генерация и распространение ударной волны в атмосфере Земли после падения Челябинского космического тела, определяется максимальное избыточное давление в разных точках земной поверхности, оценивается размер зоны повреждений. Исследованы разные способы задания энерговыделения вдоль траектории метеороида и зависимость зоны повреждений от характера энерговыделения. Определены времена прихода звукового сигнала (воздушной волны) в разные точки земной поверхности, анализируется форма импульса давления.

Введение

Модели движения, абляции и разрушения метеороидов в атмосфере Земли, позволяют получить неплохие оценки траектории, световой вспышки, распределения метеоритов на поверхности, если известны начальные (при входе в атмосферу) данные метеороида (скорость, угол наклона траектории, размер, тип тела) (см., например, статью Поповой в этом сборнике). Обратная задача – вычисление начальных данных метеороида по известным конечным – несколько сложнее, но тоже часто и успешно решается в метеоритике. В задачах такого типа ударные волны (УВ) в атмосфере вообще не рассматриваются, хотя, безусловно, они существуют всякий раз, когда тело движется со скоростью, превышающей скорость звука. Но для типичных размеров наблюдаемых метеороидов (первые метры и меньше) УВ заметно затухают в атмосфере, не вызывая разрушающих эффектов на поверхности. С другой стороны, при пролете очень крупных космических тел (>100 м), атмосферные УВ тоже обычно игнорируются, так как основные эффекты связаны с ударом космического тела по поверхности, образованием кратера и выбросов из него. До недавнего времени единственным примером удара космического тела промежуточного размера (10–100 м), для которого имелись данные об ударной волне, было Тунгусское явление (диаметр космического тела порядка 50–80 м), при моделировании которого приходилось рассматривать как разрушение тела в атмосфере, так и генерацию УВ и их взаимодействие с поверхностью. Челябинский метеороид (ЧМ) может рассматриваться как уникальный пример «второй» Тунгуски: при существенно меньшем начальном размере УВ оказались достаточно сильными вблизи поверхности и вызвали повреждения (главным образом в виде разбитых окон) на площади порядка 10 000 км^2. В статье, на примере Челябинского метеороида, рассматриваются способы моделирования УВ и ее взаимодействия с поверхностью для космических тел размером порядка нескольких десятков метров. Результаты сравниваются с наблюдавшимися разрушениями.

Модели, используемые для расчета ударной волны, вызванной падением Челябинского метеорита

Для расчета ударной волны, генерируемой при падении космического тела, используются различные подходы. Прямой способ состоит в расчете обтекания

космического тела сверхзвуковым потоком стандартными численными методами в дву- или трехмерной постановке. Однако, если тело сравнительно небольшое (много меньше характерной высоты атмосферы ~8 км), то размер расчетной области много меньше расстояния от метеороида до поверхности. Решение такой задачи возможно при использовании адаптивных вычислительных сеток (размер сетки «подстраивается» под рассчитываемое течение), как это сделано, например, при моделирования ЧМ в работе [Brown et al., 2013]. Более простой подход – экстраполяция расчета двумерного течения вокруг космического тела на трехмерную сетку для расчета ударных волн у поверхности – использовался при расчете Тунгусского события [Artemieva and Shuvalov, 2007]. Однако для расчета ударной волны на больших расстояниях от траектории нет необходимости детально рассматривать картину обтекания метеороида, достаточно задать правильное энерговыделение вдоль траектории. При этом поперечный размер зоны энерговыделения тоже не важен, если этот размер много меньше характеристической высоты атмосферы и расстояния до поверхности.

Получить правильное энерговыделение теоретическими методами невозможно, и не только из-за несовершенства существующих теоретических моделей, но и из-за случайного (вероятностного) характера разрушения метеороида. Поэтому используются данные наблюдений. Самый простой способ состоит в том, что рассматривается точечный взрыв на высоте максимальной вспышки с энергией, равной энергии метеороида. В этом случае возникает квазисферическая ударная волна (полной сферичности нет из-за изменения плотности воздуха с высотой). Однако на самом деле метеороид передает свою энергию воздуху вдоль всей траектории, при этом, если не учитывать торможение, деформацию и фрагментацию, то энерговыделение пропорционально плотности воздуха. Поэтому второй возможный способ расчета распространения воздушной волны состоит в рассмотрении цилиндрического взрыва, в котором энергия, равная энергии метеороида, распределена вдоль траектории пропорционально плотности воздуха. При этом генерируется квазицилиндрическая (точнее коническая с очень маленьким углом раствора) ударная волна. Третий способ состоит в комбинации первого и второго, то есть считается, что часть энергии равномерно распределена вдоль траектории (с учетом изменения плотности), а остальная выделяется в точках основных вспышек. В этом случае генерируется несколько ударных волн: квази-цилиндрическая и несколько (в зависимости от числа вспышек) квази-сферических. И, наконец, четвертый способ состоит в использовании световой кривой, т.е. энергия, равная энергии метеороида, выделяется вдоль траектории пропорционально интенсивности излучения (если она измерена) в каждой точке. Форма ударной волны и количество волн в этом случае может быть разным. Следует отметить, что в энерговыделение и в последующее формирование ударной волны вносят вклад как движение и торможение самого тела (или его фрагментов) так и движение и торможение продуктов абляции, но формально разделять эти два одновременных процесса и говорить о формировании двух волн- баллистической и абляционной (см. Бронштен, 1980) совершенно неправильно. Образуется одна ударная волна.

