

УДК 523.6

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ПОСЛЕДСТВИЯ УДАРОВ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

© 2020 г. В. В. Шувалов*

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.08.2019 г.

После доработки 26.09.2019 г.

Принята к публикации 31.10.2019 г.

Приведены результаты численного моделирования падения километровых астероидов на поверхность с разным рельефом (ровная поверхность, гора и впадина). Результаты показывают, что наличие рельефа заметно влияет на амплитуду ударной волны, распространяющейся вдоль поверхности, на размер огненного шара и потоки излучения на поверхности, на распределение выбросов вокруг кратера. Это влияние существенно, если размер неоднородностей рельефа равен или больше размера ударника.

Ключевые слова: астероидная опасность, ударная волна, численное моделирование, кратер, атмосферные возмущения

DOI: 10.31857/S0320930X20020073

ВВЕДЕНИЕ

Последствия падения на Землю космических тел сильно зависят от параметров падающего тела: его размеров, скорости, плотности, угла наклона траектории и т.д. (см., например, Адушкин и Немчинов, 2005). Последствия кратерообразующих ударов и параметры образующегося кратера могут зависеть от структуры поверхности: прочности, пористости, водонасыщенности, слоистости и т.д. (Collins и др., 2012). Еще одним фактором, влияющим на эффекты, производимые ударом может быть рельеф поверхности, если характерный размер особенностей рельефа сравним с размером ударника. Из общих соображений можно предположить, что наличие выпуклости (удар в гору) должно привести к усилению атмосферных эффектов: усилению ударной волны и увеличению светящейся области. Соответственно, при наличии впадины на поверхности, по-видимому, происходит более эффективная передача энергии твердой мишени, что должно привести к усилению ударной и сейсмической волн в грунте и ослаблению атмосферных эффектов. Однако заранее не ясно, насколько сильным может быть это влияние рельефа и как оно зависит от соотношения между размерами ударника и неоднородностей рельефа.

В работах (Kenkmann и др., 2009; Krohn и др., 2014; Włodarski и др., 2017) обсуждалось и численно моделировалось влияние топографии поверхности на формирование ударного кратера. Целью

данной работы является численное моделирование атмосферных эффектов при ударе километрового астероида по поверхностям с разным рельефом (ровная поверхность, гора и впадина) и выяснение степени влияния неоднородностей разного масштаба на последствия рассматриваемых ударов. В первой части описываются постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй — результаты расчета падения километровых астероидов по ровной поверхности и поверхности с выемкой и впадиной; в третьей части приведены основные выводы и перечислены оставшиеся невыясненными вопросы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для оценки влияния рельефа на последствия ударов космических тел рассматриваются вертикальные падения километрового астероида на плоскую поверхность, в гору и впадину. Гора и впадина моделируются полусферическими выпуклостью и вогнутостью радиусом H , который варьируется в диапазоне от 0.25 до 2 км. Центр полусферической выпуклости/вогнутости лежит в точке ($r = 0$, $z = 0$), через которую проходит траектория астероида (см. рис. 1). Для расчетов таких ударов использовалась методика (Shuvalov, 2003), основанная на программе SOVA (Shuvalov, 1999) и учитывающая прочность грунта по модели Кулона-Мора и акустическую флюидизацию

(Wünnemann, Ivanov, 2003). Термодинамические свойства ударника и мишени описываются уравнением состояния кварца, полученным в (Meloch, 2007) по программе ANEOS (Tompson, Lauson, 1972). Для описания атмосферы используются таблицы CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>), и уравнение состояния воздуха (Кузнецов, 1965). Движение астероида начинается на высоте 20 км для того, чтобы учесть влияние баллистической ударной волны, генерируемой астероидом при полете в атмосфере. Скорость астероида считалась равной 20 км/с. На начальной стадии расчетов использовалась довольно подробная расчетная сетка с размером ячейки 30 м для того, чтобы детально описать образование кратера и генерацию ударных волн в атмосфере и грунте, на поздней стадии размер ячейки и расчетной области увеличивался для расчета возмущений на больших расстояниях. Максимальный размер расчетной сетки составлял 1000 точек по вертикали и 3000 точек по горизонтали. Для получения распределений максимального давления, достигаемого при прохождении ударной волны в грунте и атмосфере, вводилось около 10^5 неподвижных маркерных точек, в которых отслеживалось изменение давления со временем, точнее, сохранялись максимальные за все время расчетов значения давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 показаны начальные данные и начальная стадия ударов километровых астероидов для случая максимального размера неоднородностей $H = 2$ км. При падении астероида на ровную твердую поверхность одновременно формируются углубление в грунте (кратер) и коническая струя вещества, выбрасываемого из кратера в атмосферу под углом, близким к 45° . Ударная волна, распространяющаяся в атмосфере, формируется в результате взаимодействия баллистической ударной волны, генерируемой при движении тела в атмосфере, и волны, генерируемой разлетом выбросов из кратера. При падении астероида во впадину на начальной стадии формирования кратера выбрасываемое вещество остается внутри впадины и не влияет на ударную волну, распространяющуюся в атмосфере, которая полностью определяется на этой стадии баллистической волной. При ударе в гору, наоборот, вещество горы, не стесненное сбоку, разлетается во все стороны более интенсивно, чем при ударе по ровной поверхности и генерирует в атмосфере более сильную ударную волну.

