

УДК 550.311

ЭФФЕКТЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗМЕРОМ ОТ 20 м ДО 3 км

© 2021 г. Д. О. Глазачев^{1, *}, О. П. Попова^{1, **}, Е. Д. Подобная^{1, ***}, Н. А. Артемьева^{1, ****},
В. В. Шувалов^{1, *****}, В. В. Светцов^{1, *****}

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: GlazachevD@gmail.com

**E-mail: olga@idg.chph.ras.ru

***E-mail: epodobnaya@gmail.com

****E-mail: natalia.artemeva@gmail.com

*****E-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

*****E-mail: svetsov07@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.02.2021 г.

После доработки 28.03.2021 г.

Принята к публикации 01.04.2021 г.

Разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной, являются одним из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет. Избыточное давление и скорость ветра за фронтом ударной волны, приводящие к тем или иным опасным последствиям, могут быть оценены на основе специально разработанных моделей взаимодействия космических объектов с атмосферой и поверхностью Земли. Ударная волна является также причиной сейсмических эффектов, но в данной работе рассматривается только прямое действие ударной волны. Систематическое численное моделирование взаимодействия космических объектов с атмосферой было ранее проведено для большого количества различных сценариев в рамках гидродинамической модели. Анализ результатов этого моделирования позволяет предложить аппроксимационные соотношения, которые дают возможность оценить избыточное давление, скорость ветра за ударной волной и их распределение на поверхности, если известны параметры импактора, его скорость и угол наклона траектории. Эти соотношения учитывают пространственную неоднородность распределения избыточного давления на поверхности Земли. Полученные соотношения подобия были протестированы на данных Челябинского и Тунгусского событий, и было показано хорошее соответствие с данными разрушений. Полученные аппроксимационные соотношения используются в интернет-калькуляторе (<http://www.AsteroidHazard.pro>), позволяющем быстро и достаточно точно оценивать различные эффекты падений.

Ключевые слова: космические тела, ударная волна, аппроксимационные соотношения, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S0002333721050057

ВВЕДЕНИЕ

Земля постоянно сталкивается с космическими телами, однако размеры большинства тел слишком малы для возникновения опасных эффектов. Небольшие объекты – метеороиды с размером от микроскопической пылинки до 1 м, как правило, разрушаются и сгорают в атмосфере. Фрагменты наиболее крупных из них могут достигать поверхности как метеориты, но опасности для людей они не несут. При падении большей части тел с размерами 1–10 м атмосфера Земли все еще является хорошей защитой, хотя железные объекты такого (и даже меньшего) размера доле-

тают до поверхности и вызывают образование кратеров и кратерных полей таких, как, например, Сихоте-Алинский железный дождь [Grinov, 1971; Nemtchinov, Popova, 1997] или метеорит Мораско [Bronikowska et al., 2017].

С увеличением размера космические объекты становятся гораздо более опасными. Они способны причинить значительный ущерб, что и показало падение 19-метрового Челябинского астероида [Popova et al., 2013; Brown et al., 2013]. Челябинское событие вызвало массовые повреждения в жилых домах и общественных зданиях, за медицинской помощью только официально обрати-

лось более 1600 человек, финансовые затраты на восстановление разрушенной инфраструктуры были оценены в 1 млрд рублей [Акимов и др., 2015; Kartashova et al., 2018]. Удары тел типа Челябинского (и крупнее) случаются не каждый год, однако такие падения невозможно предсказать заранее. Кроме этого, для надежной оценки последствий возможного удара необходимо проводить довольно сложные и времязатратные расчеты, причем нужно как можно точнее определить параметры космического тела, траекторию и скорость входа. Такие параметры, как правило, наиболее точно определяются лишь в последний момент (перед входом в атмосферу), когда на проведение детальных расчетов уже нет времени. Учитывая сложность и трудоемкость оценки последствий через непосредственное моделирование взаимодействия метеороида с атмосферой и поверхностью Земли, представляется актуальной и важной возможностью простой быстрой оценки поражающих факторов, на основе предварительно подготовленной (рассчитанной) сетки моделей последствий. Быструю оценку можно получить по аппроксимационным формулам, построенным по данным моделей. В данной работе представлены результаты расчетов такой сетки и приведены аппроксимационные формулы.

Одним из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет являются разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной в нижних слоях атмосферы. Например, в случае Челябинского события 15.02.2013 г. именно избыточное давление в ударной волне было главным поражающим фактором. Кроме того, ударная волна, распространяясь в атмосфере, доходит до Земли и порождает сейсмические волны аналогично сосредоточенному воздушному взрыву [Svetsov et al., 2017; Хазинс и др., 2018]. Но в данной работе рассматривается только прямое действие ударной волны. Избыточное давление и скорость ветра за фронтом ударной волны, приводящие к тем или иным опасным последствиям, могут быть оценены на основе реальных данных о ядерных взрывах [Collins et al., 2005; 2017] или на основе специально разработанных моделей взаимодействия космических объектов с атмосферой и поверхностью Земли [Shuvalov et al., 2013].

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С АТМОСФЕРОЙ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Моделирование процессов, сопровождающих падение космического тела на Землю, проводилось в два этапа. На первом этапе моделировалось движение метеороида в атмосфере с учетом его деформации, торможения, разрушения и испарения [Shuvalov, Artemieva, 2002; Shuvalov, Trubetskaya,

2007; Shuvalov et al., 2013; 2017a; 2017b]. Падающее тело предполагается квазижидким (с нулевой прочностью), а его деформация под действием аэродинамической нагрузки описывается уравнениями гидродинамики. Заметная деформация метеороидов размером больше нескольких десятков метров начинается на высотах (около 30–40 км), где аэродинамические нагрузки значительно превышают прочность падающих тел, и поэтому можно считать, что деформируемое тело в начале процесса деформации уже полностью разрушено [Svetsov et al., 1995]. Кроме того, многие крупные астероиды изначально представляют собой сильно разрушенные объекты типа кучи щебня (*rubble-pile asteroids*) с низкой прочностью [Sánchez, Scheeres, 2014].

Полностью разрушенное тело не вполне эквивалентно жидкому из-за присутствия внутреннего трения. Наличие внутреннего трения (касательных напряжений, пропорциональных давлению) может повлиять на характер деформации разрушенного метеороида, в частности, замедлить фрагментацию и торможение метеороида [Ivanov et al., 1997]. Влияние внутреннего трения и акустической флюидизации было рассмотрено в работе [Шуvalов, Трубетская, 2010]. При использовании жидкостной модели нужно иметь в виду, что реальная высота торможения метеороида может оказаться на несколько километров меньше, чем полученная в расчетах по жидкостной модели, что приведет к некоторому увеличению максимального избыточного давления.

Моделирование на первом этапе проводилось в двумерном приближении в системе координат, связанной с падающим телом, которое обдувается воздухом. Плотность воздуха в набегающем потоке изменяется в соответствии со стратификацией атмосферы, а скорость потока равна скорости тела. При торможении тела скорость набегающего потока соответственно уменьшается. Для моделирования переноса излучения в метеорных парах и воздухе в процессе полета и разрушения метеороида применялось приближение лучистой теплопроводности. Росселандовы пробеги излучения для воздуха при типичных температурах за фронтом головной ударной волны (1–5 эВ) не превышают 1 м на высотах ниже 30–40 км [Авилова и др., 1970], поэтому это приближение вполне применимо для крупных метеороидов. Излучение, падающее на тело, приводит к его испарению. Давление поступающих паров считается равным давлению газа вблизи поверхности тела, а температура и плотность паров определяются из кривой фазового равновесия. Расчеты первого этапа заканчивались, когда метеороид достигал поверхности Земли или терял свою начальную кинетическую энергию.

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 образование кратера, взаимодействие продуктов выброса с атмосферой, распространение ударной волны в атмосфере Земли на большие расстояния [Artemieva, Shuvalov, 2019]. Оба этапа расчетов были реализованы с помощью численного комплекса SOVA [Shuvalov, 1999]. Независимо от угла наклона траектории на втором этапе решалась трехмерная задача. В трехмерной задаче перенос излучения учитывался в приближении лучистой теплопроводности на высотах до 80 км и в приближении объемного высвечивания при малых оптических толщинах на больших высотах.

