

УДК 52-424

## ПАДЕНИЕ НА ЗЕМЛЮ ФРАГМЕНТОВ РАЗРУШЕННОГО АСТЕРОИДА

© 2023 г. В. В. Светцов\*

*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.

Принята к публикации 06.01.2023 г.

Проведены оценки влияния разрушения астероидов на орбитах при их приближении к Земле на последствия их ударов. Определены площади поражения ударной волной, сейсмической волной и излучением при ударе каменных астероидов по суше или при входе в атмосферу над сушей со скоростью 20 км/с для диапазона их размеров 20–500 м. Получено, что произвольное разрушение астероида недалеко от Земли может приводить к увеличению суммарной площади поражения ударными волнами и тепловым излучением при ударах отдельных фрагментов. В общем случае уменьшения ущерба при разрушении астероидов с диаметрами 150–500 м можно добиться, если основную массу фрагментов составляют тела с размерами менее 20–30 м, которые не представляют катастрофической опасности.

**Ключевые слова:** астероид, разрушение, удар, ударная волна, тепловое воздействие

**DOI:** 10.31857/S0320930X2303009X, **EDN:** BSADIH

### ВВЕДЕНИЕ

Столкновение Земли с астероидом размером ~20 м и больше, как показывает падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г., представляет угрозу для жизни и здоровья людей и может привести к значительному общему ущербу (Brown и др., 2013; Ророва и др., 2013). Для предотвращения столкновения с опасным объектом предлагались и неоднократно обсуждались методы увода объекта со столкновительной орбиты: ударно-кинетическое воздействие массивного тела, запущенного к объекту, гравитационный увод, использование малой реактивной тяги, взрыв под или над поверхностью объекта и их различные варианты (см., например, Акимов и др., 2015; Hussein и др., 2016; Morrison, 2019; Lubin, 2021; Hogan и др., 2021).

При относительно небольших временах от момента обнаружения объекта до момента столкновения (порядка года и меньше) взрыв становится наиболее эффективным средством изменения орбиты (Perna и др., 2013; Акимов и др., 2015; Hogan и др., 2021). При необходимом отклонении орбиты взрывом целесообразно не разрушать объект, ограничивая энергию взрыва, так как удар осколков может также быть опасен. Но при еще меньших временах, когда орбиту изменить практически невозможно, единственным способом снижения угрозы может быть разрушение объекта взрывом. Последствия такого разрушения не вполне пред-

сказуемы, они зависят от массы, прочности и структуры объекта, расстояния до объекта и его орбиты и могут привести к еще более опасному столкновению Земли с осколками разрушенного тела.

Взрывом можно разрушить астероид при удельной энергии воздействия 400–500 Дж/г; так взрывом с энергией свыше 3 Мт ТНТ можно завести разрушить астероид хондритного типа с диаметром 200 м (Аристов и др., 2018). Разрушение может быть эффективным средством защиты даже для времен порядка месяцев. Моделирование (Kaplinger и др., 2012) разрушения астероида подповерхностным взрывом и дальнейшего движения расширяющегося облака осколков к Земле показало, что разрушение астероида с диаметром 1 км (массой  $\sim 10^{12}$  кг) зарядом с энергией 1 Мт за 200 дней до столкновения с Землей уводит большую часть осколков со столкновительных орбит и уменьшает суммарную массу входящих в атмосферу осколков до  $3 \times 10^9$  кг (такая масса соответствует телу с плотностью гранита с диаметром 130 м). Такая же суммарная масса ударяющих осколков получается, если астероид меньшего диаметра, 270 м, разрушается зарядом с энергией 300 кт ТНТ за 20 дней до столкновения. Разрушение такого же непористого астероида при надповерхностном нейтронном взрыве с энергией 70 кт ТНТ (Syal и др., 2013) за 20 дней до столкновения практически не дает эффекта уменьшения ударяющей массы, и лишь разрушение за 1000 дней

уменьшает эту массу до  $\sim 1\%$  от начальной. Снижение ударяющей массы до  $1\%$  для пористого тела происходит при взрыве за 60 дней до столкновения.

В работе (King и др., 2021) рассмотрены времена воздействия на опасный объект более одной недели до столкновения, когда средства отклонения не применимы, причем сделан акцент на наиболее точный расчет орбит осколков после разрушения астероида. Получено, что для астероида с диаметром 100 м, если его разрушение произойдет за месяц до столкновения, достигнимо уменьшение ударяющей массы на два порядка, а в случае особенных орбит можно достигнуть уменьшения на три порядка. Для астероида Апофис, размером около 300 м, уменьшение ударяющей массы на два порядка достигается также при разрушении примерно за месяц до столкновения, но при разрушении за две недели возможны варианты, когда все фрагменты столкнутся с Землей.

