

УДК 52-424

ОЦЕНКА РАЗМЕРА ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЙ, ПРОИЗВОДИМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ УДАРАМИ АСТЕРОИДОВ РАЗМЕРОМ 10–300 МЕТРОВ

© 2013 г. В. В. Шувалов, В. В. Светцов, И. А. Трубецкая

Институт динамики геосфер РАН, Москва; Московский физико-технический институт

Приведены результаты расчетов вертикального падения на Землю каменных астероидов размером от 10 до 300 метров. Показано, что наиболее эффективными с точки зрения разрушения являются тела размером около 50 метров. Они же являются наиболее опасными, дают максимальное производство площади разрушенной области на вероятность падения.

DOI: 10.7868/S0320930X13040233

ВВЕДЕНИЕ

Удары космических тел по Земле вызывают эффекты (поражающие факторы), которые могут сразу после удара или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, а также на хозяйственные объекты. При ударах тел диаметром до 300 м (с кинетической энергией менее 100 Мт) основными поражающими факторами являются ударная волна, сейсмические волны (землетрясение), световое излучение (пожары) и цунами (Тооп и др., 1997). При ударах космических тел размером от десяти до нескольких десятков метров при типичных параметрах этих тел основным поражающим фактором остается лишь ударная волна, а роль остальных эффектов становится незначительной. Ярким примером воздействия ударной волны является падение обыкновенного хондрита размером менее 20–30 м, которое произошло 15 февраля 2013 года в окрестностях Челябинска. Число людей, пострадавших от такого воздействия, превысило 1500, и был нанесен значительный материальный ущерб. В действительности при падении космического тела на Землю возникает не одна, а несколько взаимодействующих с поверхностью Земли и между собой ударных волн. Количество этих волн и их интенсивность зависят в основном от размера, скорости, угла наклона траектории и плотности падающего тела.

Предыдущие теоретические исследования падений космических объектов разных размеров (Шувалов, Трубецкая, 2005; Shuvalov, Trubetskaia, 2008) показывают, что при падении космического тела на Землю реализуется один из четырех сценариев (в порядке уменьшения размеров тела):

– кратерообразующий удар (когда космическое тело, быть может даже сильно раздробленное, достигает поверхности Земли и образует кратер);

– поверхностный гигантский болид (ГБ) или, другими словами, поверхностный “метеорный взрыв” (когда высокоскоростная струя, состоящая из мелких фрагментов и паров метеороида и нагретого в ударной волне воздуха, ударяет по поверхности Земли, не образуя кратера);

– воздушный ГБ или воздушный “метеорный взрыв” (когда продукты полностью разрушенного и испаренного метеороида тормозятся в атмосфере и не достигают поверхности Земли, но ударная волна и тепловое излучение производят заметные разрушения и пожары);

– обыкновенные метеорные явления (которые могут наблюдаться с Земли и из космоса, но не оставляют заметных следов на поверхности Земли).

Конечно, между этими режимами нет резких границ и возможны промежуточные сценарии.

Типичным примером воздушного метеорного взрыва является хорошо известная Тунгусская катастрофа (см. Vasilyev, 1998), которая была вызвана падением космического тела с энергией от десяти до нескольких десятков мегатонн (см., например, Светцов, Шувалов, 2005). В этом случае наблюдаются всего две ударные волны: так называемая “взрывная волна”, падающая на землю, и отраженная ударная волна. Более сложное течение реализуется при поверхностных метеорных взрывах и, особенно, при кратерообразующих ударах. В последнем случае ударные волны генерируются при пролете космического тела через атмосферу, при выбросе вещества из кратера и при последующем падении выбросов под действием силы тяжести.

Целью данной работы является оценка силы воздействия ударных волн, возникающих при падении каменных астероидов размером от 10 до 300 м. Этот диапазон размеров представляет особый интерес с точки зрения астероидной опасности. Во-первых, такие тела падают на Землю относительно часто, в среднем раз в 10–100 000 лет (Иванов, 2005); во-вторых, небольшие тела трудно обнаружить заранее, задолго до падения; в-третьих, как будет показано далее, тела размером до 100 м “наиболее эффективны” с точки зрения вызываемых на поверхности Земли разрушений.

Для решения поставленной задачи мы провели численное моделирование ударов каменных астероидов в указанном диапазоне размеров для типичной скорости падения и рассчитали временные зависимости давления и скорости воздуха у поверхности Земли на разных расстояниях от места падения космического тела.