Для сравнения мы использовали все четыре описанных выше подхода. Расчеты проводились по программе SOVA [Shuvalov, 1999] на разностной сетке размером 500×150×250 ячеек в X, Y и Z направлениях соответственно. Ось X направлена вдоль траектории в направлении, противоположном движению метеороида, ось Y перпендикулярна траектории (обе на поверхности Земли), ось Z вертикальна. В центральной области (-25 км $< X <$ 30 км, $Y <$ 20 км, $Z <$ 40 км) размер ячейки ра-

вен 200×200×200 метров, вне этой области размеры ячеек увеличиваются по геометрической прогрессии.

Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html). Угол наклона траектории метеороида составлял 16.5 градусов к горизонту. Скорость метеороида на участке траектории выше 21 км считалась постоянной и равной 19 км/с [Popova et al., 2013]. Полная энергия считалась равной 300 и 500 кт с координатами вспышек: (20,0,31.7) – самая яркая вспышка, (0,0,25.8) – средняя, (–16,0,21) – малая [Borovička et al., 2013]. В работе [Popova et al., 2013] приведены несколько иные значения высот вспышек и угла наклона траектории. Однако отличия невелики, и не сильно влияют на описываемые ниже результаты. В расчетах не учитывался конечный участок траектории на высотах менее 21 км, где яркость свечения заметно уменьшилась, так как масса продолжающих полет фрагментов уже невелика по сравнению с начальной массой метеороида, скорость этих фрагментов заметно упала, основная масса метеороида уже, по-видимому, «сгорела», и энерговыделение незначительно по сравнению с более высокой частью траектории. Во всех расчетах атмосферного взрыва (кроме квазисферического) энергия выделялась в ячейках, через которые проходит траектория, в тот момент времени, когда через эту ячейку пролетал метеороид.

Рассматривались 4 варианта. В первом варианте вся энергия была выделена в точке (20,0,31.7), где произошла самая яркая вспышка. Во втором вся энергия была выделена вдоль отрезка траектории между точками (–16,0,21) и (100,0,55) пропорционально плотности воздуха. Такое энерговыделение было бы, если бы метеороид летел с постоянной скоростью и не разрушался (то есть имел постоянное поперечное сечение). В третьем варианте половина энергии (то есть 150 кт) была выделена вдоль траектории так же, как во втором варианте, 30% энергии (то есть 90 кт) в точке (20,0,31.7), 15% энергии (45 кт) в точке средней вспышки (0,0,25.8) и оставшиеся 5% (15 кт) – в конечной точке траектории (–16,0,21). В этом варианте учитывалось и непрерывное выделение энергии вдоль траектории и отдельные вспышки. И, наконец, в четвертом варианте энерговыделение задавалось пропорционально интенсивности свечения по кривой свечения, восстановленной по многочисленным видеозаписям [Popova et al., 2013].

Результаты расчетов

На рис. 1 показаны распределения относительной плотности $\rho/\rho_0(z)$ для третьего варианта (когда половина энергии выделяется вдоль траектории и половина в точках вспышек) и энергии метеороида 300 кт. $\rho_0(z)$ это равновесная плотность в атмосфере в зависимости от высоты. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию энерговыделения. В первые секунды ударные волны от вспышек имеют большую амплитуду и распространяются быстрее, чем квази-цилиндрическая волна. Однако в дальнейшем (на расстояниях в несколько километров от траектории) все волны заметно затухают и распространяются со скоростью, близкой к скорости звука. При этом во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (квазисферические) и квазицилиндрическая ударная волна, производимая равномерным выделением энергии вдоль траектории. Квазицилиндрическая волна на самом деле имеет вид конуса с очень маленьким углом раствора потому, что скорость метеороида (19 км/с) много больше скорости звука, с которой распро-

страняется быстро затухающая ударная волна. Важно отметить, что момент прихода ударной волны в какую-либо точку на поверхности 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.