На рис. 2 показан дальнейший рост кратеров для тех же ударов. При падении астероида на плоскую поверхность вещество мишени в момент

удара приобретает скорость, направленную по радиусам (перпендикулярную фронту ударной волны), расходящимся из точки первоначального контакта. Эта скорость уменьшается со временем из-за того, что давление газа в образующейся полости (кратере) меньше давления за фронтом ударной волны, распространяющейся в мишени. Одновременно появляется скорость в перпендикулярном радиусу направлении из-за наличия свободной поверхности на границе мишени и воздуха, в котором давление равно атмосферному. Образуется классическое кратерообразующее течение (Иванов, 1979). Вещество вблизи поверхности после прохождения ударной волны получает большую направленную горизонтально скорость. Эта скорость уменьшается со временем из-за того, что градиент давления и ускорение направлены к центру. Одновременно появляется вертикальная составляющая скорости, направленная вверх из-за того, что давление в ударно-сжатой мишени выше, чем давление воздуха. В результате формируется коническая струя выбросов, разлетающихся из кратера под углом примерно 45° . При падении астероида во впадину вещество мишени вблизи поверхности ($z = 0$) в момент контакта (который происходит на дне впадины) не получает начальной горизонтальной скорости, как в случае вертикального удара. Распространяющаяся вверх ударная волна повышает давление грунта на границах впадины, и грунт ускоряется в направлении к оси симметрии. В случае удара по ровной поверхности это ускорение уменьшает начальную направленную от оси симметрии скорость, при падении астероида во впадину этой начальной скорости нет, поэтому вещество разлетается внутрь. Столкновение струй выбросов вблизи оси симметрии приводит к формированию почти вертикальной струи. В случае удара астероида в гору, наоборот, вещество самой горы разлетается почти горизонтально.

Можно рассуждать по-другому. Выбросы из кратера, образованного на ровной поверхности, разлетаются под углом около 45° . Если поверхность загибается вверх (как во впадине), то этот угол увеличивается, и при угле наклона поверхности больше 45° , выбросы будут лететь не из кратера, а в кратер. Если поверхность загибается вниз (как на склоне горы), то угол разлета выбросов уменьшается. Таким образом, наличие рельефа может заметно влиять на угол разлета выбросов и, соответственно, на расстояние их выпадения.

В момент времени около 10 с промежуточный кратер достигает максимальной величины во всех трех вариантах. Как и следовало ожидать, самый глубокий промежуточный кратер получается в случае падения астероида во впадину, а самый мелкий — при ударе в гору. Через минуту после