В рамках этой модели были проведены серийные расчеты, рассматривались тела с размерами от 20 до 3000 м, входящие в атмосферу под углами от 15° до 90° со скоростями входа от 20 до 70 км/с, частично описанные в работе [Artemieva, Shuvalov, 2019]. Скорость и угол входа задавались в точке входа на высоте 100 км, угол отсчитывается от горизонтали. Всего было рассмотрено 39 вариантов для астероидов (с плотностью 3320 кг/м^3), 39 вариантов для комет (с плотностью 1000 кг/м^3) и 3 варианта для астероидов с меньшей плотностью (2650 кг/м^3). Кинетическая энергия импакторов лежит в диапазоне от 0.5 Мт ТНТ до 4.2 Тт ТНТ. В качестве примера на рис. 1 приведено распределение максимального избыточного давления ΔP на поверхности Земли ($\Delta P = P - P_0$, где P_0 – нормальное атмосферное давление в 1 атм).

Результатом моделирования является распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли, учитывающее как падающую, так и отраженную волны. Дополнительных препятствий, которые могли бы быть источниками дополнительных отраженных волн, не вводилось, свойства подстилающей поверхности, которые могли бы повлиять на амплитуду отраженной волны, не учитывались. Результаты моделирования можно рассматривать как максимальную оценку вблизи эпицентра и минимальную на больших расстояниях (см. обсуждение в работе [Artemieva, Shuvalov, 2019]). В данной работе длительность воздействия избыточного давления не оценивалась.

Результаты серийного численного моделирования дали возможность построить аппроксимационные соотношения для избыточного давления и скорости ветра, зависящие только от параметров падающего тела и позволяющие быстро оценивать последствия падений.

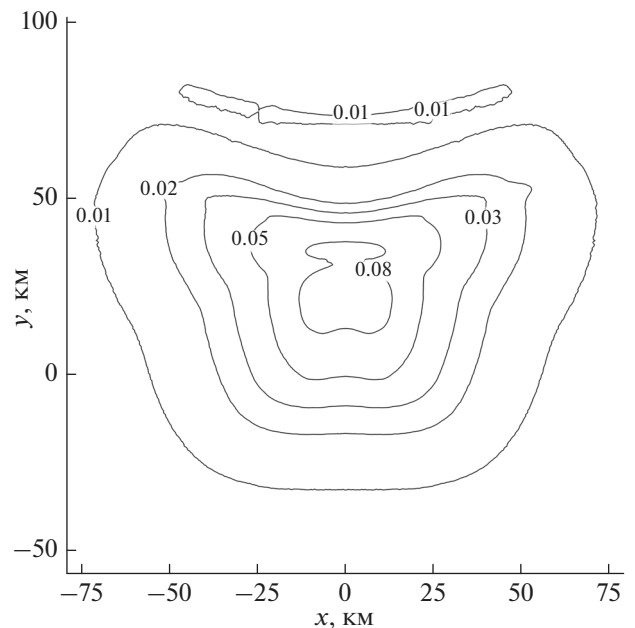


Рис. 1. Распределение максимального избыточного давления на поверхности, возникающее при падении 30-метрового астероида со скоростью 20 км/с под углом 45° . На изолиниях приведены значения избыточного давления ΔP в атмосферах. Центр координат расположен в точке пересечения траектории (без учета торможения) с поверхностью Земли, астероид летит сверху вниз.

ЭФФЕКТИВНАЯ ВЫСОТА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

В зависимости от размера объекта, материала импактора и угла наклона траектории к горизонту могут реализовываться различные сценарии входа в атмосферу.

Вхождение в атмосферу высокоскоростного космического тела можно классифицировать как “воздушный взрыв”, если основная часть энергии этого тела выделяется в атмосфере и основная масса тела не достигает поверхности (или достигает ее со скоростью намного меньшей, чем скорость входа), но возникающие ударные волны достаточно сильны, чтобы достичь поверхности Земли и вызвать те или иные повреждения [Shuvalov et al., 2013]. Воздушные взрывы характерны для вертикального входа астероидов размером менее 100 м и комет менее 150 м. Удары космических тел размером более 300 м, как правило, приводят к возникновению кратера. Уменьшение угла наклона траектории сдвигает эти границы к большим размерам. Например, комета диаметром 300 м при угле входа $<30^\circ$ теряет большую часть своей энергии в атмосфере, приводя к мощному воздушному взрыву, и не образует кратера. Возможны и промежуточные случаи, когда часть

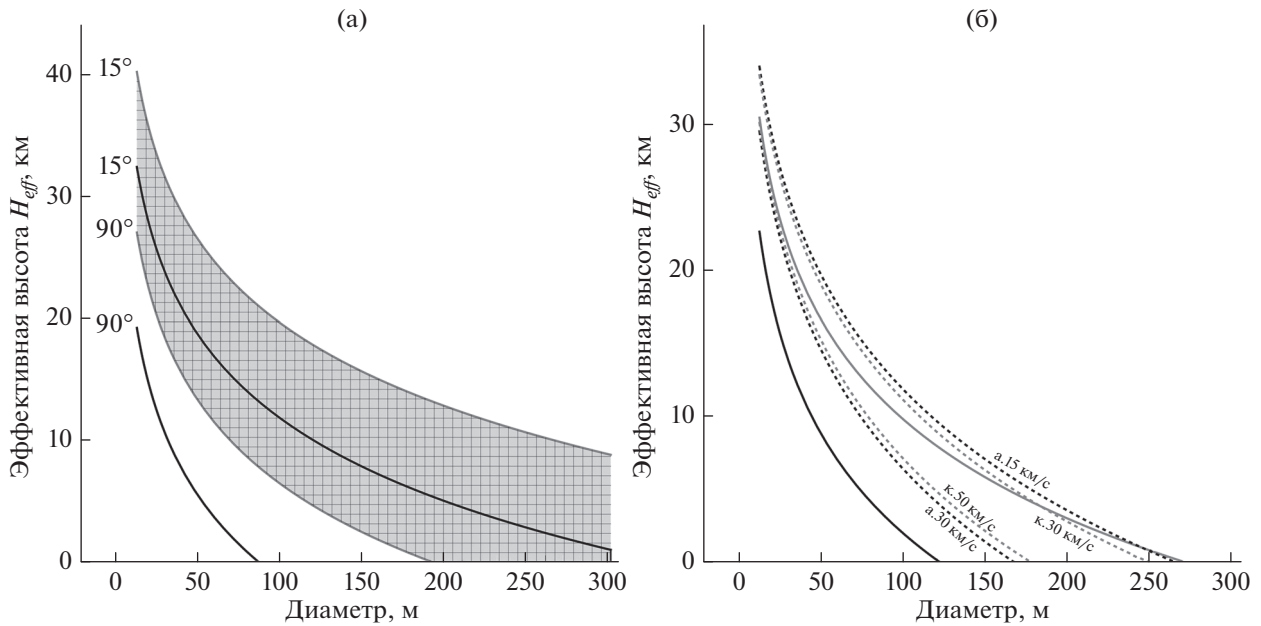


Рис. 2. (а) — Зависимость эффективной высоты H_{eff} от размера тела для астероидов (черные кривые) и комет (серые кривые, заштрихованная область) в широком диапазоне углов входа (от 15° до 90°); (б) — зависимость от размера тела для эффективной высоты H_{eff} для астероидов (черная кривая) и комет (серая кривая) при угле входа 45° (H_{eff} не зависит от скорости тела) и для высоты Z_b по работе [Collins et al., 2017] для астероидов со скоростями 15–30 км/с (черный пунктир, маркеры а.15, а.30 км/с) и комет со скоростями 30–50 км/с (серый пунктир, маркеры к.30, к.50 км/с).

энергии выделяется в атмосфере, но тем не менее энергии хватает и для образования кратера.