МЕТОД РАСЧЕТА

Численное моделирование ударов сопряжено с определенными сложностями, в первую очередь потому, что в рассматриваемом диапазоне размеров ударников наблюдаются все четыре возможных сценария удара: кратерообразующие удары, поверхностные и воздушные “метеорные взрывы” и обычные метеорные явления. Поэтому при численном моделировании необходимо рассматривать все стадии удара: пролет через атмосферу, образование кратера, взаимодействие выбросов из кратера с атмосферой.

Для решения поставленной задачи была разработана двухступенчатая модель. На первом этапе моделировалось движение метеороида в атмосфере с учетом его деформации, торможения, разрушения и испарения. Для этого использовались модель, уравнения и численная схема, описанные в работах (Shuvalov, Artemieva, 2002; Шувалов, Трубецкая, 2007). Задача решалась в системе координат, связанной с падающим телом, которое обдувалось воздухом. Плотность воздуха в набегающем потоке изменялась в соответствии со стратификацией атмосферы, а скорость потока была равна скорости тела. При торможении тела скорость набегающего потока соответственно уменьшалась. Расчеты заканчивались, когда метеороид разрушался и тормозился (его скорость в системе координат, связанной с Землей, падала в 5 раз) или достигал поверхности Земли. Полученные распределения газодинамических и термодинамических параметров использовались в качестве начальных данных для второго этапа расчетов, на котором в системе координат, связанной с поверхностью Земли, моделировалось либо взаимодействие разрушенного метеороида с атмосферой, либо образование кратера и взаимодействие продуктов выброса с атмосферой. Обе модели ре-

ализовывались с помощью численного метода SOVA (Shuvalov, 1999).

В расчетах использовались таблицы уравнений состояния и пробегов излучения воздуха (Кузнецов, 1965; Авилова и др., 1970), Н-хондрита (Косарев, 1999) и таблицы, полученные с помощью программы уравнения состояния ANEOS (Thomson, Lauson, 1972) с начальными данными (Pierazzo и др., 1997) для гранита.

Мы рассматривали вертикальные удары астероидов сферической формы с плотностью 2.65 г/см^3 , скорость входа в атмосферу составляла 18 км/с .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Во время падения космического тела в атмосфере оно разрушается и распадается на отдельные фрагменты, которые испаряются под действием излучения воздуха, нагретого в ударной волне. Совокупность фрагментов под действием давления за фронтом ударной волны увеличивает свою площадь поперечного сечения, что в конечном итоге приводит к быстрому торможению и выделению энергии в атмосфере. Отметим, что чем крупнее космическое тело, тем дольше его стадия полета, тем глубже оно проникает в атмосферу, дробится на более мелкие осколки, образует огненный шар большего размера и с большей вероятностью полностью испаряется. Тела размером порядка 10 м, как правило, начинают разрушаться на высотах 40–50 км и тормозятся на высотах 20–30 км (Попова, Немчинов, 2005). При этом часть фрагментов может сохраниться и выпасть на поверхность Земли, как это произошло в случае падения метеороида 15 февраля 2013 г.

На рис. 1 показаны результаты численного моделирования падения астероида диаметром 40 м. По нашей классификации – это типичный воздушный “метеорный взрыв”. Метеороид разрушается на высоте около 15 км, на высоте 10 км его вещество полностью испаряется и образуется высокоскоростная газовая струя, состоящая из горячих паров и ударно-нагретого воздуха, которая тормозится на высоте около 6 км. Ударная волна достигает поверхности Земли с амплитудой, соответствующей избыточному давлению Δp около 20 кПа, отражается от поверхности и взаимодействует с падающей волной, в результате чего на больших расстояниях (порядка 10 км) формируется волна, распространяющаяся вдоль поверхности (осуществляется маховское отражение).

Рисунок 2 демонстрирует картину течения при поверхностном “метеорном взрыве”, возникающем при падении 70-метрового астероида. Газовая струя, формирующаяся после полного испарения осколков метеороида, ударяет по поверхности Земли со скоростью $1–2 \text{ км/с}$. Горячий газ с