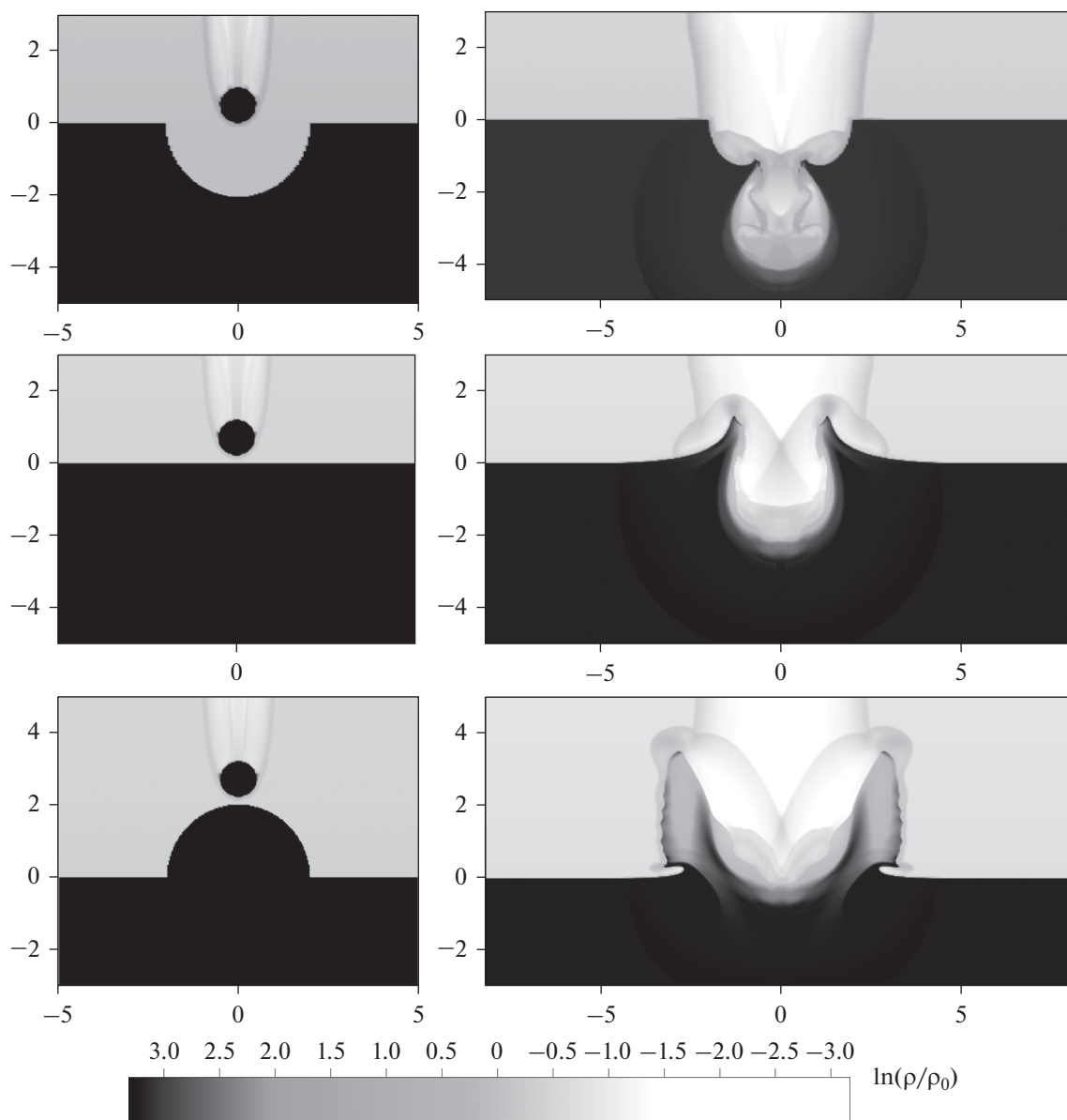


Рис. 1. На левых панелях показаны начальные данные (когда ударник подлетает к твердой поверхности), на правых — картина течения через 0.5 с, ρ — плотность вещества, $\rho_0 = 1.29 \text{ г/см}^3$ — нормальная плотность воздуха у поверхности Земли. Расстояния указаны в километрах.

удара стадия модификации кратеров почти закончена. Самым мелким оказывается кратер, образовавшийся при падении астероида во впадину, у него же самый низкий вал и меньший диаметр. Это объясняется тем, что значительная часть выбросов падает обратно в кратер. Два других кратера имеют примерно одинаковый диаметр, но у кратера, образованного на ровной поверхности, центральная горка чуть более ярко выражена.

На рис. 3 показаны зависимости максимального избыточного давления в воздухе на поверхности Земли от расстояния для трех рассмотренных выше ударов. Эти зависимости не являются

гладкими и монотонными. Объясняется это тем, что в процессе удара возникает несколько ударных волн: генерируемая при пролете астероида через атмосферу баллистическая волна, волны, генерируемые при разлете выбросов из кратера и обратном их падении на Землю. Кроме того, на высотах порядка 100 км и выше ударный плюм, состоящий из плотного воздуха, выброшенного с меньших высот, сильно расширяется. Это расширение приводит к возникновению еще одной ударной волны, которая доходит до поверхности. Взаимодействие всех этих ударных волн и определяет довольно сложную структуру зависимостей, показанных на рис. 3.