Эффективная высота H_{eff} — высота, на которой импактор теряет большую часть энергии и заметно тормозится, дает возможность определить границу между различными сценариям [Shuvalov et al., 2016]. В этой работе было показано, что в первом приближении избыточное давление в ударной волне от падающего космического тела можно оценить при помощи рассмотрения взрыва на высоте H_{eff} , энергия которого определяется энергией падающего тела. Конечно, такое приближение не дает возможность учесть пространственную неоднородность в распределении избыточного давления, которая оказывается существенной при входе космических тел в атмосферу под углами менее 60°.

Эффективная высота определяется как

$$H_{eff} = \left(H - 1.3H \ln \left(D \frac{\sin \alpha}{H} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} \right) \right) / 1000, \quad (1)$$

где: H — характеристическая высота атмосферы ($H = 7500$ м); D — диаметр космического тела в метрах; ρ — его плотность; α — угол входа в атмосферу (на высоте 100 км); ρ_0 — плотность воздуха на уровне моря (1290 кг/м³).

Если для выбранных характеристик импактора значение H_{eff} равно нулю, то можно считать, что это кратерообразующее событие; если $H_{eff} > 5-7$ км,

то это событие типа метеорного взрыва; импакты с высотой энерговыделения от 0 до 5–7 км являются переходными случаями (как правило, при размерах $D \approx 100-300$ м). Стоит отметить, что выражение (1) для H_{eff} имеет точность порядка нескольких км [Shuvalov et al., 2016].

Зависимость имеет сложный характер, например, удар астероида с энергией 83 Мт ТНТ с $D = 100$ м, скоростью $V = 20$ км/с и углом входа $\alpha = 45^\circ$ приводит к образованию кратера, а падение кометы с большей энергией в 307 Мт ТНТ с $D = 100$ м, $V = 70$ км/с и $\alpha = 30^\circ$ является метеорным взрывом. Чем меньше угол входа, тем больший диаметр импактора требуется для образования кратера, эффективная высота для кометных тел выше, чем для астероидов с аналогичными параметрами (рис. 2а).

В широко известном интернет-калькуляторе для быстрой оценки последствий импактов Earth Impact Effects Program [Collins et al., 2005; 2017] также оценивается эффективная высота энерговыделения Z_b . В этом случае высота Z_b определяется на основе полуэмпирической модели разрушения объекта (*pancake* модели), описывающей поперечное расширение фрагментировавшего метеороида. Моделирование методом Монте-Карло при заданных распределениях по скоростям, углу входа, прочности и плотности космических тел дало возможность получить зависимость Z_b от энергии импактора [Collins et al.,

2017]. На рис. 26 приведено сравнение зависимостей Z_b и H_{eff} от размера тела при близких значениях других параметров. Для астероидов величина H_{eff} оказывается ниже, чем Z_b , для комет зависимости близки друг к другу.

СТЕПЕННОЙ ЗАКОН ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ИЗЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

Распределения максимального избыточного давления ΔP (аналогичные представленному на рис. 1) для 81 варианта дают возможность для поиска простых аппроксимационных зависимостей. Все имеющиеся распределения максимального давления за фронтом ударной волны ΔP были переинтерполированы на равномерную сетку в полярных координатах, был определен центр и усредненные профили распределений. Эти профили использовались для поиска аппроксимаций.

Исследуемые распределения максимального избыточного давления имеют большой разброс значений. Например, для небольшого импактора (20–30 м в диаметре) максимальное избыточное давление не превышает 2.5% от нормального давления атмосферы и составляет всего 0.025 атм, в то время как для километровых тел значения ΔP могут превышать несколько тысяч атмосфер [Artemieva, Shuvalov, 2019]. Действительно, интересующая нас область, где требуется наиболее точное описание избыточного давления, лежит в области от 0.005 (примерный порог разрушения остекления [Gi et al., 2018]) до примерно 6–10 атм, при которых происходит разрушение мостов, груженых железнодорожных вагонов [Glasstone, Dolan, 1977]. Разрушение стен из бетонных блоков и кирпича (толщиной 24–36 см) происходит при избыточном давлении $\Delta P \sim 0.2\text{--}0.35$ атм ($\Delta P = 20\text{--}35$ кПа). Детально описывать область избыточных давлений >100 атм не имеет смысла, это будут области полного разрушения. Поэтому при поиске аппроксимаций использовалась весовая функция, зависящая от максимума распределения и позволяющая обращать внимание прежде всего на диапазон избыточных давлений 0.005–100 атм. Отметим, что в большинстве расчетов избыточные давления ниже 0.1–0.05 атм определялись с невысокой точностью (до нескольких раз).

Следует отметить, что для метеорных взрывов максимальное значение избыточного давления на поверхности Земли наблюдается на некотором расстоянии Y_0 от точки пересечения траектории с поверхностью Земли (без учета торможения) (рис. 1). Для сдвига Y_0 ниже предложено аппроксимационное соотношение, но поиск зависимости для максимального избыточного давления проводился по центрированным распределениям

с началом координат в точке максимального значения ΔP .

Аппроксимации для ΔP искались в виде степенного закона с учетом эффективной высоты энерговыделения H_{eff} :

$$\Delta P = \frac{a}{\left(\sqrt{r^2 + H_{eff}^2}\right)^p}, \quad (2)$$

где: r – расстояние от центра распределения; H_{eff} – высота источника; p (*power*) – степень, характеризующая уменьшение величины ΔP с расстоянием; a – максимальная амплитуда.

Одновременный поиск параметров p и a может оказаться затруднителен в ряде случаев в силу разного характера переменных (степени и линейного множителя). При логарифмическом преобразовании зависимость приобретает линейный вид по параметрам p и $\lg a$:

$$\lg(\Delta P) = \lg a - 0.5p \lg(r^2 + H_{eff}^2). \quad (3)$$

При определении оптимальных значений параметров (p, a) и $(p, \lg a)$ использовались две функции невязки, относительная невязка RD для решения в виде (2) для ΔP и абсолютная невязка AD для решения в виде (3) для $\lg(\Delta P)$:

$$RD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta P_i - \Delta PM_i}{\Delta P_i} \right)^2}, \quad (4)$$

$$AD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg(\Delta P_i) - \lg(\Delta PM_i))^2}, \quad (5)$$

где: ΔP_i – значение избыточного давления в точке i на усредненном профиле; ΔPM_i – приближенное значение в той же точке i , оцененное по модели с некоторыми параметрами. Минимумы обеих невязок указывают на близкие комбинации параметров. Можно отметить, что невязка AD обращает чуть большее “внимание” на область малых избыточных давлений на периферии распределения, а невязка RD – на область ближе к эпицентру распределения (область относительно больших значений избыточного давления).

На рис. 3а приведено поле невязки в координатах (p, a) . Область минимума имеет вытянутый характер, т.е. можно получить очень хорошее (хотя и не идеальное) решение для несколько различающихся наборов параметров (p, a) . При этом для некоторого зафиксированного значения степени p можно подобрать такой коэффициент a , при котором будет получаться хорошая аппроксимация усредненного профиля. Это дает возможность найти универсальный показатель степени p , одинаковый для всех вариантов, и позволяет значительно снизить сложность разрабатываемой аппроксимационной формулы.