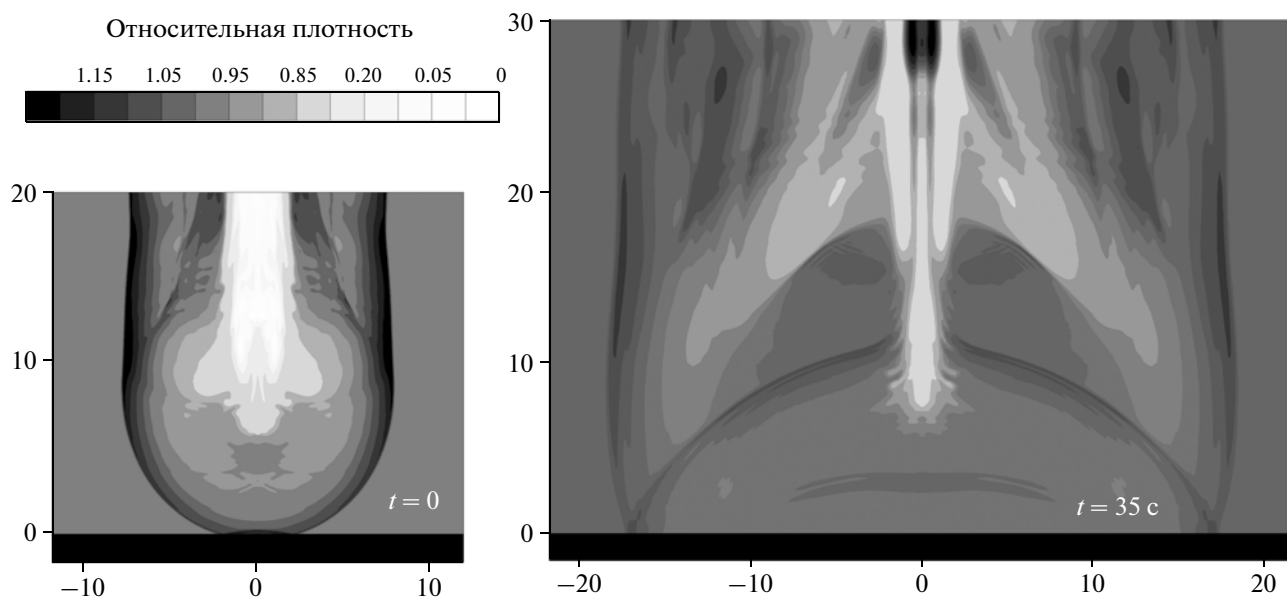


Рис. 1. Картина течения при вертикальном падении на Землю астероида диаметром 40 м. Показано распределение относительной плотности $\rho/\rho_0(z)$, где $\rho_0(z)$ — стандартная плотность воздуха на высоте z . За начало отсчета времени принят момент касания ударной волной поверхности Земли. Расстояния вдоль горизонтальной и вертикальной осей указаны в километрах.

температурой порядка нескольких тысяч градусов (“огненный шар”) быстро растекается вдоль поверхности Земли и формирует мощную ударную волну (с амплитудой выше 100 кПа на расстояниях до 10 км), распространяющуюся вдоль поверхности. Через 20–30 с горячий газ устремляется вверх вдоль метеорного следа и вылетает на высоты до нескольких сотен километров.

На рис. 3 показано формирование ударной волны у поверхности Земли при кратерообразующем ударе. Астероид диаметром 300 м заметно деформируется при пролете сквозь атмосферу, но почти не тормозится и падает на поверхность Земли как компактное тело. Начальные параметры ударной волны, распространяющейся вдоль поверхности, определяются взаимодействием ударной волны, возникающей при движении падающего тела, с разлетающимися продуктами кратерообразования. На поздней стадии ($t > 30$ с) вторичные ударные волны могут возникать при падении выброшенного из кратера вещества на землю.

Эффекты разрушения ударной волной обычно соотносят с максимумом избыточного давления за фронтом ударной волны. Результаты ядерных испытаний (Glassone, Dolan, 1977) показывают, что кирпичные стены толщиной 24–36 см начинают разрушаться при избыточном давлении 20 кПа (0.2 бар), стены из бетонных блоков толщиной 24–36 см полностью разрушаются при избыточном давлении 35 кПа (0.35 бар). Мы использовали эти значения для оценки разрушений.

Зависимости избыточного давления от расстояния для разных вариантов вертикальных ударов показаны на рис. 4, а в табл. 1 приведены для каждого варианта размеры областей, в которых избыточное давление превышает критические величины $\Delta p = 35$ кПа и $\Delta p = 20$ кПа. Из рис. 4 видно, что астероиды размером менее 20 м не производят серьезных разрушений зданий. При падении десятиметрового тела максимальное избыточное давление не превышает 1–2 кПа. При падении тел размером более 30 м разрушения почти неизбежны. Последствия падения тел размером 20–30 м очень сильно зависят от их прочности и даже формы. Отметим, что эти результаты относятся только к каменным астероидам. Более тяжелые и

Таблица 1. Радиусы областей, где избыточное давление превышает 35 и 20 кПа, и эффективности разрушения ξ_{20} и ξ_{35} , показывающие, какая пораженная площадь приходится на единицу массы ударника диаметром D . В последней строке таблицы помещены радиусы областей $R_{20\text{ см}}$ с избыточным давлением более 20 кПа, вычисленные по приближенным формулам (Collins и др., 2005)