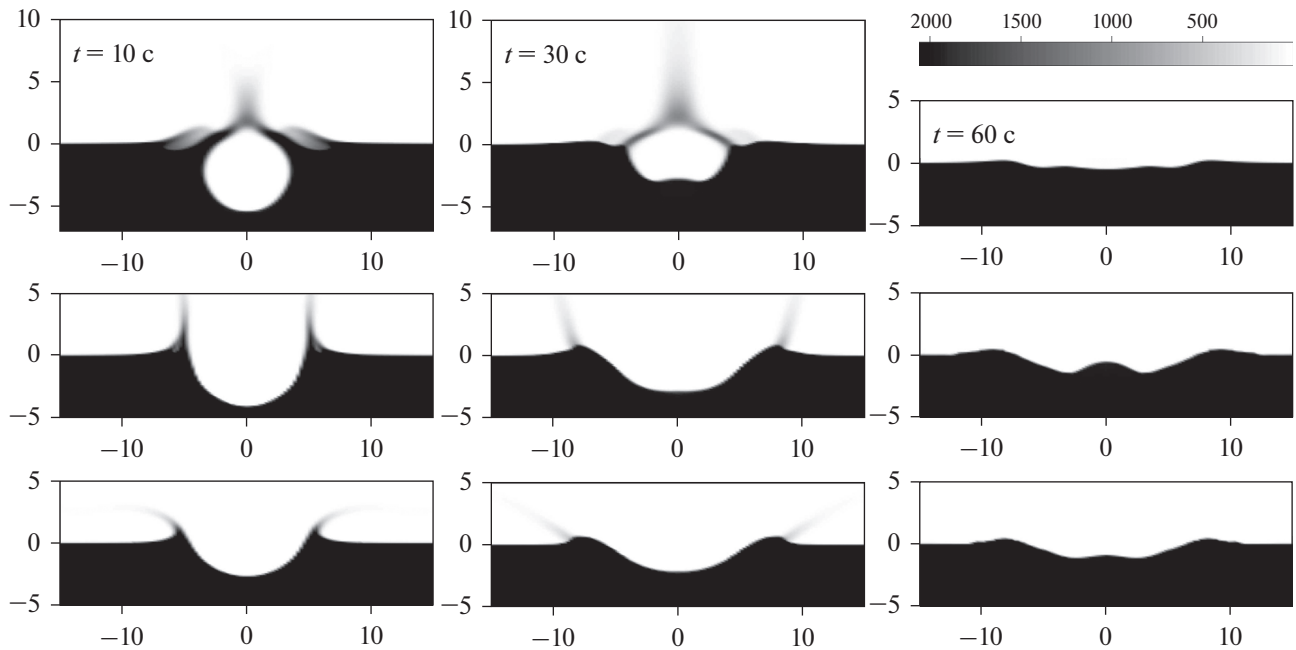


Рис. 2. Распределения относительной плотности ρ/ρ_0 в моменты времени 10, 30 и 60 с после вертикального падения километрового астероида во впадину (верхний ряд рисунков), на ровную поверхность (средний ряд) и на гору (нижний ряд). ρ — плотность вещества, $\rho_0 = 1.29 \text{ г/см}^3$ — нормальная плотность воздуха у поверхности Земли. Расстояния указаны в километрах.

Сложный характер изменения давления (и в зоне сжатия и в зоне разрежения), вызванный наличием нескольких волн, возникающих в разное время и в разных областях пространства, демонстрирует и рис. 4, на котором показаны временные зависимости давления для удара по ровной поверхности. Еще одной причиной немонотонности зависимости максимального избыточного давления от расстояния является изменение температуры воздуха и скорости звука с высотой, что приводит к искривлению фронта ударных и звуковых волн (Блохинцев, 1946).

Несмотря на негладкий вид кривых на рис. 3, явно видно, что при падении астероида во впадину глубиной $H = 2 \text{ км}$ давления на поверхности примерно в 3 раза ниже, чем при ударе по ровной поверхности, а при ударе в гору в 3 раза выше, т.е. наличие рельефа может менять максимальные избыточные давления на порядок на одинаковых удалениях от эпицентра удара. Еще больше может быть различие, если мы рассмотрим размеры зоны разрушений, вызываемых этими ударами. Так согласно (Glasstone, Dolan, 1977) кирпичные стены толщиной 24–36 см начинают разрушаться при избыточных давлениях выше 0.2 бар. Площадь зоны, где избыточное давление превышает эту величину, составляет примерно 3000 км^2 при падении астероида во впадину глубиной 2 км и 300000 км^2 (т.е. в сто раз больше) при ударе в гору такой же высоты.

На рис. 5 показаны распределения избыточного давления для разных глубин впадины и высот горы. Из этих результатов следует, что влияние

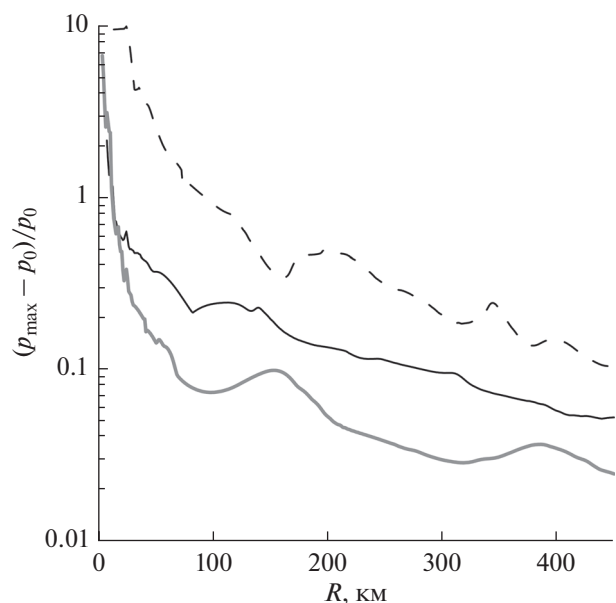


Рис. 3. Зависимость максимального относительного избыточного давления в воздухе $(p_{\max} - p_0)/p_0$ на поверхности Земли от расстояния R . $p_{\max}$ — максимальное давление за все время, p_0 — атмосферное давление на нулевой высоте. Черная кривая соответствует удару по ровной поверхности, серая — падению астероида во впадину радиусом $H = 2 \text{ км}$, пунктирная — удару в гору радиусом $H = 2 \text{ км}$.