Возможность перехвата и разрушения небольших тел с размерами 50–150 м при очень небольших временах предупреждения об опасности порядка нескольких дней и даже часов рассматривалась в (Нурр и др., 2015). Разрушение в этом случае возможно с помощью современных ракет наземного базирования, но последствия удара раздробленного тела остаются неясными. Заранее неизвестно, что опаснее — удар неразрушенного тела или множественные удары его осколков.

В данной работе рассматриваются возможные последствия удара астероида с размером до 500 м по суше в случае, когда он разрушен, но большая часть фрагментов сталкивается с Землей. В первом разделе “Воздействие воздушной ударной волны” рассматривается действие воздушной ударной волны, а в разделе “Выбросы из кратера и сейсмический эффект” — сейсмическое воздействие и выбросы из кратера при падении астероидов с размерами от 20 до 500 м. Для получения областей опасного воздействия в этих разделах использовался онлайн-калькулятор. В разделе “Тепловое излучение” рассматривается воздействие теплового излучения, которое может привести к воспламенению материалов. В разделе “Падение осколков астероида”, не затрагивая проблему самого разрушения астероидов, мы сравниваем последствия ударов неразрушенного астероида и астероида, разрушенного на достаточно мелкие фрагменты.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

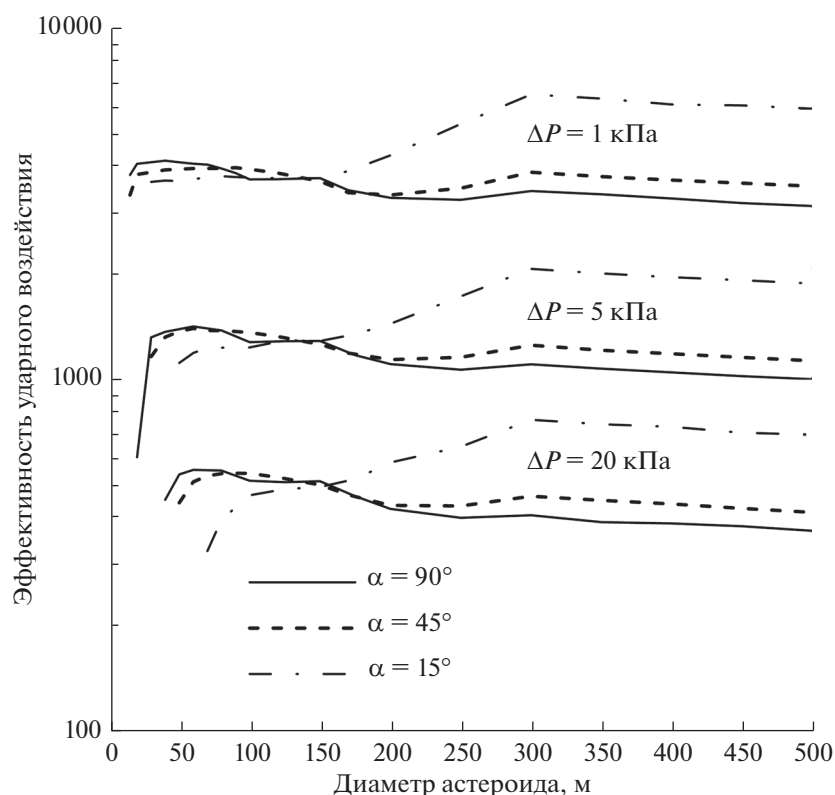
При ударе космического объекта по суше различные разрушения и бедствия могут вызывать: ударная волна, распространяющаяся в воздухе по поверхности Земли, выбросы из кратера, если космический объект достаточно массивен, земле-

трясение и тепловое излучение. Наибольшую площадь разрушений создает ударная волна, основной характеристикой которой является избыточное давление за ее фронтом,  $\Delta P$ , по отношению к атмосферному давлению на поверхности. Согласно данным, полученным при проведении взрывов в атмосфере, стены, построенные из бетонных блоков толщиной 24–36 см, разрушаются при  $\Delta P \approx 35$  кПа, а кирпичные стены такой же толщины — при  $\Delta P \approx 20$  кПа (Glasstone, Dolan, 1977). При  $\Delta P \approx 25$  кПа происходит вывал деревьев на 90%, а при  $\Delta P \approx 15$  кПа — на 40% (Glasstone, Dolan, 1977). Меньшие избыточные давления 3.5–5 кПа приводят к разрушениям окон, настенных панелей, крыш (Mannan, Lees, 2005). При еще меньших давлениях, 1–2 кПа, повреждаются оконные стекла и наблюдаются такие травмы у людей, как порезы, ушибы, переломы, сотрясения мозга, нарушение слуха (Ророва и др., 2013; Kartashova и др., 2018). Значительное количество людей после прихода ударной волны впадает в панику или приходит в состояние стресса (Kartashova и др., 2018).