D , м	10	20	30	40	50	70	100	200	300
R_{35} , км	—	—	—	—	10.5	13.3	16.5	20	30
R_{20} , км	—	—	—	9	16	20	24	31	42
ξ_{35} , м ² /кг	—	—	—	—	2.0	1.2	0.62	0.11	0.07
ξ_{20} , м ² /кг	—	—	—	2.87	4.6	2.6	1.3	0.27	0.14
$R_{20\text{ см}}$, км				10.5	15.4	6.8	16.5	42	65

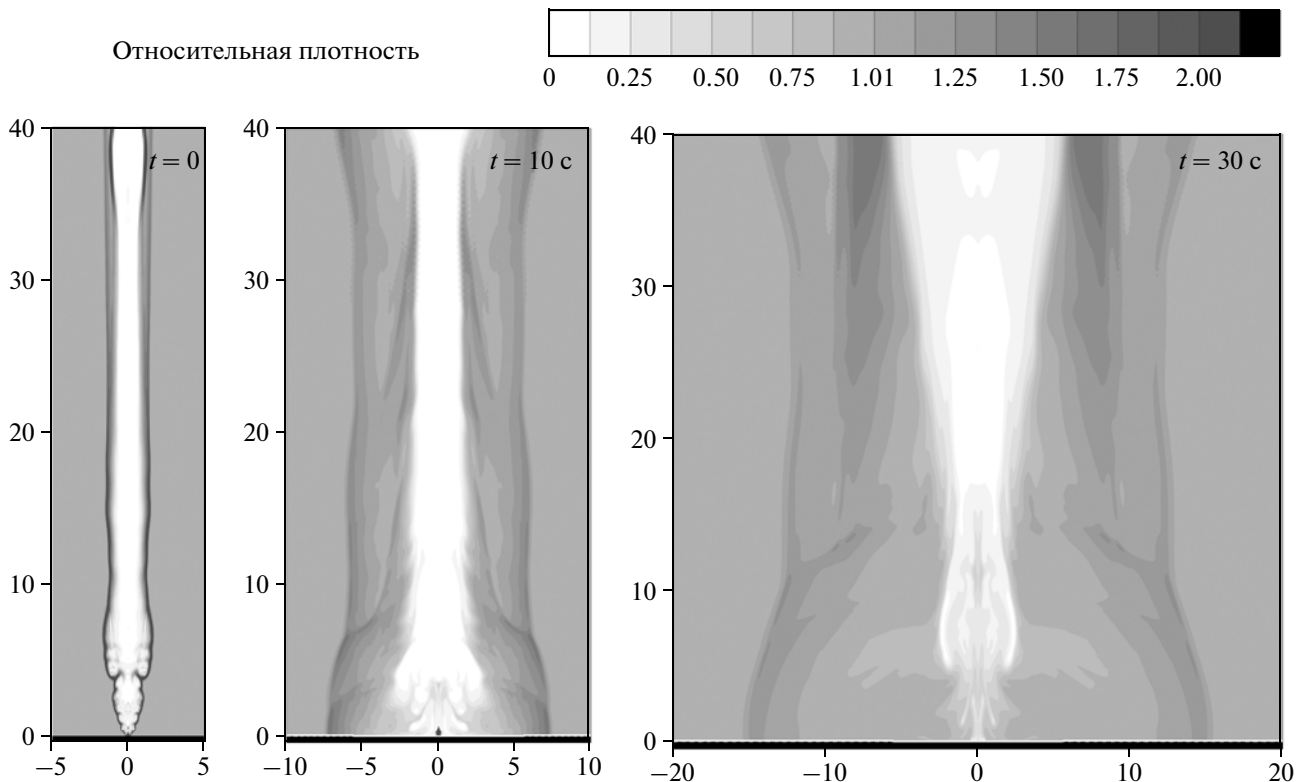


Рис. 2. Картина течения при вертикальном падении на Землю астероида диаметром 70 м. Показано распределение относительной плотности $\rho/\rho_0(z)$, где $\rho_0(z)$ – равновесная плотность воздуха на высоте z . Расстояния вдоль горизонтальной и вертикальной осей указаны в километрах.