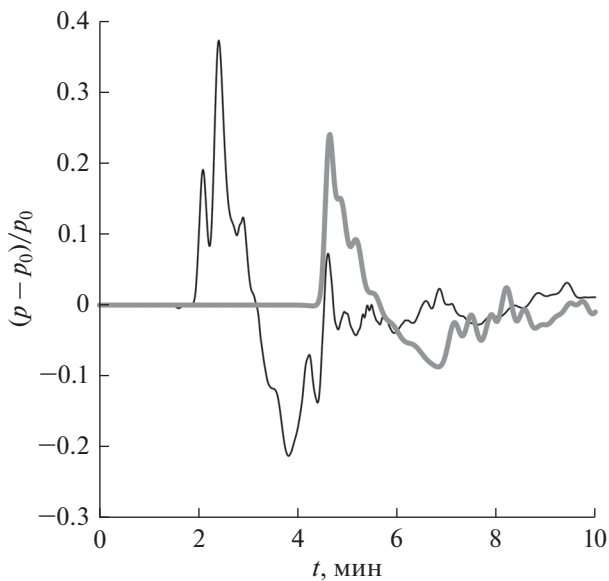


Рис. 4. Зависимость от времени относительного избыточного давления в воздухе $(p_{\max} - p_0)/p_0$ на поверхности Земли на расстояниях 50 (черная кривая) и 100 (серая кривая) км от точки удара. $p_{\max}$ — максимальное давление за все время, p_0 — атмосферное давление на нулевой высоте.

рельефа существенно, если глубина впадины или высота горы больше, чем радиус ударника.

Для сравнения были проведены по той же методике расчеты затухания ударной волны от сферических взрывов в однородной атмосфере с

плотностью воздуха, равной плотности воздуха у поверхности Земли. В качестве начальных данных задавался шаровой объем воздуха с плотностью, равной плотности вещества метеороида, диаметром 1 км (как у астероида) и энергией, равной E , $0.1E$ и $0.01E$, где E — энергия астероида. Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что “взрывные” и “ударные” кривые сильно отличаются. В начальные моменты времени (т.е. на малых расстояниях) при ударе давления намного меньше, чем при взрыве. При ударах по впадине и ровной поверхности это объясняется не только передачей энергии в грунт, но и тем, что конус разлетающихся выбросов ограничивает разлет горячего вещества из центра. При ударе в гору сначала энергия ударника передается веществу горы, которое потом разлетается вбок. Это похоже на взрыв, но начальная масса больше, а плотность энергии и начальная амплитуда ударной волны, соответственно, меньше. На больших расстояниях ударная волна от ударов затухает слабее, чем от взрывная. Объясняется это тем, что взрывы рассчитывались в однородной атмосфере, и волны затухают по сферическому закону. Удары же считались в реальной атмосфере, масса которой ограничена в вертикальном направлении, поэтому затухание волны не сферическое, а ближе к цилиндрическому. Из рис. 6 можно сделать вывод, что взрывная аналогия для ударов работает плохо, и однозначно определить энергию эквивалентного взрыва невозможно.

На рис. 7 показаны распределения избыточного давления в грунте для трех вариантов удара ки-