В работе (Artemieva, Shuvalov, 2019) моделировалось падение космических тел на Землю в широком диапазоне их параметров и рассчитывалось распространение ударных волн в атмосфере Земли на большие расстояния. На основании этих расчетов были предложены аппроксимационные формулы (Глазачев и др., 2021), которые реализованы в онлайн-калькуляторе “ImpactEffects” (<http://AsteroidHazard.pro>). Для заданных размера астероида, его плотности, скорости и угла входа в атмосферу калькулятор позволяет определить избыточное давление для заданных точек на поверхности Земли. По этим данным мы вычислили площадь поверхности  $S$ , где избыточное давление в воздушной ударной волне после падения астероида выше определенного значения  $\Delta P$ .

Для оценки астероидной опасности введем эффективность ударного воздействия  $\epsilon_s$ , а именно отношение квадратного корня из площади поверхности  $S$ , где  $\Delta P$  выше определенного предела, к диаметру астероида  $D$ . На рис. 1 показаны зависимости эффективности воздействия для  $\Delta P > 1, 5$  и 20 кПа от  $D$ . Предполагается, что астероид с плотностью 3000 кг/м<sup>3</sup> входит в атмосферу со скоростью 20 км/с под углами  $\alpha = 90^\circ$  (вертикально),  $45^\circ$  и  $15^\circ$ . Видно, что эффективности ударного воздействия в широком диапазоне размеров астероида, от 20 до 500 м, изменяются не сильно — не более чем в 1.5 раза при углах входа  $\alpha = 90^\circ$  и  $45^\circ$  и в 2 раза при  $\alpha = 15^\circ$ . Наибольшая эффективность оказывается у тел с диаметрами 50–150 м, а при ударах под очень острыми углами,  $\alpha = 15^\circ$ , наоборот, у тел с размерами  $\sim 300$  м.

Поведение эффективности  $\epsilon_s$  в зависимости от  $D$  качественно объяснимо. При торможении от-



**Рис. 1.** Эффективности ударного воздействия в зависимости от диаметра астероида, входящего в атмосферу со скоростью 20 км/с под углом  $\alpha$  к поверхности Земли, для трех предельных избыточных давлений  $\Delta P$ . Вычисления проведены с помощью онлайн-калькулятора.

носителю небольшого астероида на значительной высоте давление в ударной волне, когда она приходит на поверхность, не достигает заданного значения. Это происходит в нашем случае, когда диаметр астероида составляет 20–30 м. При торможении астероидов вблизи поверхности (для  $D$  до 80 и 100 м при  $\alpha = 90^\circ$  и  $45^\circ$ ) эффективность ударного воздействия была бы в однородной атмосфере примерно постоянной. Действительно, при взрыве в однородной атмосфере расстояние, на котором достигается определенное давление в ударной волне,  $\Delta P$ , пропорционально кубическому корню из энергии взрыва или, в нашем случае, диаметру астероида (Зельдович, Райзер, 1966; Садовский, 1952), т.е. рассматриваемая нами эффективность воздействия взрыва слабо зависит от его энергии. Но при увеличении диаметра астероида ударная волна вследствие неоднородности атмосферы ускоряется вверх, куда уходит часть энергии. При еще больших диаметрах астероид ударяет по поверхности, и энергия идет на ударную волну в грунте и выброс породы из кратера. Поэтому эффективность воздействия с ростом  $D$  уменьшается.

При ударах под острыми углами, в нашем случае  $\alpha = 15^\circ$ , астероид большего размера, до 300 м, создает при торможении в атмосфере ударную

волну вытянутой, приближенно цилиндрической, формы, что приводит к увеличению площади воздействия ударной волны по сравнению с компактным выделением энергии.

### ВЫБРОСЫ ИЗ КРАТЕРА И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Вследствие торможения в атмосфере удар по Земле и образование кратера происходят, начиная с определенного размера астероида. При ударах астероидов под углом  $45^\circ$  со скоростью 20 км/с образовывать кратер могут тела с размерами более 100 м, то есть довольно крупные тела, которые могут быть фрагментами раздробленного еще более крупного астероида. Выбросы из кратера могут быть очень опасны на относительно небольших расстояниях от кратера. Объем выбросов, которые падают на расстояниях от центра кратера больше  $r$ , уменьшается примерно как  $1/r$ , так что 75% выбросов падают на расстояниях от центра кратера, равном  $4R_c$  ( $R_c$  – радиус кратера), а 90% – на расстоянии  $10R_c$  (Мелош, 1994). На таких расстояниях покров выбросов не является сплошным.