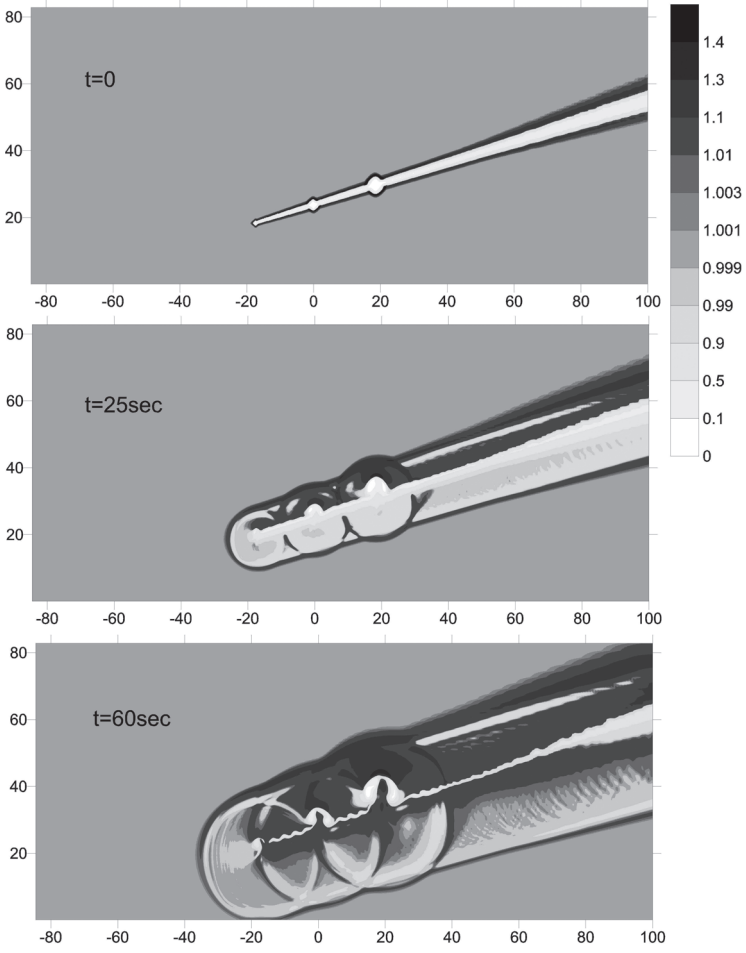

Рис. 1. Распределение относительной плотности ρ/ρ_0 в разные моменты времени t для варианта, когда половина начальной кинетической энергии выделяется во время трех вспышек и половина равномерно по траектории

В варианте 3 траектория резко обрывается в точке (–16,0,21), поэтому в области $X < -16$ км волна приходит на поверхность из этой точки. На самом деле траектория не обрывается резко, какие-то фрагменты продолжают лететь (некоторое время со сверхзвуковой скоростью) и генерировать ударную волну, однако, значительно более слабую, чем та, которая распространяется от области основного энерговыделения. Поэтому в области $X < -16$ км перед приходом «основной»

воздушной волны (приходящей из точки (–16,0,21)) возможна регистрация более слабых возмущений, генерируемых при торможении небольших фрагментов, «выживших» после основного разрушения. Однако в расчетах этот эффект не учитывался.

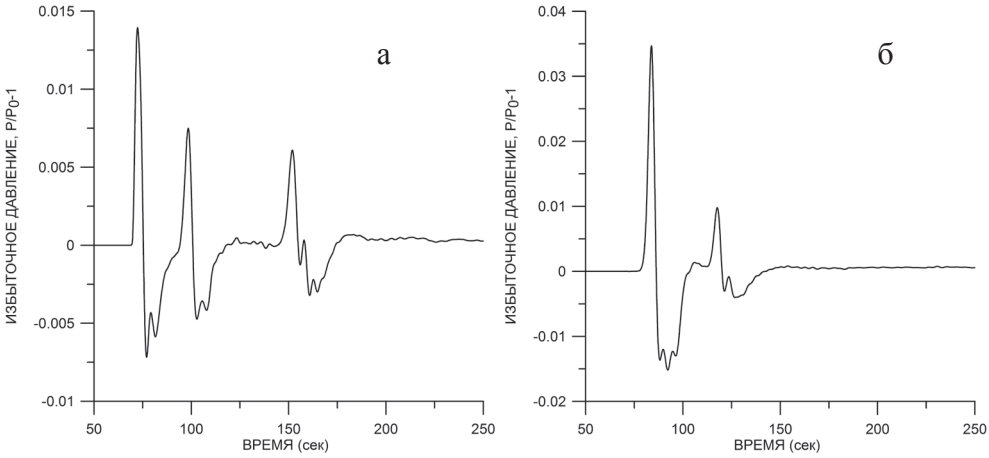

Рис. 2. Зависимости от времени относительного избыточного давления P/P_0-1 на поверхности Земли (на оси X) в точках $X = –16$ км (а) и $X = 0$ (б) для варианта 3, когда половина энергии выделяется непрерывно вдоль траектории и половина в трех вспышках