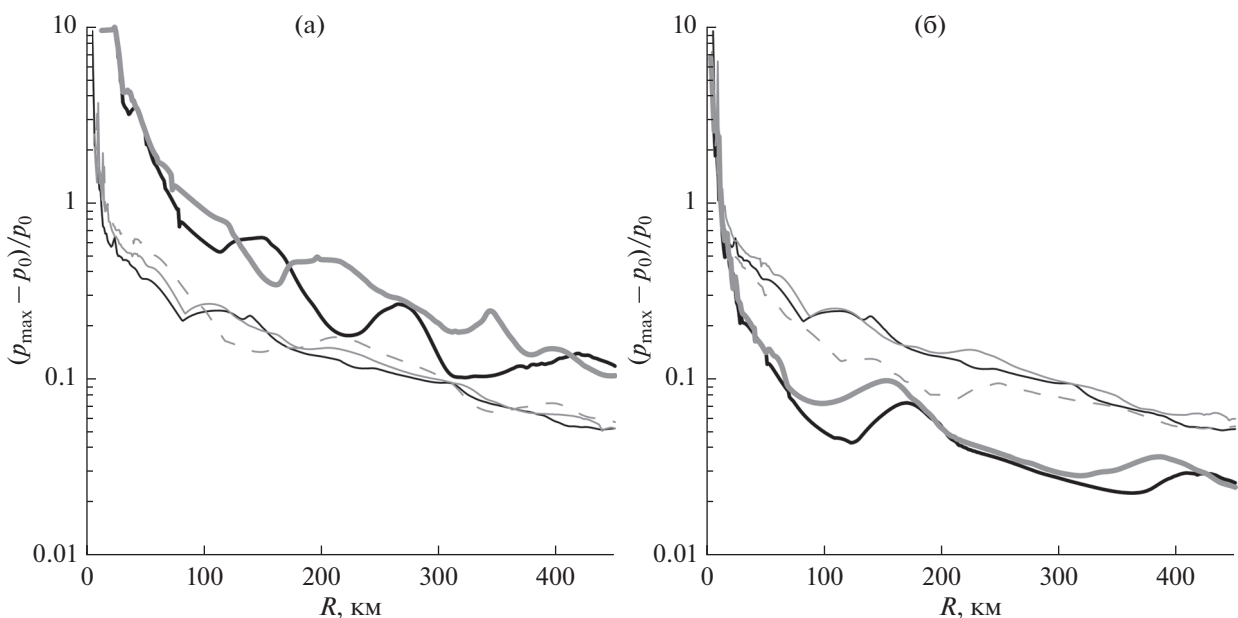


Рис. 5. Зависимость максимального относительного избыточного давления $(p_{\max} - p_0)/p_0$ на поверхности Земли от расстояния R при падении километрового астероида в гору радиуса H (а) и во впадину радиуса H (б). $p_{\max}$ — максимальное давление за все время, p_0 — атмосферное давление на нулевой высоте. Тонкая черная кривая соответствует $H = 0$, тонкая серая кривая — $H = 0.25$ км, серый пунктир — $H = 0.5$ км, толстая черная линия — $H = 1$ км, толстая серая линия — $H = 2$ км.

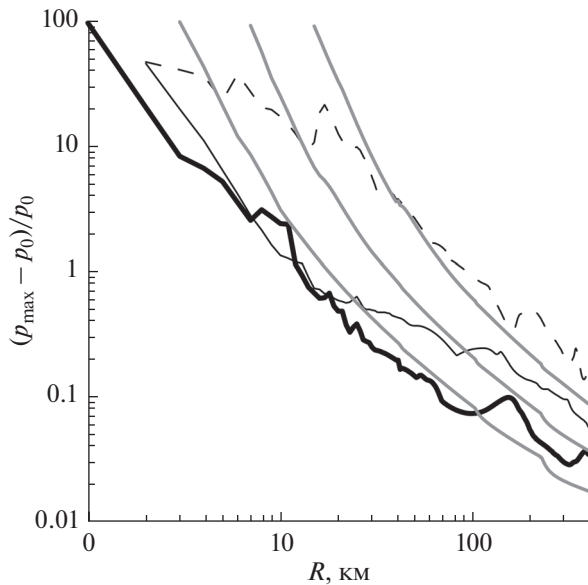


Рис. 6. Зависимость максимального относительного избыточного давления $(p_{\max} - p_0)/p_0$ на поверхности Земли от расстояния R . $p_{\max}$ — максимальное давление за все время, p_0 — атмосферное давление на нулевой высоте. Тонкая черная кривая соответствует удару по ровной поверхности, толстая черная — падению астероида во впадину радиусом $H = 2$ км, пунктирная — удару в гору радиусом $H = 2$ км, серые линии соответствуют сферическому взрыву с энергиями E , $0.1E$ и $0.01E$, где E — энергия астероида.

лометрового астероида: по ровной поверхности, впадине и горе глубиной/высотой 2 км. Эти распределения характеризуют амплитуду ударной волны, распространяющейся в земле, долю энергии ударника, переданной земле и, по-видимому, сейсмическую эффективность ударов (Хазинс и др., 2018). Различия в амплитудах ударных волн в грунте значительно меньше, чем различия в амплитудах воздушной волны, распространяющейся вдоль поверхности (ср. с рис. 3). Максимальные амплитуды, как и ожидалось, достигаются при падении астероида во впадину, почти такие же при ударе по ровной поверхности и лишь немногим (на 10–20%) меньшие при ударе в гору. Небольшое различие объясняется тем, что во всех случаях основная часть энергии передается твердой мишени. Поэтому даже заметное изменение той небольшой части энергии, которая выделяется в атмосфере и определяет амплитуду воздушной ударной волны, слабо влияет на изменение энергии, выделяемой в земле и определяющей сейсмический эффект рассматриваемых ударов.