При диаметре астероида  $D = 500$  м средняя толщина выбросов по приближенным формулам,

Характеристики эффективности воздействия ударов

$D$ , км	$D_{fc}$ , км	$M$	$R_{VIII}$ , км	$R_{VII}$ , км	$\epsilon_{VIII}$	$\epsilon_{VII}$	$\epsilon_{s20}$	$\epsilon_{s5}$	$\epsilon_{r1}$	$\epsilon_{r2}$
500	6.9	7.7	60	190	210	670	430	1150	800	1300
300	4.4	7.2	40	100	230	590	470	1270	515	1150
200	3.0	6.7	20	47	180	415	450	1160	530	1000
150	2.6	6.2	~10	30	110	350	510	1280	540	920
100	—	5.0	—	—	—	—	550	1380	550	840

Примечание:  $D$  – диаметр астероида,  $D_{fc}$  – диаметр кратера,  $M$  – магнитуда сейсмического события,  $R_{VIII}$  и  $R_{VII}$  – радиусы проявления землетрясения интенсивностью VIII и VII по шкале Меркалли,  $\epsilon_{VIII}$  и  $\epsilon_{VII}$  – соответствующие эффективности сейсмического воздействия,  $\epsilon_{s20}$  и  $\epsilon_{s5}$  – эффективности ударного воздействия при  $\Delta P = 20$  и 5 кПа,  $\epsilon_{r1}$  и  $\epsilon_{r2}$  – эффективности радиационного воздействия путем зажигания древесины и легко воспламеняющихся материалов, соответственно.  $D_{fc}$ ,  $M$ ,  $R_{VIII}$  и  $R_{VII}$  взяты из онлайн-калькулятора.

вставленным в онлайн-калькулятор, составляет 2–3 см на расстоянии  $r = 100$  км от центра кратера и около 20 см на расстоянии 50 км. Приняв это расстояние как границу области сильного поражения, можно получить, что эффективность воздействия выбросов ( $\epsilon_e = \pi^{1/2}r/D$  в прежнем определении) равна 180. Это существенно меньше эффективности поражения ударной волной  $\epsilon_s = 600$  при  $\Delta P = 20$  кПа, когда разрушаются кирпичные стены с толщиной 24–36 см. При диаметре астероида  $D = 300$  м средняя толщина выбросов около 20 см оказывается на расстоянии 30 км и эффективность  $\epsilon_e$  также равна 180. Такой же остается  $\epsilon_e$  и при ударе астероида с диаметром  $D = 150$  м.

Падение астероида вызывает сейсмический эффект определенной магнитуды как при ударе астероида о поверхность, так и при торможении в атмосфере путем воздействия на поверхность ударной волны (Светцов и др., 2017; Хазинс и др., 2018). Площадь, охваченную сильными разрушениями, можно оценить по интенсивности проявления землетрясения на различных расстояниях от места падения, которое дается в онлайн-калькуляторе по шкале Меркалли. При интенсивности VIII наблюдаются разрушительные воздействия – значительные повреждения в обычных зданиях с частичным обрушением, полностью рушатся плохо построенные здания, фабричные трубы, башни, памятники, стены. При интенсивности VII значительные разрушения наблюдаются только в плохо построенных или плохо спроектированных зданиях. А при интенсивности VI, хотя она и ощущается всеми, трескаются штукатурка и кирпичная кладка, лопаются оконные стекла, но значительных повреждений не происходит.

Интенсивность VII достигается около кратера при увеличении диаметра астероида  $D$  до 110 м, когда магнитуда сейсмического возмущения достигает 5.7. При  $D = 150$  м интенсивность VII достигается на расстоянии  $r = 30$  км, где  $\Delta P = 14$  кПа. При  $D = 200$  м интенсивность VII достигается при  $r = 47$  км, где  $\Delta P = 10$  кПа. Эффективности сей-