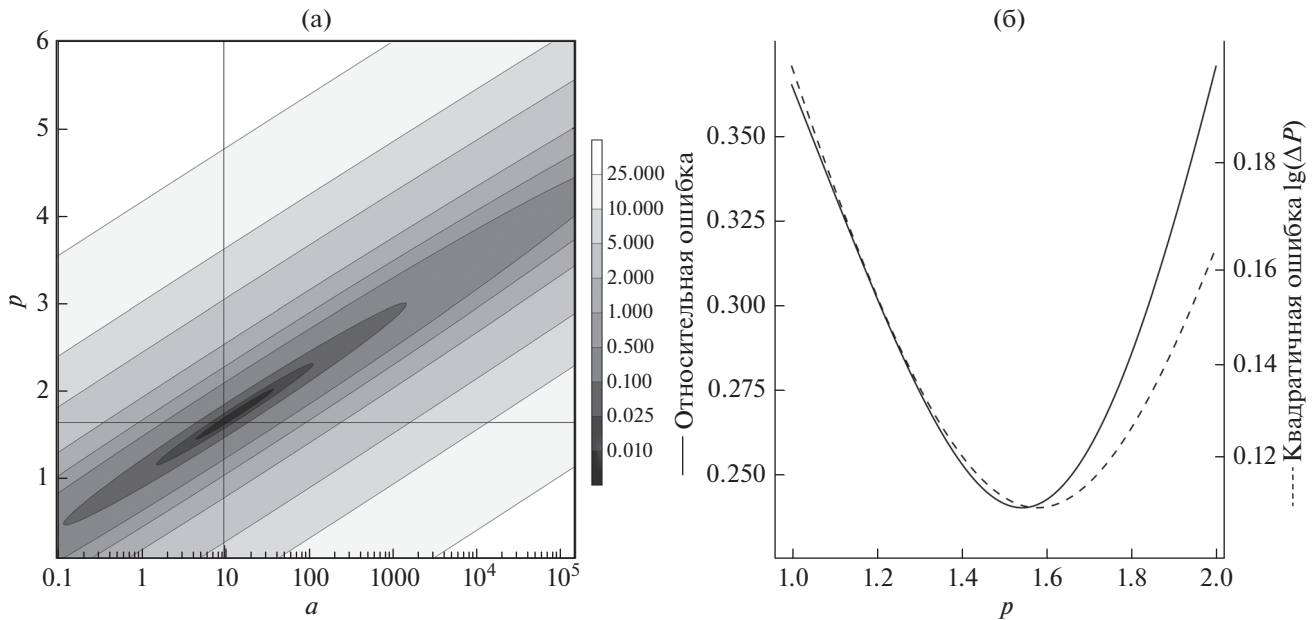


Рис. 3. (а) – Распределение абсолютной невязки $\lg(\Delta P)$ для варианта 30-метрового астероида со скоростью 20 км/с, углом входа 45° , построенной при использовании весовой функции. Тонкая линия показывает параметры, при которых достигается минимум; (б) – оценка качества аппроксимации усредненного профиля избыточного давления в зависимости от степени p (выражение (2)). Сплошная кривая отображает изменение среднего (по всем вариантам) значения относительной невязки, пунктирная кривая отображает изменение среднего (по всем вариантам) значения абсолютной невязки $\lg(\Delta P)$.

Для каждого значения параметра p (*power*) от 1 до 2 с шагом 0.01 оценивалось среднее значение невязки по всем вариантам распределений усредненного профиля избыточного давления (рис. 3б) и для оптимального для каждого варианта параметра a . Минимум невязки наблюдается при значении параметра $p = 1.56 \pm 0.02$. Это и есть оптимальная степень для описания избыточного давления как метеорных взрывов, так и кратерообразующих ударов. Такое изменение величины с расстоянием занимает промежуточное положение между падением давления с расстоянием от линейного ($p = 1$) или точечного источников ($p = 2$), что кажется достаточно разумным, поскольку сложный характер энерговыделения при импакте представляет собой нечто среднее между точечным и линейным взрывами.

Комбинация параметров ударника в различных степенях рассматривалась как вероятная зависимость для каждого исследуемого параметра, например, для значения коэффициента a , позволяющего описывать все рассчитанные варианты, для сдвига Y_0 , для параметра эллиптичности (см. далее) и других необходимых величин. Угол входа был включен через тригонометрическую функцию. В некоторых случаях использовалась логарифмическая функция кинетической энергии. Коэффициенты и показатели степени для этих комбинаций были оценены путем минимизации функции невязки для всех имеющихся рас-

четных вариантов или для отдельных групп вариантов, например, метеорные взрывы и кратерообразующие варианты, астероидные тела и кометные могли рассматриваться как отдельные однородные группы. Окончательный выбор между зависимостями был сделан с учетом ошибки подбора (минимальное значение функции неопределенности) и простоты.

АППРОКСИМАЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Построенные аппроксимационные соотношения для распределения максимального избыточного давления зависят только от параметров ударника, которые включают его диаметр D (м), скорость V (км/с), угол входа α к горизонту (градусы) и плотность ρ (кг/м³). Аппроксимации основаны на численных результатах для комет и астероидов с заданными плотностями, поэтому для ударников с другими плотностями используется линейная интерполяция по плотности.

Общая формула для всех тел как выделяющих свою энергию в атмосфере, так и кратерообразующих ударов можно записать в виде:

$$\Delta P = EI \times 10^5 \times 0.14 E_{kt}^{0.43} \times \left(\frac{1}{1000 \times \sqrt{H_{eff}^2 + (y - Y_0)^2 + x^2}} \right)^{1.56}, \quad (6)$$

где: ΔP – максимальное избыточное давление в атм; E_{kt} – кинетическая энергия импактора в кт ТНТ; El – параметр эллиптичности, определяющий пространственную (в плоскости $x-y$) неоднородность распределения избыточного давления (см. уточнение понятия El ниже в тексте). Расстояние по оси y (вдоль траектории полета) между центром распределения и началом координат (которое находится в номинальной точке пересечения траектории с поверхностью Земли без торможения) Y_0 актуально только для случаев метеорного взрыва. Для кратерообразующих ударов центр распределения совпадает с центром кратера и точкой пересечения траектории с поверхностью Земли, т.к. такие тела почти не тормозятся.

Соотношение для Y_0 зависит от плотности импактора и растет с увеличением эффективной высоты и уменьшением угла входа:

$$Y_0 = \begin{cases} 0.57H_{eff}^{1.3}(\text{ctg } \alpha)^{0.71}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.69H_{eff}^{1.3}(\text{ctg } \alpha)^{0.71}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases} \quad (7)$$

Разница между приближением (7) и результатами численного моделирования в среднем составляет около 2 км, большие значения могут наблюдаться в случае малых углов входа α .

Эллиптичность El описывает гетерогенность распределения избыточного давления. Она является поправкой, превращающей круговую симметрию в эллиптическую для двух полупространств. Поля распределений обладают симметрией в областях до и после точки максимального энерговыделения. Введение El позволяет увеличить или уменьшить оценку избыточного давления в точке пространства, тем самым пододвигая или отдаляя изолинию постоянного уровня к или от точки центра распределения.

Область под траекторией (до точки максимального энерговыделения) контролируется параметром El_b ($0 < \varphi < \pi$), а область вперед по направлению траектории после точки максимального энерговыделения контролируется параметром El_f ($-\pi < \varphi < 0$), где φ полярный угол ($\varphi = \arctg(y/x)$):

$$El_b = \frac{nb}{\sqrt{n^2 \sin^2[\varphi] + b^2 \cos^2[\varphi]}}, \quad (8)$$

$$El_f = \frac{nf}{\sqrt{n^2 \sin^2[\varphi] + f^2 \cos^2[\varphi]}}.$$

Для кратерообразующих ударов и метеорных взрывов соотношения получались отдельно. Коэффициенты n , b и f , входящие в уравнение (8), для случаев метеорных взрывов обозначаются индексом “ ab ” и имеют следующий вид:

$$n_{ab} = 1 - 0.002H_{eff}^{1.16} (\cos \alpha)^{2.7} \ln(E_{kt}), \quad (9)$$

$$b_{ab} = \begin{cases} 0.19D^{0.4} (\sin \alpha)^{0.32}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.39V^{0.26} (\sin \alpha)^{0.26}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases}, \quad (10)$$

$$f_{ab} = \begin{cases} 0.5D^{0.1}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.23 + 0.25H_{eff}^{0.37} (\sin \alpha)^{0.52}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases}. \quad (11)$$