прочные железные метеороиды могут достичь поверхности Земли и образовать кратеры или кратерные поля даже при размерах в несколько метров. А более легкие и менее прочные кометоподобные тела легче разрушаются и испаряются в атмосфере на больших высотах при тех же размерах (Шувалов, Трубецкая, 2007), поэтому критические для разрушения размеры комет должны быть примерно в 1.5 раза больше, чем у астероидов. Также критические для разрушения размеры увеличиваются при уменьшении угла наклона траектории к поверхности Земли (угол 90° соответствует вертикальному удару). Влияние угла наклона траектории на форму и размер области разрушения (т.е. области, где избыточное давление превышает некоторое критическое значение) не так очевидно и требует дополнительного исследования.

Определим эффективность разрушения ξ как отношение площади поверхности Земли, где достигается критическое избыточное давление Δp , к массе ударника:

$$\xi = \pi \frac{\pi R^2}{\frac{1}{6} \pi D^3 \rho_m},$$

где R – радиус зоны разрушения, D – диаметр ударника, ρ_m – плотность вещества ударника. Параметр ξ размерный, будем измерять его в $\text{м}^2/\text{кг}$. Значения ξ_{20} и ξ_{35} для $\Delta p = 20 \text{ кПа} = 0.2p_0$ и $\Delta p = 35 \text{ кПа} = 0.35p_0$ (где p_0 – нормальное давление у поверхности Земли) соответственно представлены в табл. 1. Параметры ξ показывают, какая площадь разрушений (в квадратных метрах) приходится на единицу массы (килограмм) падающего тела.

Из табл. 1 видно, что существует максимальная эффективность разрушения, соответствующая размеру астероидов около 50 м (для вертикального удара). С точки зрения сценария удара это соответствует границе между поверхностными и воздушными “метеорными взрывами”.

Обратим внимание на то, что в Интернете имеется программа (<http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects>), которая на основании оценочных формул (Collins и др., 2005) может давать величину максимального давления за фронтом ударной волны на заданном расстоянии от места удара. Для вертикальных ударов тел с нашими параметрами мы вычислили по этой программе радиусы, где избыточные давления превышают величину 20 кПа и поместили эти значения в табл. 1. Видно,