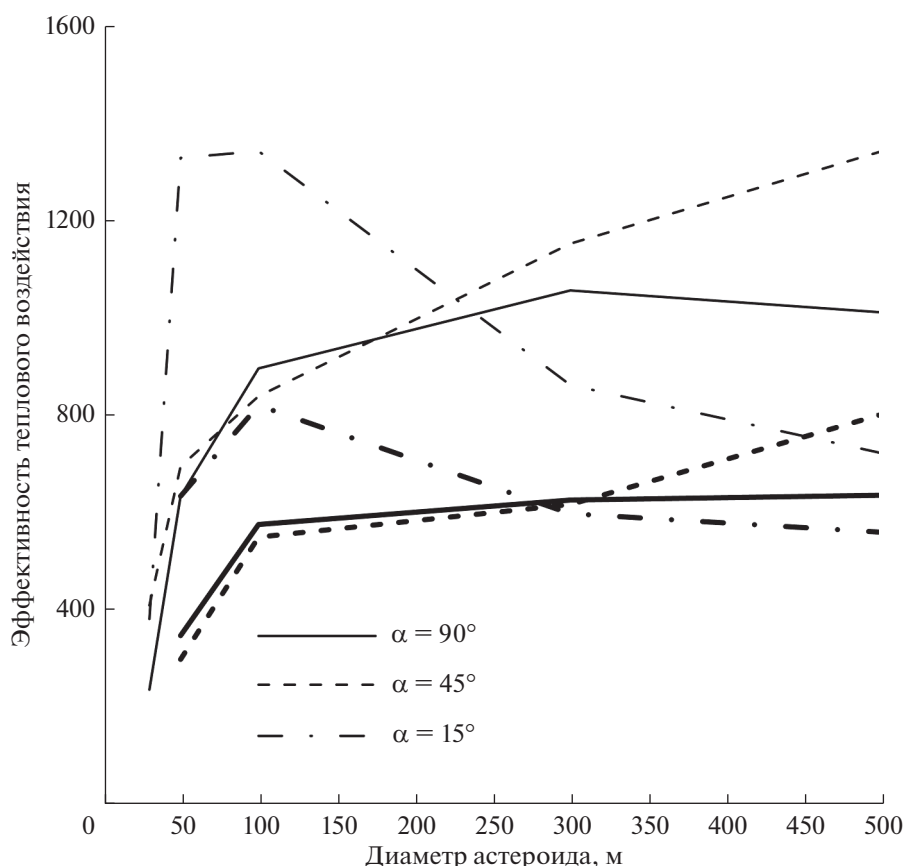
смического воздействия  $\epsilon_{VII}$  и  $\epsilon_{VIII}$  при интенсивностях VII и VIII для  $D$  больше 100 м помещены в таблице, где приведены также эффективности поражения ударной волной  $\epsilon_s$  для  $\Delta P = 5$  кПа и  $\Delta P = 20$  кПа.  $\epsilon_{VII}$  существенно ниже  $\epsilon_s$  для  $\Delta P = 5$  кПа, а  $\epsilon_{VIII}$  существенно ниже  $\epsilon_s$  для  $\Delta P = 20$  кПа. Таким образом, эффективность (или площадь) поражения выбросами из кратера и сейсмической волной ниже эффективности поражения воздушной ударной волной при сравнимой степени разрушений.

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Тепловое излучение при ударе астероида может быть не менее опасно, чем воздействие ударной волны. Энергия излучения составляет определенную долю  $\gamma$  от энергии астероида, причем  $\gamma$  при ударах астероидов с диаметрами от 20 до 300 м под разными углами может изменяться в диапазоне от ~1 до 20% (Svetsov, Shuvalov, 2018; 2019). При мощных взрывах в атмосфере, сопоставимых по энергии с астероидами с диаметрами ~50 м, опасные значения поверхностной плотности энергии облучения  $E$  начинаются от ~10 Дж/см<sup>2</sup>, когда возникают ожоги кожи. При  $E$  от 40 до 60 Дж/см<sup>2</sup> происходит обугливание древесины, загораются газеты, трава; при  $E \sim 100$  Дж/см<sup>2</sup> загорается одежда из хлопка, черная резина (Glasstone, Dolan, 1977).

При взрывах в атмосфере энергия облучения поверхности пропорциональна излучаемой энергии  $E_r \sim \gamma D^3$  (энергия астероида пропорциональна  $D^3$ ) и в первом приближении обратно пропорциональна квадрату расстояния до облучаемого предмета  $r^2$ . Поэтому, если определить эффективность облучения  $\epsilon_r$  аналогично эффективности ударного воздействия как отношение квадратного корня из площади, где  $E$  превышает заданный уровень, к диаметру астероида, то  $\epsilon_r \sim r/D \sim (E_r/E)^{1/2}/D \sim (\gamma/E)^{1/2}D^{1/2}$ .

В действительности не только доля излучаемой энергии зависит от  $D$ , но также и опасная энергия облучения  $E$ . Чем больше энергия взры-



**Рис. 2.** Эффективности теплового воздействия в зависимости от диаметра астероида, входящего в атмосферу со скоростью 20 км/с под углом  $\alpha$  к поверхности Земли. Более толстые линии соответствуют воздействию, когда загорается сухая древесина, более тонкие — когда поджигаются легко воспламеняющиеся материалы. Эффективности получены на основании результатов работ (Svetsov, Shuvalov, 2018; 2019).