На рис. 2 для того же варианта показаны зависимости от времени избыточного давления. В точке $X = –16$ км отчетливо видны три пика, связанные с приходом волн от трех вспышек. Точка, где происходит последняя вспышка, совпадает с окончанием траектории. Поэтому четвертого пика нет. В точке $X = 0$ отчетливо выделяются только два пика давления. Это связано с тем, что квази-цилиндрическая волна и волны от двух последних вспышек приходят практически одновременно, формируя первый пик. Второй пик вызван приходом квази-сферической волны от самой мощной первой вспышки. Максимальное число пиков на единицу больше количества вспышек (если конечная точка траектории не совпадает со вспышкой). Эти результаты показывают, что попытки выделить моменты разрушения, ассоциированные со вспышками, и соответствующие разрушающие нагрузки по временам прихода последовательных звуковых сигналов (например, в [Borovicka et al., 2013]) могут приводить как к появлению «лишних» моментов разрушения, так и к преуменьшению их числа из-за сложного пространственного взаимодействия ударных волн.

В рассмотренном выше варианте 3 вспышки моделировались как точечные взрывы на фоне непрерывного выделения энергии. На самом деле точечных взрывов нет, просто непрерывная кривая энерговыделения и соответствующая ей непрерывная кривая свечения имеют отдельные максимумы. Один из вариантов кривой свечения и восстановленной по ней кривой энерговыделения [Popova et al., 2014] показан на рис. 3. Заранее не ясно, будут ли два ярко выраженных на рис. 3 пика энерговыделения приводить к генерации двух ударных волн, которые могут быть зарегистрированы на поверхности как два отдельных импульса давления. На рис. 4 показаны импульсы давления в двух точках на поверхности, полученные в расчете

варианта 4, когда энерговыделение задавалось в соответствии с кривой свечения, показанной на рис. 3. В точке $X = -20$ отчетливо видны два пика давления. Интервал времени между пиками давления, примерно 50 сек, соответствует расстоянию между пиками энерговыделения (5 км по высоте, то есть примерно 15 км по горизонтали). Поэтому разумно предположить, что пики соответствуют временам прихода возмущений от отдельных вспышек. В точке $X = 20$ км (под вспышками) так же, как и в предыдущем варианте два пика сливаются в один. Еще один, маленький, пик на высоте около 40 км, заметный на рис. 3, в расчетах никак не проявляется.

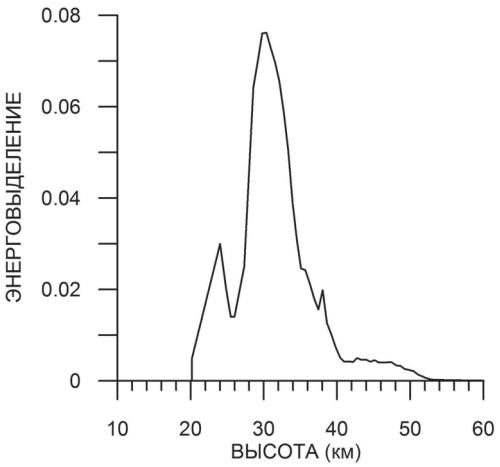

Рис. 3. Зависимость (безразмерная) энерговыделения от высоты

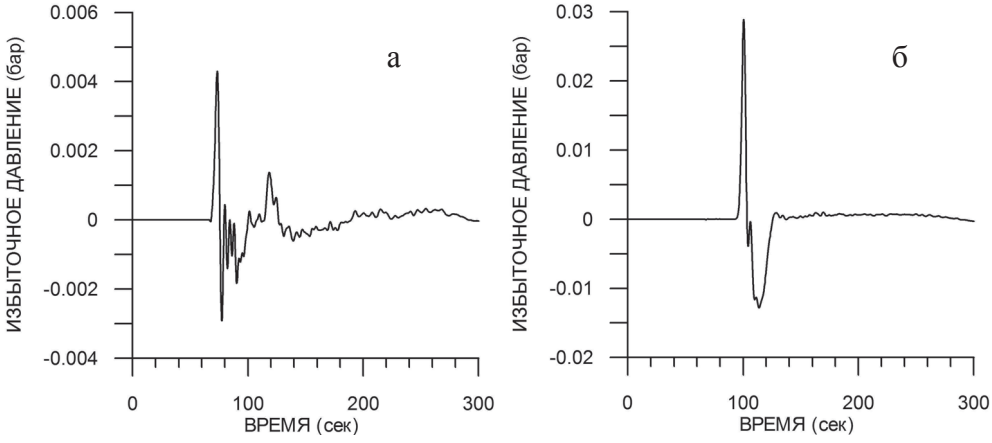

Рис. 4. Зависимости от времени относительного избыточного давления P/P_0-1 на поверхности Земли (на оси X) в точках $X = -20$ км (а) и $X = 20$ (б) для варианта 4, когда энерговыделение восстановлено по световой кривой, показанной на рис. 3