Для кратерообразующих ударов коэффициенты n , b и f обозначаются индексом “ c ” и имеют следующий вид:

$$n_c = \begin{cases} 1.1(\sin \alpha)^{-0.34}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.56(\sin \alpha)^{-0.27}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases}, \quad (12)$$

$$b_c = \begin{cases} 1.7(\sin \alpha)^{-0.54}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.84(\sin \alpha)^{-1.2}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases}, \quad (13)$$

$$f_c = \begin{cases} 0.65 + 0.064(\sin \alpha)^{-2.8}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \\ 0.44 + 0.0083(\sin \alpha)^{-3.8}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \end{cases}. \quad (14)$$

Стоит отметить наличие некоторых недостатков в соотношениях. Например, для вертикального удара не получится круговой симметрии, и описываемые параметры выглядят не одинаково. Процесс их получения был следующим. Составлялся список из параметров основных ударов (плотность ρ , диаметр D , скорость V , кроме угла входа α) и их производных характеристик (кинетическая энергия E_{kt} и ее логарифм, эффективная высота H_{eff}). Угол входа α был представлен набором тригонометрических функций. Далее методом перебора рассматривались все возможные комбинации этих параметров в некоторых степенях, с прибавлением констант. Эти параметры подбирались так, чтобы минимизировать относительную невязку на всем поле распределения избыточного давления. Таким образом, соотношения El также несут в себе общую поправку на аппроксимацию среднего профиля распределения для каждого конкретного варианта, а не только его пространственную неоднородность. Эта процедура применялась как в полной выборке всех вариантов метеорных взрывов и кратерообразующих ударов, но также и только для комет, только астероидов и специфических выборок по диапазонам H_{eff} (равные 0 км, от 0–5 км, больше 5 км, больше 10 км). Из отсортированных по значению ошибок всех этих тестов выбирались наиболее простые и лучше всего описывающие поля комбинации. Можно видеть, что разделение на группы по плотности космического тела оказалось самым лучшим.

На рис. 4 показано сравнение распределений максимального избыточного давления ΔP для 30-метрового астероида со скоростью 20 км/с, углом входа 45° , полученных по аппроксимации (6) и в результате численного моделирования.

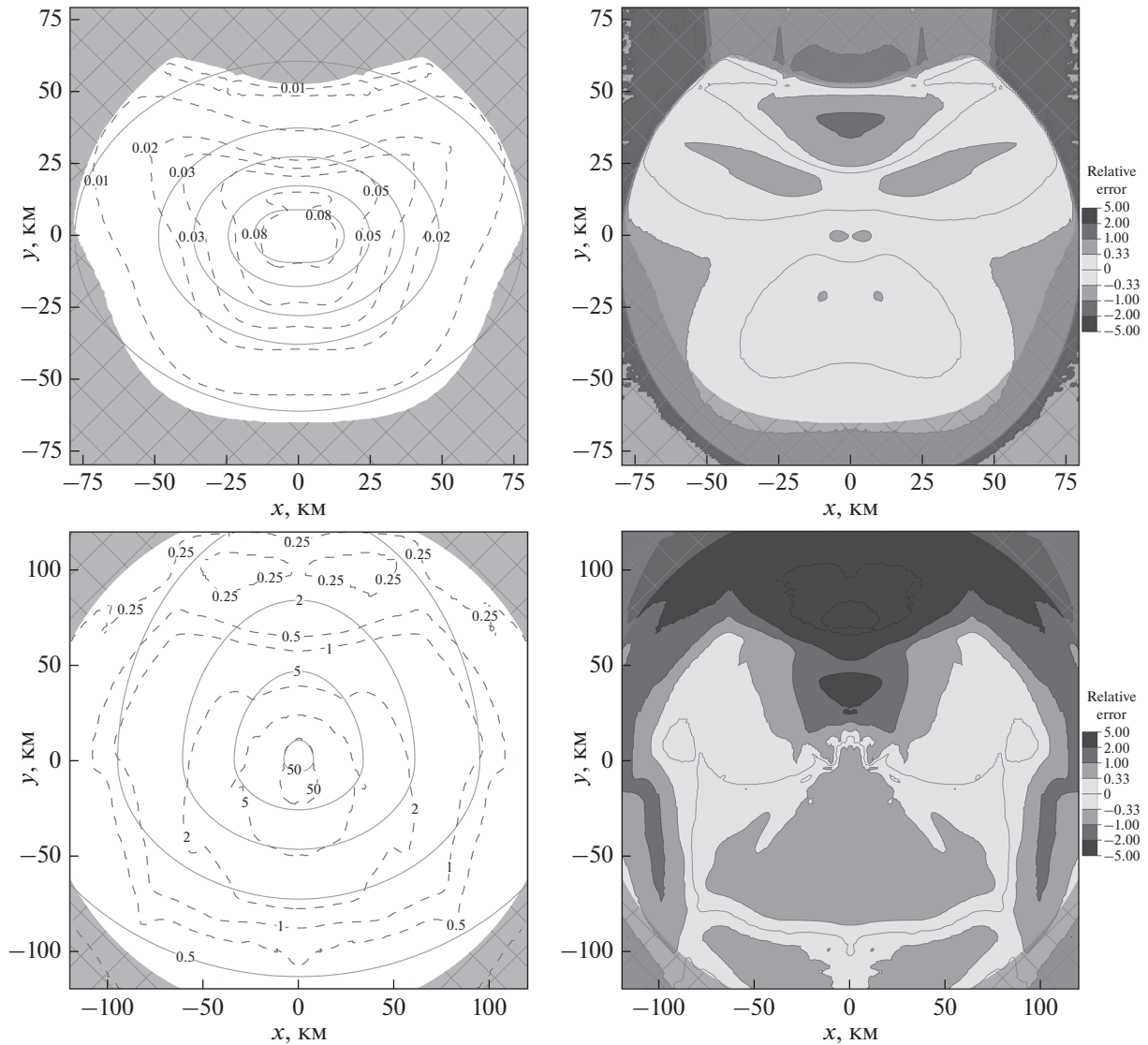


Рис. 4. Распределение максимального избыточного давления ΔP для 30-м астероида со скоростью 20 км/с, углом входа 45° (верхняя левая панель) и для 1-км кометы со скоростью 50 км/с, углом входа 45° (нижняя левая панель). Траектория направлена сверху вниз. Центр находится в точке максимального энерговыделения. Серая область с кривой сеткой обозначает область низкого избыточного давления, точность расчета которой не высока. На рис. (слева) — метки соответствуют значениям ΔP , пунктирные кривые с черными курсивными метками соответствуют результатам численного моделирования, сплошные контуры с серыми метками — распределение ΔP по аппроксимационному соотношению (6); (справа) — распределение относительных ошибок.

Численное моделирование и аппроксимационные соотношения оценивают избыточное давление как 0.01–0.1 во всей области. Соответствующие относительные погрешности в большей части рассматриваемой области не превышают 33%, в небольшой части области достигают 100% и лишь на небольших участках вблизи траектории, в области низких значений, оказывается немного хуже.

Для кратерообразующего удара 1-км кометы соответствующие распределения приведены в нижнем ряду рис. 4. Как и для случая метеорного

взрыва в большей части области различие в давлениях не превышает 100%, хуже всего описывается область относительно невысоких давлений под траекторией, где ошибка достигает 800%. В целом аппроксимация (6) удовлетворительно описывает результаты численного моделирования. С учетом приближений, принятых в расчетной модели, и неопределенности информации об ударнике, такая точность кажется приемлемой.

В упоминавшемся ранее интернет-калькуляторе [Collins et al., 2005; 2017] используются аппроксимации избыточного давления, построен-

ные по результатам ядерных испытаний. Предложенное в работе [Collins et al., 2017] соотношение для метеорных взрывов выглядит следующим образом:

$$p(r) = 3.14 \times 10^{11} \times (r^2 + Z_b^2)^{-2.6} + (r^2 + Z_b^2)^{-1.13}, \quad (15)$$

$$r^2 = x^2 + y^2,$$

где: $p(r)$ – избыточное давление (Па); r – радиус на поверхности в метрах; Z_b – эффективная высота в метрах; оба значения (r , Z_b) нормированы на корень кубический из кинетической энергии ($E_{kt}^{1/3}$).