На рис. 8 показаны распределения температуры через 10 с после падения километрового астероида во впадину глубиной 2 км, удара по ровной поверхности и по горе высотой 2 км. Так же, как и в случае с воздушной ударной волной, разница

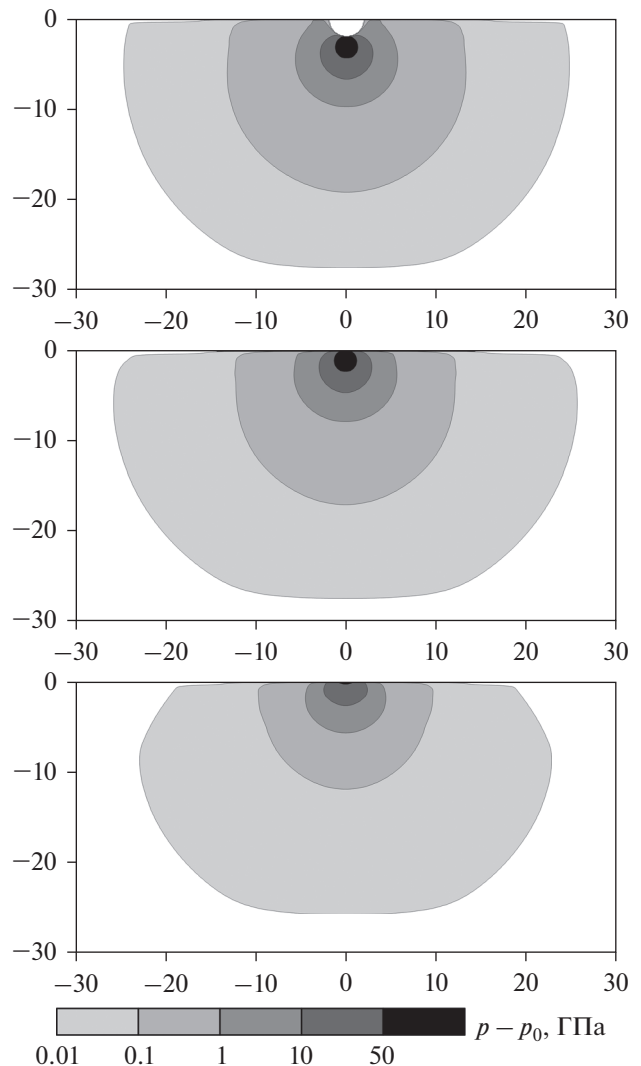


Рис. 7. Распределения максимального избыточного давления в грунте для случаев падения километрового астероида во впадину глубиной 2 км (верхний рисунок), удара по ровной поверхности и по горе высотой 2 км (нижний рисунок). Расстояния указаны в километрах.

между тремя рассматриваемыми ударами очень велика. Самая большая горячая и излучающая область формируется при ударе в гору, в случае падения астероида во впадину горячее и излучающее облако совсем маленькое. Соответственно, можно ожидать, что удары в гору значительно опаснее падения астероидов на ровную поверхность и, тем более, во впадину с точки зрения возникновения массовых пожаров.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты ударов километровых астероидов по ровной, вогнутой и выпуклой поверхности показали, что рельеф поверхности мо-