Сравнение с реальной картиной разрушений

Для сравнения расчетных результатов с реальной площадью разрушений необходимо знать величины избыточного давления, при которых разрушаются окна,

оконные переплеты и кирпичные стены. Согласно известной книге Гласстоуна и Долана (1977) для разрушения окон требуются избыточные давления 0,5–1 psi (1 psi = 6895 Па), то есть 3,4–6,9 кПа. По-видимому, эта величина завышена и соответствует 90–100% разрушению остекления. В книге Mannan and Lees (2005) собраны данные из разных источников, которые характеризуются заметным разбросом значений пороговых избыточных давлений. Поскольку даже звуковой удар от реактивного самолета иногда приводит к повреждению отдельных стекол, минимальное значение избыточного давления, разбивающее большие стекла, может быть очень низким, в диапазоне от 100 до 200 Па [Mannan and Lees, 2005]. По данным различных авторов избыточное давление, приводящее к разрушению 5% стекол, лежит в диапазоне 700–1700 Па, а 50–90% стекол – в диапазоне 1600–6900 Па. Кроме того, следует помнить, что величина критического для разрушения стекол давления зависит от большого числа различных факторов, в том числе от размера и толщины стекла. Стекла большей площади разбиваются при меньших нагрузках, поэтому во многих населенных пунктах пострадали здания с большими стеклами – школы, детские сады, клубы и т.д.

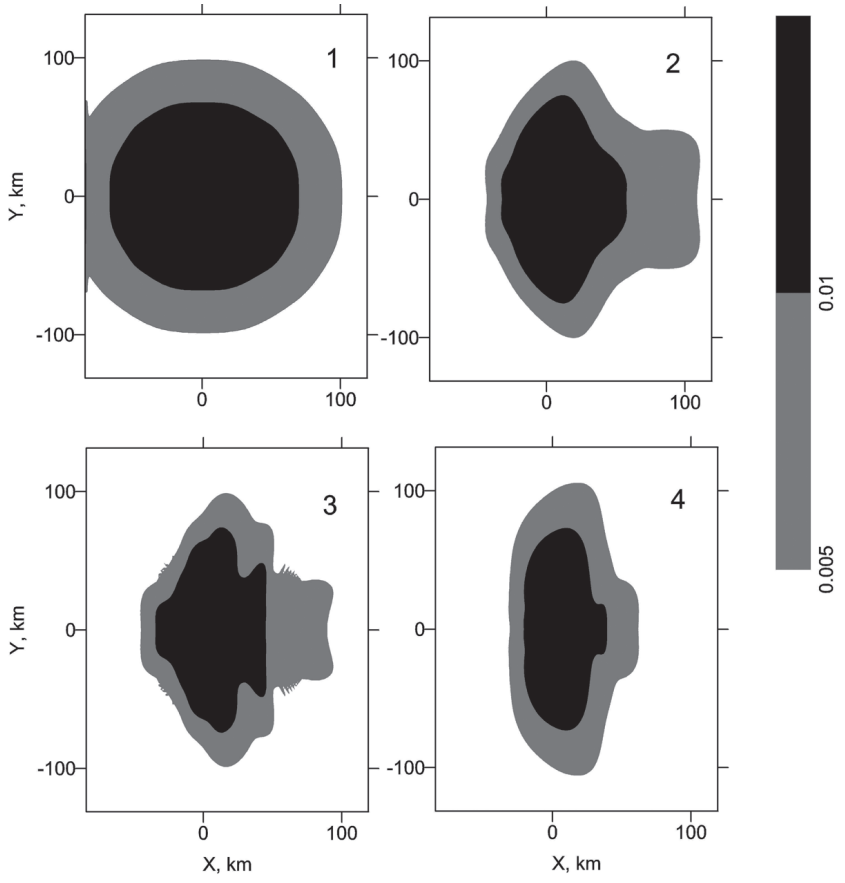

Рис. 5. Распределение избыточного давления на поверхности для вариантов 1, 2, 3 и 4 с энергией 300 кт. Черным цветом закрашены области, где максимальное избыточное давление превышает 1000 Па, серым – 500 Па

Широко используется разделение области разрушений на 4 зоны (A, B, C, D), в которых область легких разрушений (D) включает в себя повреждения остекления, стеновых панелей и крыш. В Челябинской области наблюдалось разрушение остекления, повреждения подвесных потолков, облицовочных панелей и т.д. Существенных структурных повреждений, кроме стены цинкового завода, уже находившейся в аварийном состоянии, и небольшого количества трещин в некоторых зданиях зафиксировано не было [Popova et al., 2013]. Считается, что зона D соответствует избыточному давлению, не превышающему 3500–5000 Па [Mannan and Lees, 2005]. Brown et al (2013) оценили скорость разлета осколков стекла по данным ряда видеозаписей в Челябинске в 7–8 м/с, что примерно соответствует избыточному давлению в 2000–3500 Па [Mannan and Lees, 2005].