Сравнение предсказываемых значений по уравнению (15) и результатов численного моделирования приведено на рис. 5. В качестве эффективной высоты Z_b использовалось модальное значение ($Z_{b, 50\%}$), приведенное в работе [Collins et al., 2017]. Для воздушного взрыва (верхний ряд рис. 5) предложенное соотношение (15) дает удовлетворительное описание, на большей части распределения относительная ошибка не превышает 100%, область с ошибкой менее 30% оказывается меньше, чем на рис. 4, вероятно из-за отсутствия пространственной неоднородности в выражении (15), предполагающем сферическую симметрию. Следует отметить, что для метеорных взрывов калькулятор *Impact Earth* выдает диапазон значений давления (различающихся в 2 раза) в центральной области с учетом неопределенности в величине Z_b . Для данного набора параметров ударника (D , V , α , ρ) нижняя граница диапазона давлений близка к приведенной нами оценке и удовлетворительно описывает результаты численного моделирования, верхняя граница диапазона приводит к заметному росту погрешностей в центральной области.

Для кратерообразующих ударов соотношения, предложенные в работе [Collins et al., 2005], не модифицировались и по-прежнему используются в калькуляторе. Сравнение результатов для удара 1-км кометы с результатами численного моделирования приведено на рис. 5 в нижнем ряду. Ошибки в оценках выше и составляют 33–100% для области вперед по траектории, а в области под траекторией значительно выше – до 5 раз и выше.

В работе [Collins et al., 2017] и в (15) используется двухкомпонентная зависимость для избыточного давления от расстояния. В ближней зоне $\Delta P \sim E_{kt}^{0.86} / r^{2.6}$, а на больших расстояниях $\Delta P \sim E_{kt}^{0.37} / r^{1.13}$. Для точечного источника формула Садовского предлагает трехкомпонентную зависимость, которую можно свести к виду:

$$\Delta P \sim \frac{AE_{kt}}{r^3} + \frac{BE_{kt}^{0.66}}{r^2} + \frac{CE_{kt}^{0.33}}{r}, \quad (16)$$

где A , B и C – некоторые константы. Первая компонента, описываемая с помощью коэффициента A , имеет значение только в центральной области высоких избыточных давлений, где наша зависимость (6) не применима из-за выбранной весовой функции. Наша зависимость избыточного давления от кинетической энергии в степени 0.43 ($\Delta P \sim E_{kt}^{0.43} / r^{1.56}$) занимает промежуточное положение между двумя компонентами уравнения (15) и компонентами, описываемыми коэффициентами B и C в уравнении (16) как по степени энергии, так и по степени расстояния.

Для цилиндрического источника выражение для избыточного давления предложено в работе [Цикулин, 1969]. Оно имеет двухкомпонентный вид, и его можно свести к следующему виду:

$$\Delta P \sim \frac{G E_{kt}}{r^2} + \frac{F E_{kt}^{0.375}}{r^{0.75}}, \quad (17)$$

где G и F – некоторые константы. В исходное выражение входила энергия на единицу длины полета. В первом приближении можно считать, что длина основного энерговыделения пропорциональна характеристической высоте атмосферы H и, убрав ее в константы, выразить ΔP через кинетическую энергию (17). Наша зависимость (6) также занимает промежуточное положение между этими двумя компонентами (17) как по степени энергии, так и по степени расстояния.

К опасным факторам ударной волны относятся не только избыточное давление, но и скорость ветра за фронтом. Уровень избыточного давления и скорость ветра за фронтом ударной волны связаны уравнениями Гюгонио. Следовательно, распределение максимальной массовой скорости ветра может быть получено из распределения избыточного давления:

$$V_{\max} = \frac{330 \Delta P}{\gamma P_0} \left(1 + \frac{\gamma + 1 \Delta P}{2\gamma P_0} \right)^{-1/2}, \quad (18)$$

где $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты.

Распределения ветра, полученные по этой формуле с использованием выражения (6), сравнивались с численными расчетами, в которых определялась максимальная горизонтальная составляющая скорости. Значительными можно считать скорости ветра в диапазоне от 20 м/с (начинают падать сухие ветки с деревьев), в этом диапазоне средняя относительная ошибка нашей модели (18) составляет около 2–4.

Строго говоря, формула (18) хорошо работает на больших расстояниях, где фронт ударной волны становится вертикальным. Особенно большую погрешность формула (18) дает в зоне “телеграфного леса” для воздушных взрывов, где почти все деревья остаются стоять вертикально с оторванными кронами, в этой области скорость

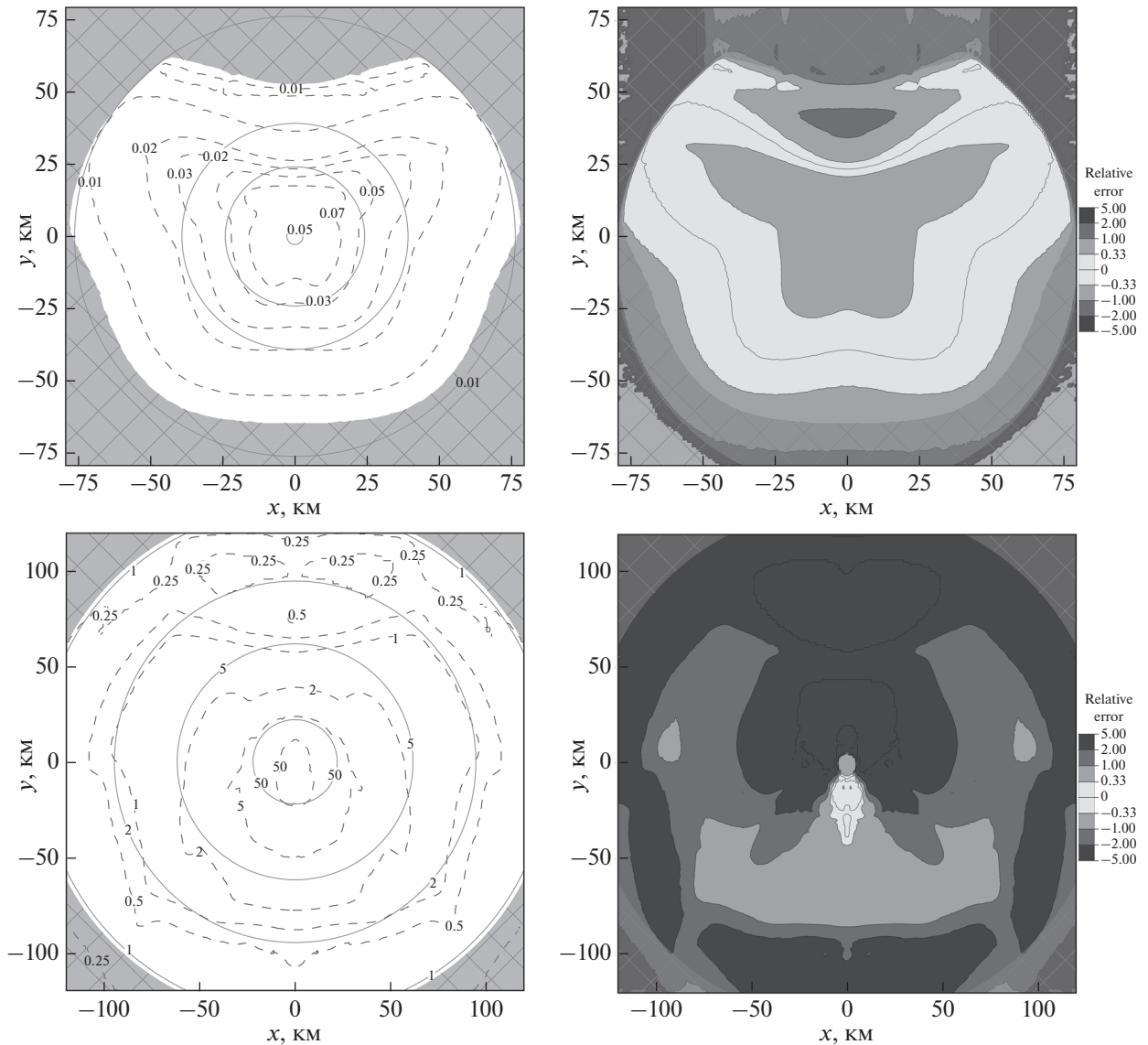


Рис. 5. Распределение максимального избыточного давления ΔP для 30-м астероида со скоростью 20 км/с, углом входа 45° (верхняя левая панель) и для 1-км кометы со скоростью 50 км/с, углом входа 45° (нижняя левая панель). Траектория направлена сверху вниз. Центр находится в точке максимального энерговыделения. Серая область с косой сеткой обозначает область низкого избыточного давления, точность расчета которого невысока. На рис. (слева) — метки соответствуют значениям ΔP , пунктирные кривые с черными курсивными метками соответствуют результатам численного моделирования; сплошные контуры с серыми метками — распределение ΔP по аппроксимационному соотношению (15) из работы [Collins et al., 2017] для верхнего ряда и по работе [Collins et al., 2005] для нижнего ряда; (справа) — распределение относительных ошибок.