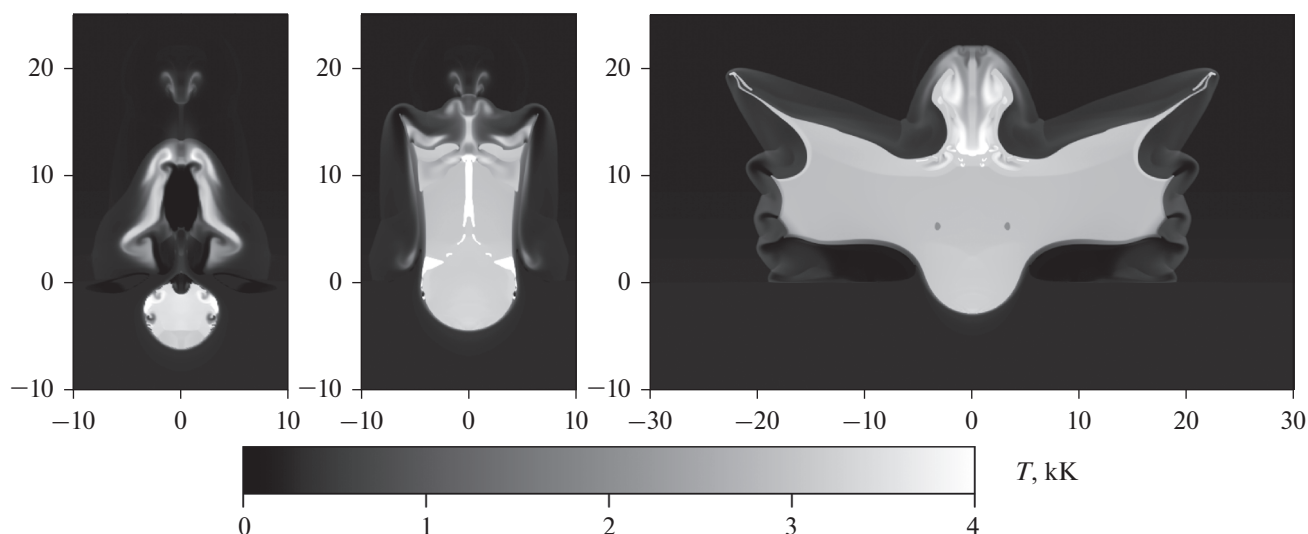


Рис. 8. Распределения температуры через 10 с после падения километрового астероида во впадину глубиной 2 км (слева), удара по ровной поверхности и по горе высотой 2 км (справа). Расстояния указаны в километрах.

жет заметно влиять на последствия таких ударов. Особенно велико влияние рельефа на атмосферные эффекты, производимые ударом. При этом наличие выпуклостей (горы) приводит к увеличению зоны разрушений, вызванных ударом на поверхности земли, и зоны возникновения массовых пожаров, а наличие вогнутостей (впадин) уменьшает размеры зон поражения. Различие в площади зоны поражения может достигать одного-двух порядков. Наличие рельефа также сильно влияет на угол, под которым вылетают выбросы из кратера и, соответственно, на распределение выбросов вокруг кратера. Особенно это касается высокоскоростных выбросов, которые вылетают на начальной стадии кратерообразования и улетают на большие расстояния. В то же время сейсмический эффект, как показывают расчеты, слабо зависит от рельефа поверхности. Расчеты так же показали, что влияние рельефа существенно, когда характерный размер неоднородностей превышает радиус астероида, меньшие неоднородности рельефа можно не учитывать.

В работе рассматривались только вертикальные удары. В случае наклонной траектории основные выводы, полученные для вертикальных ударов, не должны измениться. В любом случае при ударе в гору увеличивается доля энергии, переданной в атмосферу, что должно привести к усилению ударной волны и излучающей области. А при падении астероида во впадину кратерообразующее течение не должно сильно зависеть от угла наклона траектории. С другой стороны, при одновременном изменении и рельефа, и угла наклона траектории могут возникнуть условия для еще большего усиления или ослабления последствий удара. То же самое можно сказать и про

особенности рельефа. В данной работе рассматривались простейшие сферические гора и впадина. Наличие более сложного рельефа может усилить или ослабить эффект.

Автор благодарен анонимному рецензенту за внимательное прочтение статьи и полезные замечания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (рег. № 0146-2017-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Немчинов И.В. (ред.) Катастрофические воздействия космических тел. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2005. 310 с.
- Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: ОГИЗ, 1946. 221 с.
- Иванов Б.А. Простая модель кратерообразования // Метеоритика. 1979. № 38. С. 68–85.
- Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.
- Хазинс В.М., Шувалов В.В., Светцов В.В. Сейсмическая эффективность ударов космических тел // Астрон. вестн. 2018. Т. 54. № 6. С. 566 – 576.
- Collins G.S., Melosh H.J., Osinski G.R. The Impact cratering process // Elements. 2012. V. 8. P. 25–30.
- Glasstone S., Dolan P.J. The effects of nuclear weapons. Washington, D.C.: GPO, 1977. 653 p.
- Kenkmann T., Artemieva N., Wünnemann K., Poelchau M.H., Elbeshhausen D., Nunez Del Prado H. The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic survey and modeling of crater formation and atmospheric passage // Meteoritics and Planet. Sci. 2009. V. 44. № 7. P. 985–1000.
- Krohn K., Jaumann R., Otto K., and 11 more. Asymmetric craters on Vesta: Impact on sloping surfaces // Planet. and Space Sci. 2014. V. 103. P. 36–56.

- Melosh H.J.* A hydrocode equation of state for SiO_2 // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2007. V. 42. № 12. P. 2079–2098.
- Shuvalov V.V.* Multi-dimensional hydrodynamic code SO-VA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.
- Shuvalov V.V.* Displacement of target material during impact cratering // *Impact markers in the stratigraphic record* / Eds Koeberl C., Martinez-Ruiz F. Springer-Verlag, 2003. P. 121–135
- 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. Albuquerque: Sandia Nat. Laborat., 1972. 119 p.
- Włodarski W., Papis J., Szczuciński W.* Morphology of the Moraskocrater field (western Poland): Influences of pre-impact topography, meteoroid impact rocesses, and post-impact alterations // *Geomorphology*. 2017. V. 225. P. 586–597.
- Wünnemann K., Ivanov B.A.* Numerical modeling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustical lyfluidized target // *Planet. and Space Sci.* 2003. V. 51. P. 831–845.