Основываясь на данных, собранных в [Mannan and Lees, 2005], можно рассматривать избыточное давление 500 Па (0,5% от нормального давления) как границу области поврежденных окон, а 1000 Па – как границу более существенных массовых повреждений. Скорее всего, в большей части области разрушений избыточное давление не превышало 3500–5000 Па.

На рис. 5 показаны для всех четырех вариантов выделения энергии и полной энергии 300 кт площади поверхности, где избыточное давление превышало 500 и 1000 Па. 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 расстоянием до него. При точечном энерговыделении (первый вариант) зона повышенного давления, естественно, симметрична, имеет форму круга. Во всех вариантах с выделением энергии (всей или частично) вдоль траектории зона больших избыточных давлений вытянута в направлении, перпендикулярном траектории, что соответствует наблюдавшейся картине.

На рис. 6,а приводится карта зарегистрированных разрушений с наложенным на нее расчетным контуром избыточных давлений (вариант 4, для двух значений энергии – 300 и 520 кт). Видно, что область избыточного давления в 1000 Па хорошо совпадает с наблюдающейся картиной разрушений. На рис. 6,б приведены контуры избыточного давления для значений в 500–1000–2000–3000–4000–4300 Па. На территории Челябинска избыточное давление варьировалось в диапазоне от 1000 до 4000 Па, достигая наибольших значений в юго-западных районах города. Brown et al. (2013), анализируя долю разбитых стекол в разных районах Челябинска, оценили избыточное давление в среднем в 2600–4000 Па, что вполне согласуется с нашими оценками.

Большая часть разрушений пришлась на наиболее населенные – Челябинск и Копейск, а также на близко расположенные к траектории – пос. Коркино и Еманжелинск. Наибольшее число пострадавших также пришлось на Челябинск, а наибольшая доля обратившихся за медпомощью (0,16%) – на близко расположенное к траектории Коркино, где избыточное давление могло достигать 3000–4000 Па (рис. 6,б).

Следует отметить, что расчеты взаимодействия УВ с поверхностью предполагали абсолютно гладкую поверхность. В городских условиях, скорее всего, имели места многочисленные отражения и наложения УВ, которые могли приводить к локальным увеличениям избытка давления. Brown et al. (2013) предполагают, что именно такое увеличение давления возникло в районе цинкового завода и привело к обрушению стены.