ва, тем больше величина поверхностной плотности энергии облучения  $E$ , необходимая для достижения определенного теплового эффекта, например, для воспламенения того или иного материала (Glasstone, Dolan, 1977), поскольку с ростом энергии взрыва или диаметра астероида растет длительность теплового импульса. Но экспериментальных данных по  $E$  для энергий взрыва больше 20 Мт нет.

В работах (Svetsov, Shuvalov, 2018; 2019) путем математического моделирования падений тел и на основании теоретических оценок  $E$  были определены площади, где поджигаются наиболее легко воспламеняемые предметы (например, сухие листья, трава и сухая пористая лесная подстилка) и воспламеняется сухая древесина. Используя эти площади, можно определить эффективность теплового воздействия для достижения соответствующих эффектов. Эти эффективности приведены на рис. 2.

Для углов входа  $\alpha = 90^\circ$  и  $45^\circ$  и  $D > 100$  м эффективность теплового воздействия с поджиганием сухих листьев изменяется от 900 до 1300, что примерно соответствует эффективности ударного

воздействия для  $\Delta P = 5$  кПа от 1000 до 1400, когда происходят значительные, но не катастрофические разрушения. Эффективность теплового воздействия с поджиганием сухой древесины изменяется от 600 до 800, что несколько выше эффективности ударного воздействия для  $\Delta P = 20$  кПа от 400 до 550, когда рушатся кирпичные стены и происходит вывал деревьев. Таким образом, тепловое и ударное воздействие при этих  $\alpha$  подвергаются значительной опасности примерно одинаковой площади.

При уменьшении диаметров астероида ниже 100 м эффективность теплового воздействия падает, в отличие от ударного воздействия, которое усиливается. Для косых ударов  $\alpha = 15^\circ$  наивысшая эффективность теплового воздействия достигается при  $D \sim 100$  м, в то время как эффективность ударного воздействия наиболее высокая при  $D = 300-500$  м.

#### ПАДЕНИЕ ОСКОЛКОВ АСТЕРОИДА

Если астероид разрушен недалеко от Земли (от 2500 км (Hupp и др., 2015) до  $\sim 0.01$  а. е. (Kaplinger

и др., 2012; Syal и др., 2013)), то фрагменты могут разойтись на различные расстояния. Они могут войти в атмосферу как один объект, состоящий из осколков, летящих на небольшом расстоянии друг от друга. При большем интервале времени от разрушения до удара фрагменты могут войти в атмосферу независимо друг от друга, но под одним углом. А при еще большем времени фрагменты могут быть рассеяны по большой площади и войти в атмосферу в разных местах под разными углами.

Рассмотрим случай, когда осколки входят под одним углом. Суммарная область поражения всеми фрагментами составляет

$$S_f = \sum_{i=0}^n S_i = \sum_{i=0}^n (\epsilon_i D_i)^2 = S \sum_{i=0}^n (\epsilon_i D_i / \epsilon_s D)^2, \quad (1)$$

где суммирование ведется по всем фрагментам,  $S_i$  – площадь поражения  $i$ -м фрагментом,  $\epsilon_i$  – эффективность ударного воздействия и  $D_i$  – диаметр  $i$ -го фрагмента,  $\epsilon_s$  – эффективность и  $S$  – площадь поражения при ударе целого астероида. Пусть фрагменты имеют одинаковый размер  $D_i$  и их число равно  $n$ . Тогда  $S_f = n S_i = n (\epsilon_i D_i)^2$ . Поскольку  $D_i = D/n^{1/3}$ , где  $D$  – диаметр астероида, то  $S_f = (\epsilon_i / \epsilon_s)^2 S n^{1/3}$ .

Допустим, что астероид диаметром 500 м, входящий под углом  $\alpha = 45^\circ$  ( $\epsilon_s = 1150$ ,  $S = 330 \times 10^3$  км<sup>2</sup> при  $\Delta P > 5$  кПа), разрушен на 1000 одинаковых фрагментов размером 50 м ( $\epsilon_i = 1400$ ,  $S_i = 4.9 \times 10^3$  км<sup>2</sup>). Тогда при ударе фрагментов суммарная площадь поражения увеличится в 15 раз по сравнению с ударом целого астероида и составит  $5 \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Область более сильного поражения с  $\Delta P > 20$  кПа увеличится в 11 раз. Аналогично и при вертикальном входе под углом  $\alpha = 90^\circ$  области поражения ударной волной увеличатся в 19 и 21 раз для  $\Delta P > 5$  кПа и  $\Delta P > 20$  кПа соответственно. Увеличение зоны поражения за счет относительно небольших фрагментов столь значительно, что если пятидесятиметровых фрагментов не 1000, а 50–100 (и они составляют 5–10% от массы астероида), то все равно произойдет некоторое увеличение площади поражения. Это касается и случая, когда после разрушения 90–95% массы астероида уходит со столкновительных орбит с Землей, но оставшиеся 5–10% состоят из фрагментов с размерами 50 м или больше, – при ударах по суше суммарная площадь поражения не уменьшится.