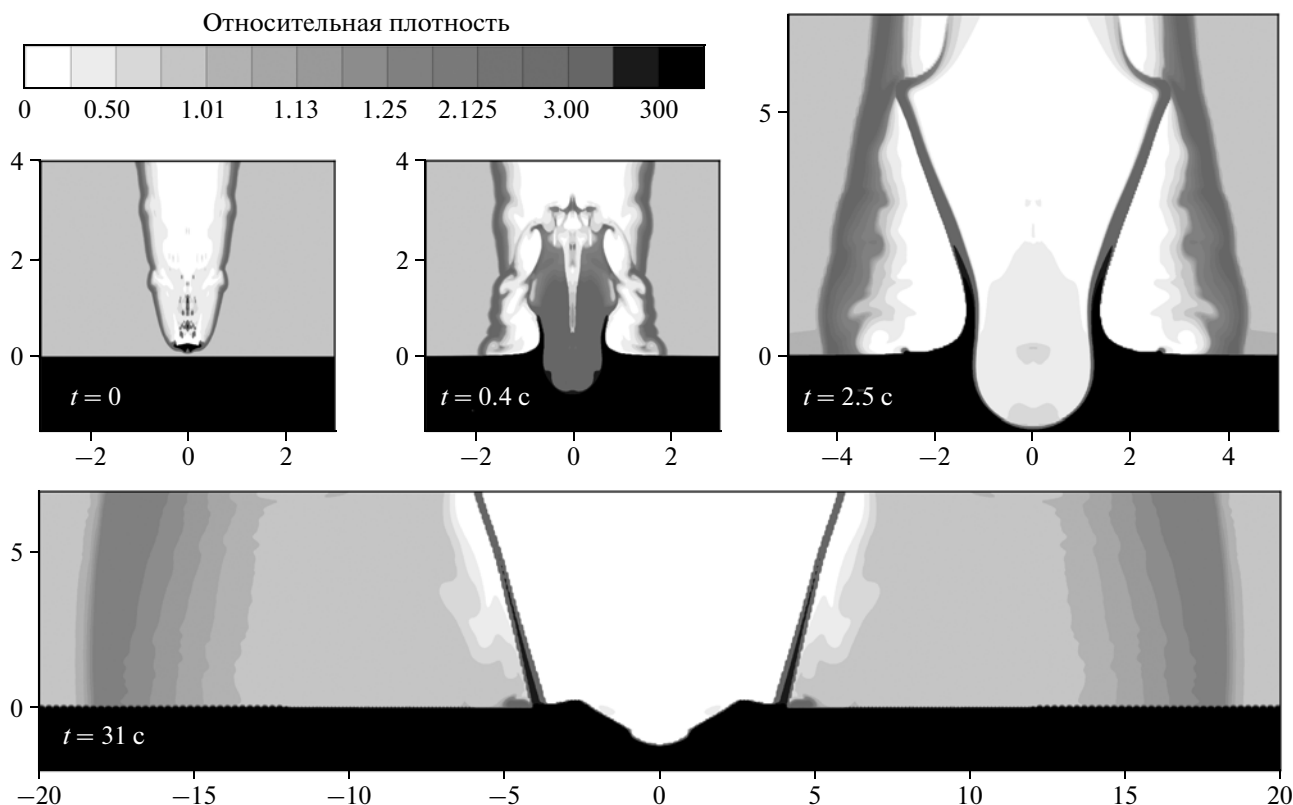


Рис. 3. Картина течения при вертикальном падении на Землю астероида диаметром 300 м. Показано распределение относительной плотности $\rho/\rho_0(z)$, где $\rho_0(z)$ – равновесная плотность воздуха на высоте z . Расстояния вдоль горизонтальной и вертикальной осей указаны в километрах.

что для небольшого тела диаметром 40 м оценочные формулы для высотного взрыва (Collins и др., 2005) дают приемлемую точность. Для кратерообразующего удара тела диаметром 300 м приближенные формулы (Collins и др., 2005) для взрыва около поверхности более чем в два раза завышают площадь поражения. В переходной области поверхностных “метеорных взрывов” формулы (Collins и др., 2005) не работают. Так, для вертикального удара программа, находящаяся в Интернете, дает $R_{20} = 6.8$ км вместо полученных нами 20 км, что почти на порядок занижает площадь поражения ударной волной.

Существует другой важный фактор поражения – динамическое давление, которое определяет повреждения, вызванные сильным ветром, возника-

ющим за фронтом ударной волны. На рис. 5 показаны зависимости максимальной скорости ветра в зависимости от расстояния от эпицентра удара, а в табл. 2 приведены размеры областей, где скорость ветра достигает ураганной (30 м/с), при которой деревья ломаются и могут вырываться с корнем.

Так же, как и при рассмотрении избыточного давления, существует максимум эффективности воздействия ветра (вывала деревьев в случае падения астероида над лесным массивом), который приходится на тот же размер астероида порядка 50 м, что соответствует переходному режиму между воздушным и поверхностным “метеорным взрывом”.

АСТЕРОИДНАЯ ОПАСНОСТЬ, ОЦЕНКИ РИСКА

Для оценки рисков, связанных с какой-либо катастрофой, принято рассматривать произведение вероятности катастрофического события на какую-либо величину, характеризующую ущерб, нанесенный рассматриваемым событием. В нашем случае естественно рассматривать произведение F вероятности удара космического тела

Таблица 2. Радиусы областей, где скорость ветра превышает 30 м/с и эффективности разрушения ξ_u , показывающие, какая пораженная площадь приходится на единицу массы ударника

D , м	10	20	30	40	50	70	100	200	300
R_u , км	–	–	–	13	21	26	30	43	58
ξ_u , м ² /кг	–	–	–	6.0	7.9	4.4	2.0	0.51	0.26