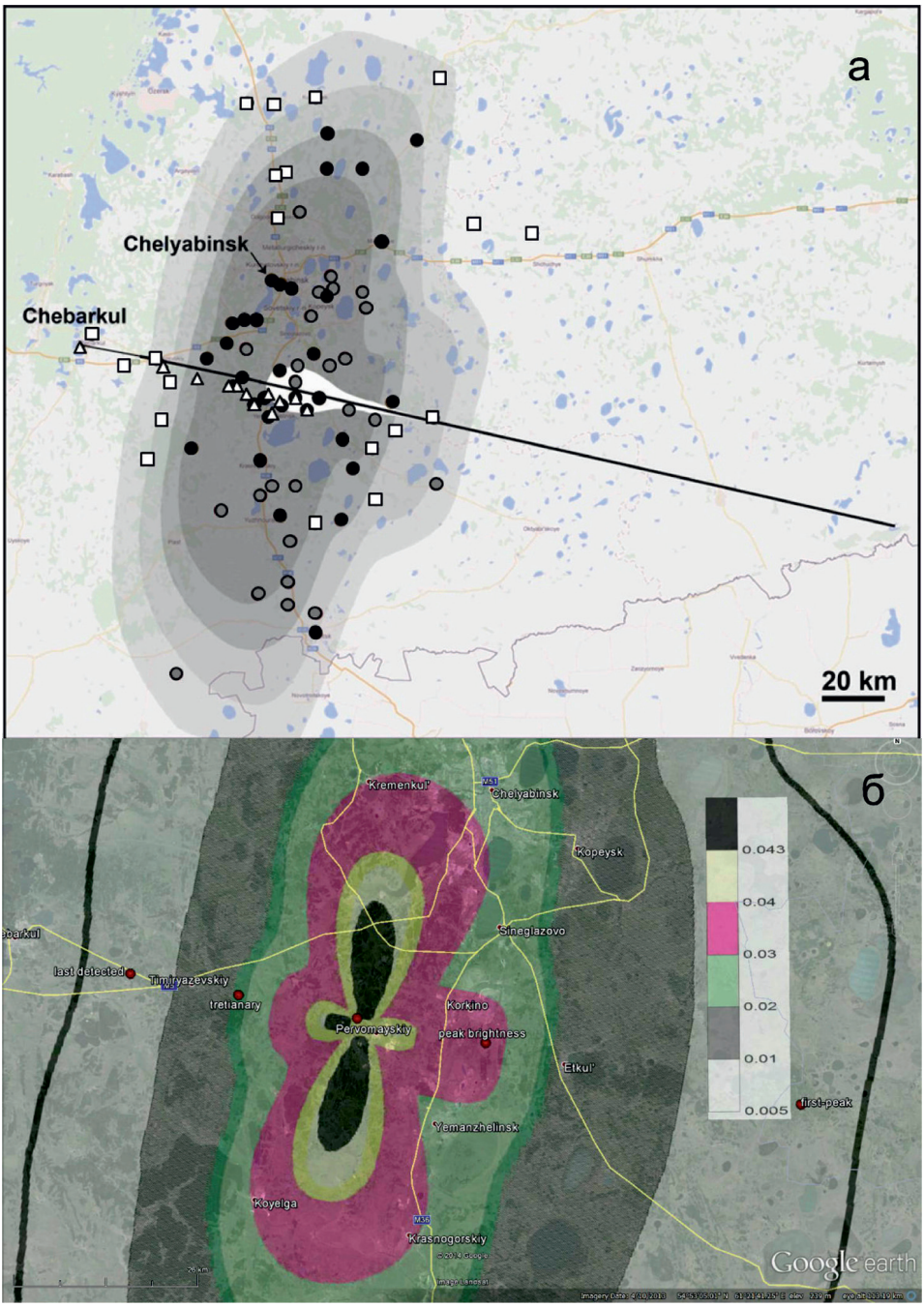

Рис. 6. (а) Область разрушений с наложенными результатами расчетов для начальных значений энергии в 300 и 520 кт ТНТ – области соответствуют значениям избыточного давления в 500 Па и 520 кт, 500 Па и 300 кт, 1000 Па и 520 кт, 100 Па и 300 кт (от светлого к темному). Серые символы соответствуют официальному списку наиболее пострадавших поселений, черные – пункты, разрушения в которых были подтверждены во время полевых исследований (белые квадраты – нет разрушений). Черная линия – траектория болида, белые треугольники – области находок метеоритов; (б) Контуры областей избыточного давления >500–1000–2000–3000–4000–4300 Па для энергии 520 кт

Обсуждение и выводы

При анализе движения в атмосфере и разрушения космического тела важно понимать, как распространяется ударная волна, генерируемая этим явлением. Один из популярных, но ошибочных способов оценки происходящего состоит в том, что метеорное явление отождествляется со взрывом на высоте, соответствующей максимуму свечения (основной вспышки), и расстояние до точки взрыва оценивается как время между вспышкой и приходом ударной волны, умноженное на скорость звука. Приведенные выше результаты показывают, что время прихода волны зависит только от траектории метеороида и ее конечной точки (после которой энерговыделение становится пренебрежимо малым) и не зависит от того, в каких точках этой траектории и на какой высоте происходят вспышки (пики энерговыделения).

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:

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0}[(x + z_0 \tan^{-1} \alpha)^2(\sin \alpha)^2 + y^2]^{1/2} \text{ при } x > z_0 \tan \alpha$$

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

Время отсчитывается от момента достижения метеороидом конечной точки траектории, c_0 – скорость звука, угол наклона ударной волны равен $\alpha = \beta - \arcsin(c_0/V)$. Метеороид движется справа налево в плоскости $Z0X$, и координаты конечной точки траектории – $(0, 0, z_0)$.

Сравнение оценок времени прихода с наблюдаемыми временами показывает совпадение с точностью до 3–5 с (рис. 7). Наблюдаемые данные представлены набором видеозаписей стационарных видеокамер компании «Интерсвязь» (предоставлены генеральным директором Э.О. Калининым) и рядом случайных любительских видеозаписей. Эти видеозаписи синхронизированы по времени и расположены, кроме Челябинска, в Миассе, Златоусте, Чебаркуле и Кургане. На видеозаписях 18-ти камер можно определить время прихода ударной волны и ее задержку по отношению к моменту максимальной светимости. Предположение о том, что основное энерговыделение закончилось на высотах порядка 29–34 км, не согласуется со временами прихода волны в пункты, расположенные близко к траектории. Уменьшение высоты окончания энерговыделения до 23–21 км позволяет получить удовлетворительное согласие с наблюдаемыми данными. Это сравнение подтверждает, что за формирование УВ отвечает выделение энергии на протяженном участке траектории, ниже 21–23 км выделилась незначительная доля начальной энергии.