При ударе астероида диаметром  $D = 50$  м под острым углом  $\alpha = 15^\circ$  избыточное давление  $\Delta P$  не достигает величины 20 кПа. Эффективность поражения с избыточным давлением  $\Delta P > 5$  кПа также значительно меньше, чем при  $D = 500$  м, но суммарная площадь поражения фрагментами

размером 50 м в 3.5 раза больше, чем при ударе тела 500 м за счет большого числа фрагментов.

Если астероид диаметром 300 м разрушен на осколки размером 50 м численностью 216, то также происходит увеличение площади поражения в 5.5–7 раз при  $\alpha = 45^\circ$ , в 9.5–10 раз при  $\alpha = 90^\circ$  и в 1.7 раза при  $\alpha = 15^\circ$  и  $\Delta P > 5$  кПа. Увеличение площади поражения в 1.5–2 раза происходит и при дроблении стометрового астероида на фрагменты с размерами 50 м. Уменьшения площади поражения при дроблении астероида на одинаковые фрагменты можно добиться в большинстве случаев, если размеры фрагментов будут меньше 30 м. Но в отдельных случаях и при дроблении на осколки с размерами 20 м происходит увеличение площади, если взять предельное значение  $\Delta P$  меньше или равным 5 кПа. Так при дроблении вертикально падающего астероида с диаметром 300 м на ~3000 осколков с размерами 20 м площадь поражения с избыточным давлением  $\Delta P > 5$  кПа увеличивается в 5 раз.

Если астероид раздроблен на фрагменты разного размера, что более вероятно, чем дробление на одинаковые осколки, то для уменьшения суммарного ударного воздействия массовая доля относительно безопасных осколков с размерами меньше 20–30 м должна быть большой. Предположим, что распределение осколков по размерам подчиняется степенному закону, и запишем кумулятивный закон распределения в виде (Sanchez и др., 2008)