газа за фронтом ударной волны направлена почти вертикально. Аппроксимационные соотношения были применены к двум наиболее известным событиям — Челябинскому астероиду 2013 г. (рис. 6) и Тунгусскому событию 1908 г. Максимальное избыточное давление составляет около 0.03 атм (3 кПа) для Челябинска и 0.3 атм (30 кПа) для Тунгуски.

Сравнение полученных распределений избыточного давления для астероида Челябинск с данными о разрушениях и травмах показывает не-

плохое согласие [Kartashova et al., 2018]. Сравнение результатов численного моделирования [Shuvalov et al., 2017b] с оценками масштабных соотношений приведено на рис. 6 и демонстрирует хорошее согласие. Следует отметить, что моделируемые области, полученные с помощью аппроксимационного соотношения (6), уже в направлении, перпендикулярном траектории, чем полученные с помощью численного моделирования. Это показатель того, что параметр EI недооценен для косых ударов относительно небольших тел.

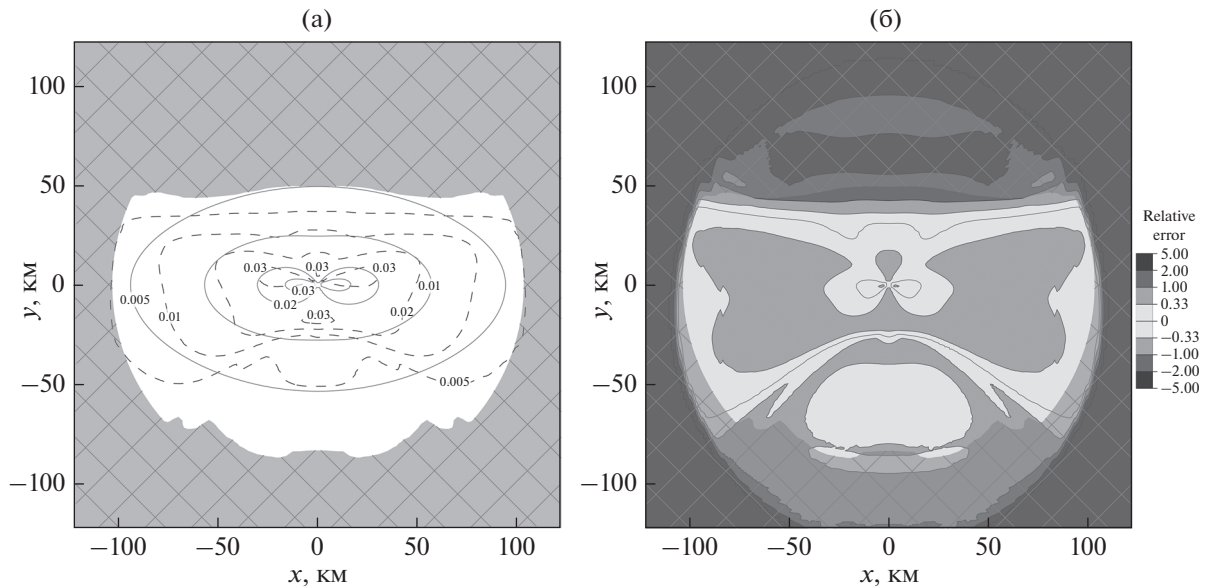


Рис. 6. Распределение максимального избыточного давления ΔP для Челябинского астероида ($D = 19$ м, $V = 19$ км/с, $\alpha = 18^\circ$). Траектория направлена сверху вниз. Центр находится в проекции на плоскость (x – y) точки максимального энерговыделения. Серая область с кривой сеткой обозначает область низкого избыточного давления, точность расчета которого невысока. На рис. (слева) – метки соответствуют значениям ΔP (атм), пунктирные кривые с черными курсивными метками, соответствуют результатам численного моделирования; сплошные контуры с серыми метками – распределение ΔP по аппроксимационному соотношению (6); (справа) – распределение относительных ошибок.

Кроме того, значения относительного избыточного давления в этом случае низкие (на нижней границе значений относительного давления), и их точность ниже, чем в других случаях.

В случае Тунгусского события можно рассматривать широкий диапазон параметров импактора (т.е. кинетическая энергия от 10 до 15 Мт, плотность космического объекта от 1000 до 3320 кг/м³; угол входа в диапазоне 20°–45° и диапазон скоростей 15–40 км/с). Сравнение результатов аппроксимации (6) с показаниями очевидцев демонстрирует удовлетворительное согласие: избыточные давления на расстояниях 300–400 км оказываются достаточными для повреждения остекления, что согласуется с недавно опубликованными данными о разбитых стеклах [Jenniskens et al., 2019].

КАЛЬКУЛЯТОР ЭФФЕКТОВ ПАДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

В интернете доступны несколько веб-калькуляторов для оценки последствий импактов космических тел. Самым популярным из них является *ImpactEarth* (<https://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEarth/>), который подробно описан в работах [Collins et al., 2005; 2017]. Как уже отмечалось выше, этот калькулятор основан на упрощенных моделях и данных о ядерных взрывах. Можно использовать оценки некоторых эффектов; другие оцениваются с существенными погрешностями,

некоторые эффекты вообще не рассчитываются. Например, этот калькулятор не оценивает излучения, возникающего при пролете и разрушении космического тела в атмосфере. Другой калькулятор, доступный в интернете (<http://simulator.down2earth.eu>), фактически представляет собой тот же калькулятор.

Наш онлайн-калькулятор доступен на <http://AsteroidHazard.pro> и реализует представленные аппроксимационные соотношения для эффектов ударной волны, которые основаны на серийном численном моделировании падения космических тел. Помимо воздействия ударных волн, калькулятор также дает оценку радиационных эффектов [Svetsov, Shuvalov, 2018; 2019; Podobnaya et al., 2018], параметров образования кратеров и выбросов [Artemieva et al., 2019], сейсмических эффектов [Svetsov et al., 2017] и атмосферных возмущений в верхних слоях атмосферы [Shuvalov, Khazins, 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численного моделирования падений космических тел в широком диапазоне их свойств позволил предложить простые соотношения, которые дают возможность оценивать избыточное давление в любой точке пространства на поверхности Земли для падающего тела с заданными свойствами и могут использоваться для прогнозирования последствий удара.

Предложенные соотношения зависят только от параметров импактора (размер, плотность, скорость и угол входа в атмосферу), не требуют длительных вычислений и представляют собой относительно простые алгебраические выражения.