Вспышки излучения, связанные с максимумами энерговыделения, могут генерировать свои локальные ударные волны, которые, однако, распространяются внутри области, ограниченной внешней конической (почти цилиндрической, так как угол раствора очень маленький) волны (см. рис. 1). Эти отдельные ударные волны могут проявляться как отдельные пики давления после прихода первого основного возмущения. Количество таких пиков и интервалы времени между ними зависят от параметров вспышек и от расположения точки наблюдения и поэтому не могут быть использованы для определения высот фрагментации метеороида.

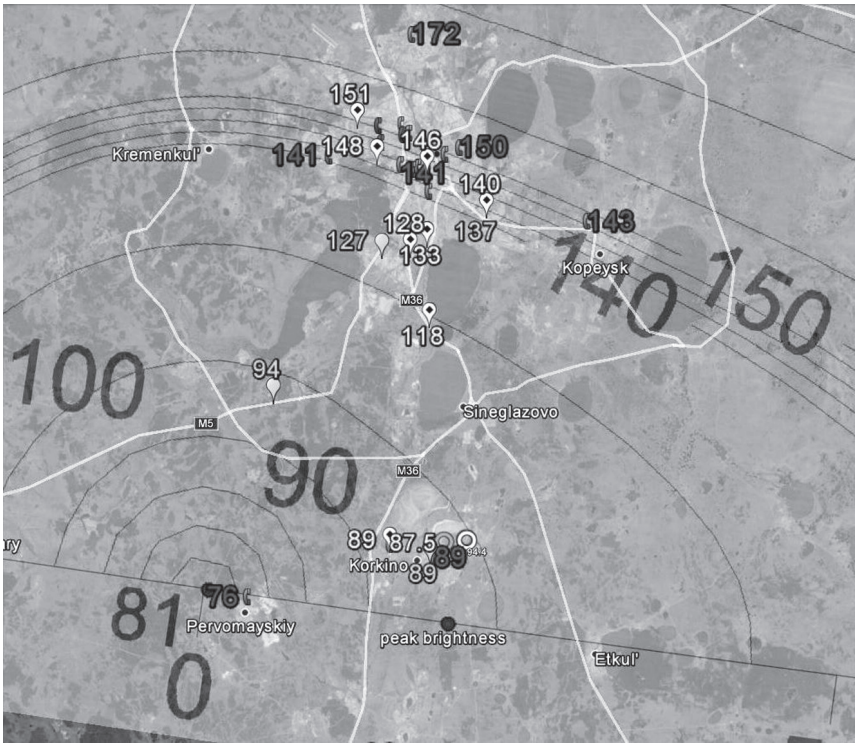

Рис. 7. Черные линии показывают времена прихода ударной волны, полученные по приближенным формулам в предположении, что энерговыделение заканчивается на высоте 23 км, красные цифры соответствуют наблюдаемым временам. Ось *OX* направлена вдоль траектории и начинается в точке, соответствующей высоте 23 км

Расчеты избыточного давления на поверхности показывают, что при энерговыделении 300–500 кТ область, где избыточное давление превышает 500–1000 Па, с хорошей точностью совпадает с зоной, где расположены наиболее пострадавшие населенные пункты. Наиболее близкая к наблюдаемой форма пораженной области получается в расчете 4 с использованием световой кривой для построения зависимости энерговыделения от высоты. Но даже простейший расчет с точечным энерговыделением неплохо описывает область разрушений, то есть этот упрощенный (и быстрый) метод можно использовать для предварительных оценок.

С учетом неопределенности значений избыточного давления, при котором разбиваются стекла в окнах разного типа и по-разному ориентированных, неопределенности в геометрии энерговыделения и погрешностей численной модели можно сказать, что выделенная энергия находится в диапазоне от 300 до 700 кт ТНТ. С большей точностью определить энергию космического тела по наблюдаемым разрушениям, по-видимому, нельзя.

Авторы благодарны В.В. Светцову за плодотворные обсуждения Челябинского события.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.

Artemieva N., Shuvalov V. 3D Effects of Tunguska Event on the Ground and in Atmosphere 38th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXVIII), held March 12–16, 2007 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1338, p. 1537.

Borovička, Jiří; Spurný, Pavel; Brown, Peter; Wiegert, Paul; Kalenda, Pavel; Clark, David; Shrbený, Lukáš. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature 2013. V. 503, No 7475, P. 235–237.

Glasstone S., Dolan P.J. The Effects of Nuclear Weapon. 1977. 3-rd edition, United States Department of Defence.

S. Mannan S., Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification // Assessment and Control, vol. 1, 3rd edition (Elsevier Butterworth-jHeinemann, 2005).

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. 1999. v. 9, No.6, p. 381–390.