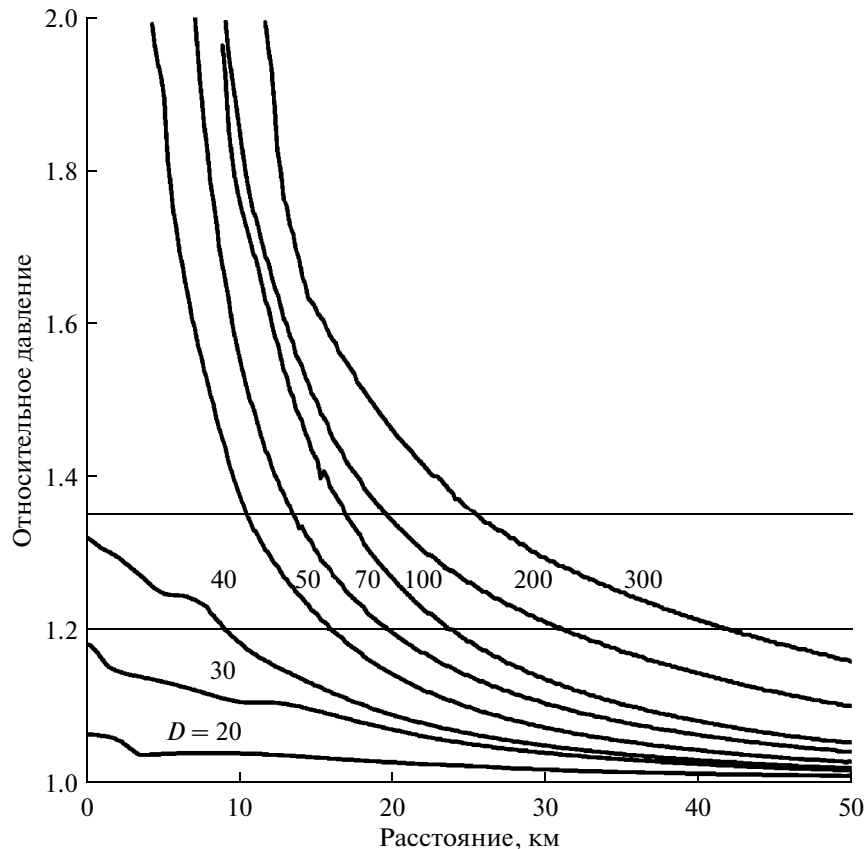


Рис. 4. Зависимость максимального относительного давления p/p_0 , достигаемого на поверхности на разных расстояниях от точки удара при ударах астероидов разного размера. Цифры около каждой кривой указывают значение диаметра падающего тела в метрах.

определенного размера на площадь области разрушений, вызванных этим ударом или, что то же самое, площадь области разрушений, деленную на интервал времени между ударами. Физический смысл величины F это средняя площадь разрушений в единицу времени, например, за один год.

В табл. 3 приведены расчеты рисков, полученные с использованием данных табл. 1 и 2 и кривой частоты падений астероидов, взятой из классической работы (Charman, Morrison, 1994). Полученные данные оказались достаточно впечатляющими, в среднем получается порядка квадратного километра разрушенной поверхности в год (если тело не падает в океан). При этом максимальный ущерб приносят удары астероидов размером 50–100 м.

Мы рассматривали только вертикальные удары. Рассмотрение других углов наклона траектории падающего тела требует использования трехмерной методики, что резко увеличивает время расчетов, особенно для малых тел. В случае “метеорных взрывов” наклонное падение приведет к увеличению высоты разрушения тела и, соответственно, уменьшению разрушений. Поэтому оптимальный для разрушения размер должен немного (по нашим оценкам в 1.5 раза для угла 45°) увеличиться. В случае кратерообразующего удара эффект должен быть обратным, потому что при косом ударе образуется меньший кратер и, следовательно, больше энергии выделяется в атмосфере.

Полученные результаты могут быть также интересны с точки зрения предотвращения астеро-

Таблица 3. Риски F , связанные с падением астероидов разного размера, с разными критериями оценки площади поврежденной области

D , км	10	20	30	40	50	70	100	200	300
F_{35} , км ² /год	—	—	—	—	0.7	0.6	0.4	0.15	0.09
F_{20} , км ² /год	—	—	—	1.3	1.6	1.2	0.9	0.3	0.2
F_u , км ² /год	—	—	—	2.7	2.8	2.1	1.4	0.6	0.3