Все аппроксимации, описанные выше, реализованы в онлайн-калькуляторе (<http://AsteroidHazard.pro>), который можно использовать для быстрой оценки опасных последствий. Кроме того, в калькуляторе возможен расчет других эффектов (тепловые потоки, размер кратера, выбросы из кратера, сейсмическое воздействие и ионосферные возмущения).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам член-корр. РАН Б.М. Шустову и д-ру физ.-мат. наук Б.А. Иванову за внимательное прочтение работы и сделанные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема АААА-А17-117112350016-2, шифр темы 0146-2020-0002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С., Замалин В.М., Кобзев Г.А., Лагарьков А.Н., Мнацаканян А.Х., Норман Г.Э. Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука. 1970. 320 с.
- Акимов В.А., Глазачев Д.О., Емельяненко В.В., Краминцев А.П., Нароенков С.А., Попова О.П., Пучков В.А., Рыхлова Л.В., Савельев М.И., Светцов В.В., Трубецкая И.А., Шувалов В.В., Шугаров А.С., Шустов Б.М. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Под общ. ред. Пучкова В.А. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. 272 с.
- Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. М.: АН СССР. 1952. № 1. С. 20–110.
- Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Влияние внутреннего трения на деформацию разрушенного метеороида // *Астрономический вестник*. 2010. Т. 44. № 2. С. 117–122.
- Хазинс В.М., Шувалов В.В., Светцов В.В. Сейсмическая эффективность ударов космических тел // *Астрономический вестник: Исследования Солнечной системы*. 2018. Т. 52. № 6. С. 566–576.
- Цикулин, М.А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М.: 1969. Наука. 86 с.
- Artemieva N., Shuvalov V. Atmospheric shock waves after impacts of cosmic bodies up to 1000 m in diameter // *Meteorit. Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 3. P. 592–608.
- Artemieva N., Shuvalov V.V., Khazins V.M. Upper atmosphere effects after the entry of small cosmic bodies: Dust trains, plumes, and atmospheric disturbances // *Icarus*. 2019. V. 327. P. 60–71.
- Bronikowska M., Artemieva N.A., Wünnemann K. Reconstruction of the Morasko meteoroid impact - Insight from numerical modeling // *Meteoritics & Planetary Science*. 2017. V. 52. № 8. P. 1704–1721.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., De Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D.E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R.E., Spurný P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R.J., Whitaker R., Krzeminski Z. A 500-kilometer airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013. V. 503. № 7475. P. 238–241.
- 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 // *Meteorit. Planet. Sci.* 2005. V. 40. № 6. P. 817–840.
- Collins G.S., Lynch E., McAdam R., Davison T.M. A numerical assessment of simple airblast models of impact airbursts // *Meteorit. Planet. Sci.* 2017. V. 52. № 8. P. 1542–1560.
- Gi N., Brown P., Aftosmis M. The frequency of window damage caused by bolide airbursts: A quarter century case study // *Meteorit. Planet. Sci.* 2018. V. 47. P. 1413–1431.
- Glasstone S., Dolan P.J. The Effects of Nuclear Weapons. 3rd edition. Washington, D.C.: US Department of Defense. 1977. 653 p.
- Ivanov B.A., Deniem D., Neukum G. Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric break up and impact cratering // *Int. J. Impact Eng.* 1997. V. 20. P. 411–430.
- Jenniskens P., Popova O.P., Glazachev D.O., Podobnaya E.D., Kartashova A.P. Tunguska eyewitness accounts, injuries, and casualties // *Icarus*. 2019. V. 327. P. 4–18.
- Kartashova A.P., Popova O.P., Glazachev D.O., Jenniskens P., Emel'yanenko V.V., Podobnaya E.D., Skripnik A.Y. Study of injuries from the Chelyabinsk airburst event // *Planet. Space Sci.* 2018. V. 160. P. 107–114.
- Krinov E.L. New Studies of the Sikhote-Alin Iron Meteorite Shower // *Meteoritics*. 1971. V. 6. № 3. P. 127–138.
- Nemtchinov I.V., Popova O.P. An Analysis of the 1947 Sikhote-Alin Event and a Comparison with the Phenomenon of February 1, 1994 // *Sol. Syst. Res.* 1997. V. 31. № 5. P. 12.
- Podobnaya E.D., Glazachev D.O., Popova O.P., Svetsov V.V., Shuvalov V.V. Scaling Relations for Radiation Effects due to Impacts of Large Cosmic Objects // *Meteorit. Planet. Sci.* 2018. V. 53. P. 6030.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Kochantsev A.V., Larionov M.Y., Glazachev D., Mayer A.E., Gislser G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.H., Li Q.L., Liu Y., Tang G.Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Re-

- covery, and Characterization // *Science*. 2013. V. 342. № 6162. P. 1069–1073.
- Sánchez P., Scheeres D.J.* The strength of regolith and rubble pile asteroids // *Meteorit. Planet. Sci.* 2014. V. 49. № 5. P. 788–811.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the 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. Space Sci.* 2002. V. 50. № 2. P. 81–192.
- Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A.* Aerial bursts in the terrestrial atmosphere // *Sol. Syst. Res.* 2007. V. 41. № 3. P. 220–230.
- Shuvalov V.V., Khazins V.M.* Numerical Simulation of Ionospheric Disturbances Generated by the Chelyabinsk and Tunguska Space Body Impacts // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 2. P. 129–138.
- Shuvalov V.V., Svetsov V.V., Trubetskaya I.A.* An estimate for the size of the area of damage on the Earth's surface after impacts of 10–300-m asteroids // *Solar System Research*. 2013. V. 47. № 4. P. 260–267.
- Shuvalov V.V., Popova O.P., Svetsov V.V., Trubetskaya I.A., Glazachev D.O.* Determination of the Height of the “Meteoric Explosion” // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 1. P. 1–12.
- Shuvalov V.V., Svetsov V.V., Artem'eva N.A., Trubetskaya I.A., Popova O.P., Glazachev D.O.* Asteroid Apophis: Evaluating the impact hazards of such bodies // *Sol. Syst. Res.* 2017a. V. 51. № 1. P. 44–58.
- Shuvalov V.V., Svetsov V.V., Popova O.P., Glazachev D.O.* Numerical model of the Chelyabinsk meteoroid as a strengthless object // *Planet. Space Sci.* 2017b. V. 147. P. 38–47.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Thermal radiation and luminous efficiency of superbolides // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2018. V. 503. P. 10–16.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Thermal radiation from impact plumes // *Meteorit. Planet. Sci.* 2019. V. 54. P. 126–141.
- Svetsov V.V., Nemtchinov I.V., Teterev A.V.* Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131–153.
- Svetsov V.V., Artemieva N.A., Shuvalov V.V.* Seismic Efficiency of Meteor Airbursts // *Dokl. Earth Sci.* 2017. V. 475. № 2. P. 935–938.

Shock Wave Effects from the Impacts of Cosmic Objects with Diameters from 20 m to 3 km

D. O. Glazachev^{a, *}, O. P. Popova^{a, **}, E. D. Podobnaya^{a, *}, N. A. Artemieva^{a, ****},
V. V. Shuvalov^{a, *****}, and V. V. Svetsov^{a, *****}**

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

*e-mail: GlazachevD@gmail.com

**e-mail: olga@idg.chph.ras.ru

***e-mail: epodobnaya@gmail.com

****e-mail: natalia.artemeva@gmail.com

*****e-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

*****e-mail: svetsov07@rambler.ru

Destruction on the Earth's surface caused by a shock wave is one of the most important and dangerous effects from asteroid and comet impacts. The overpressure and wind speed behind the shock wave front, leading to various dangerous effects, can be estimated on the basis of specially developed models of the interaction of cosmic objects with the atmosphere and the Earth's surface. The shock wave is also the cause of seismic effects, but this work only considers the direct effect of the shock wave. A serial numerical modeling of the interaction of cosmic objects with the atmosphere has previously been performed for a large number of different scenarios under the hydrodynamic model. Analysis of the modeling results provides scaling relations that allow you to estimate the overpressure, wind speed behind the shock wave and their distribution on the surface, if you know the impactor's parameters, its velocity and trajectory inclination angle. These relations take into account the spatial inhomogeneity of the overpressure distribution on the Earth's surface. The suggested scaling relations were tested on the data of the Chelyabinsk and Tunguska events, which showed a good correspondence with the observed destruction data. The obtained scaling relations are used in the online calculator (<http://www.AsteroidHazard.pro>), which allows you to quickly and quite accurately estimate the various effects of impacts.

Keywords: asteroid-comet hazard, shock wave, scaling relations, numerical modeling