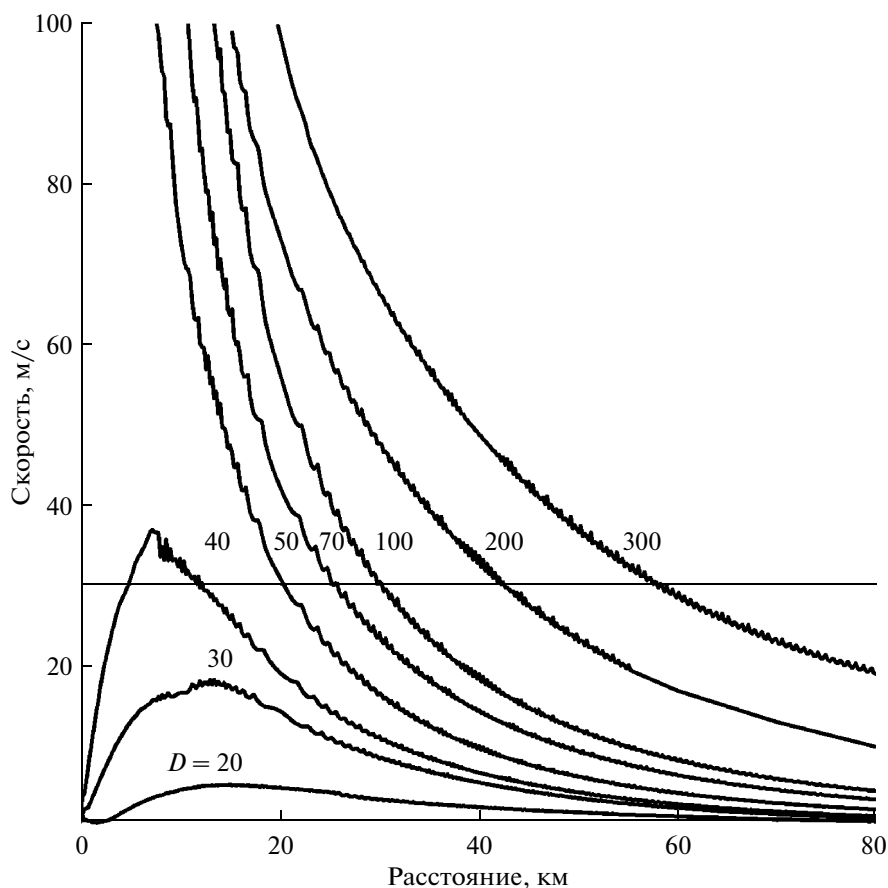


Рис. 5. Зависимость максимальной скорости ветра, достигаемой на поверхности, на разных расстояниях от точки удара при ударах астероидов разного размера. Цифры около каждой кривой указывают значение диаметра ударника в метрах.

идной опасности. В качестве одного из основных методов противодействия такой опасности в литературе рассматривалось разрушение астероида, например, сильным взрывом. Наши расчеты показывают, что это не простая задача, потому что разрушать астероид надо на очень мелкие фрагменты, меньше 20–30 м. В противном случае площадь поражения не уменьшится, а значительно (в некоторых случаях на 1–2 порядка) увеличится. Так, если астероид диаметром 300 м разрушить на 27 осколков размером 100 м (сохранив полную массу и энергию), то, согласно табл. 1, площадь поражения увеличится примерно в 10 раз.

ВЫВОДЫ

Определены зоны поражения ударной волной при вертикальных ударах каменных тел.

Моделирование показало, что тела размером менее 30 м не производят разрушений зданий. Среди каменных тел, падающих вертикально, наиболее эффективными с точки зрения разрушений ударной волной оказываются тела размером около 50 м.

Определенную долю падающих на Землю метеороидов составляют железных тела, для которых максимум эффективности поражения сдвинется в сторону меньших размеров. Целесообразно исследовать такие падения.

Сравнение результатов моделирования с вычислениями по имеющимся приближенным формулам показало, что эти формулы могут давать ошибку в площади поражения ударной волной на порядок величины.

Авторы благодарны анонимному рецензенту за ценные замечания.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13_05_00309_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука, 1970. 320 с.
- Иванов Б.А. Распределение ударных кратеров и астероидов по размерам // Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ "Академкнига", 2005. С. 62–77.

- Косарев И.Б.* Расчет термодинамических и оптических свойств паров вещества космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 6. С. 1067–1075.
- Кузнецов Н.М.* Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.
- Попова О.П., Немчинов И.В.* Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. С. 92–117.
- Светцов В.В., Шувалов В.В.* Сильные акустико-гравитационные волны от ударов крупных космических тел // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 5. С. 602–612.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Численное моделирование падения астероидов в море. Всероссийская конференция “Астероидно-кометная опасность—2005” (АКО—2005). Материалы конференции. СПб.: ИПА РАН, 2005. С. 351–354.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А.* Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251. (*Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Aerial bursts in the terrestrial atmosphere // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 3. P. 220–230.)
- Chapman C.R., Morrison D.* Impacts on the Earth by asteroids and comets: Assessing the hazard // Nature. 1994. V. 367. P. 33–40.
- Collins G.S., Melosh H.J., Markus R.A.* Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // Meteorit and Planet. Sci. 2005. V. 40. P. 817–840.
- Glasstone S., Dolan P.J.* The effects of nuclear weapons. Washington, D.C.: GPO, 1977. 653 p.
- Pierazzo E., Vickery A.M., Melosh H.J.* A reevaluation of impact melt production // Icarus. 1997. V. 127. P. 408–423.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V.V., Artemieva N.A.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planet. and Space Sci. 2002. V. 50/2. P. 181–192.
- Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Impact induced aerial bursts in the Earth’s atmosphere // 39th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2008. #1042.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state // Report SC-RR-71 0714, Sandia National Laboratory, Albuquerque, New Mexico, 1972. 119 p.
- Toon O.B., Turco R.P., Covey C.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // Rev. Geophys. 1997. V. 35. № 1. P. 41–78.
- Vasilyev N.A.* The Tunguska meteorite problem today // Planet. and Space Sci. 1998. V. 46. № 2/3. P. 129–150.