$$N(>m) = (m_{\max}/m)^b = (d_{\max}/d)^{3b}, \quad (2)$$

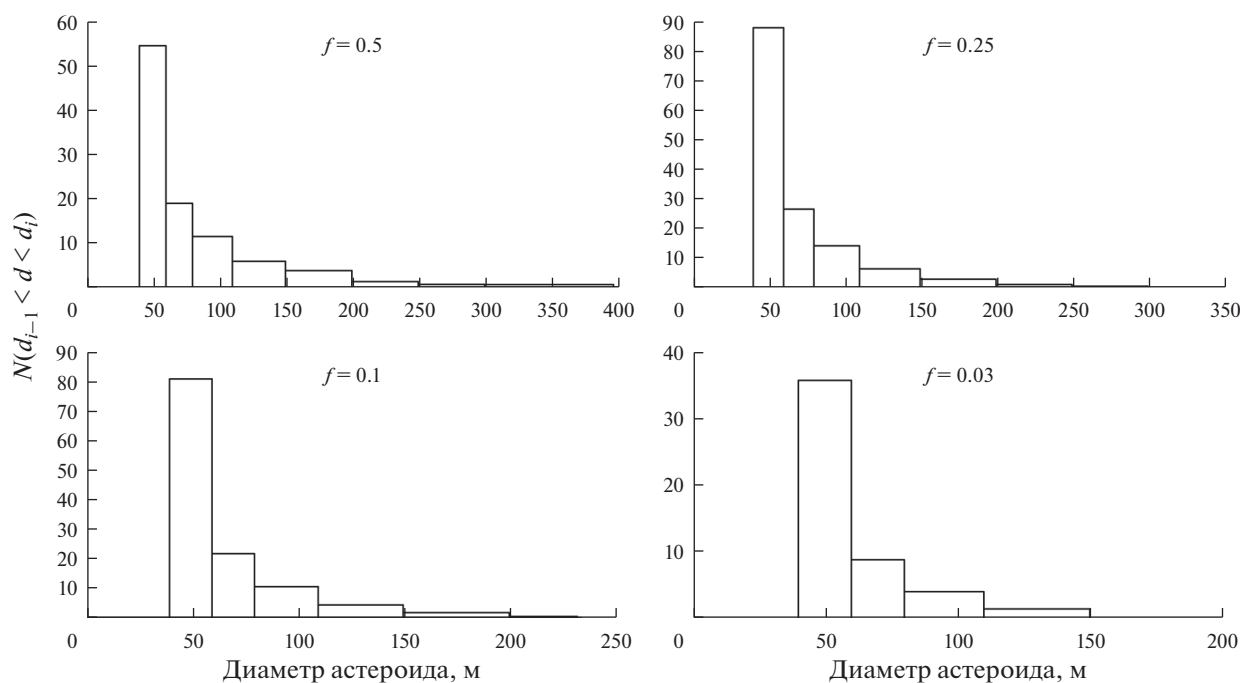
$$b = 1/(1+f),$$

$$f = m_{\max}/M = (d_{\max}/D)^3,$$

где  $m_{\max}$  – масса самого большого фрагмента,  $d_{\max}$  – его диаметр,  $f$  – фрагментационное отношение, а  $M$  – масса астероида. Число фрагментов в интервале диаметров от  $d_1$  до  $d_2$  равно

$$N(d_1 < d < d_2) = (d_{\max}/d_1)^{3b} - (d_{\max}/d_2)^{3b}. \quad (3)$$

На рис. 3 показаны числа фрагментов в выделенных интервалах при разрушении астероида диаметром 500 м при различных  $f$ . Зная эффективность ударного воздействия в интервалах, можно приближенно вычислить суммарную площадь воздействия  $S_f$ . Для области  $\Delta P > 20$  кПа она оказывается в 4 раза больше площади поражения целого астероида  $S$  при  $f = 0.5$  и в 1.1 раза больше при  $f = 0.03$ . Лишь при  $f = 0.02$   $S_f$  становится меньше  $S$ . При разрушении астероида с диаметром 300 м область поражения становится меньше  $S$  при  $f = 0.06$ . Такие же критические значения  $f$  получаются и для области  $\Delta P > 5$  кПа. Для того, чтобы лишь ненамного снизить площадь поражения, нужно раздробить астероид до состояния, когда размер максимального фрагмента будет 0.3–0.4



**Рис. 3.** Распределение фрагментов по размерам при дроблении астероида с диаметром 500 м по степенному закону для нескольких значений фрагментационного отношения  $f$ : 0.5, 0.25, 0.1 и 0.03. По вертикальной оси отложены количества фрагментов в отмеченных на горизонтальной оси интервалах диаметров фрагментов переменной ширины.

от размера астероида, при этом масса всех фрагментов с диаметрами менее 40 м составляет больше 90% от массы астероида. Таким образом, и при разрушении астероида с распределением размеров фрагментов по степенному закону для уменьшения опасности нужно раздробить его на очень мелкие по сравнению с размером астероида осколки.

Эффективность сейсмического воздействия существенна при диаметрах астероидов больше 100 м. Поэтому область поражения можно снизить при дроблении на более крупные осколки, чем необходимо для уменьшения разрушений ударной волной. Но площадь разрушений ударной волной больше площади сопоставимых разрушений сейсмической волной, и поэтому при оценке опасности в первую очередь следует рассматривать воздействие ударной волны, а не сейсмический эффект. Аналогичный вывод можно сделать и по поводу поражения выбросами из кратера.

Эффективность теплового воздействия при не очень острых углах входа падает при уменьшении диаметра тела до 100 м и меньше. Поэтому площадь поражения по сравнению с ударом целого астероида становится меньше при больших  $f$ . Так для  $\alpha = 45^\circ$  это происходит при  $f < 0.15$  для зоны воспламенения сухих листьев и  $f < 0.18$  — сухой древесины, если  $D = 500$  м. Если  $D = 300$  м, то соответствующее условие  $f < 0.2$ . Но так как при та-

ких  $f$  зона поражения ударной волной велика, то с целью уменьшения угрозы нужно ориентироваться на опасность механического воздействия. К тому же воспламенение зависит от большего числа факторов, таких как климат, погода, влажность.

Если осколки астероида не успевают разойтись на такое расстояние, что их удары можно считать независимыми друг от друга, то необходимо рассмотреть падение роя фрагментов. В некотором приближении можно определить последствия падения тела, равного астероиду по массе, но пониженной плотности. Тела с плотностью  $\rho = 500$  кг/м<sup>3</sup>, массы которых равны массам астероидов с  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup>, имеют размеры в  $6^{1/3}$  раз больше  $D$ . Объем пустот составляет 5/6 (83%) объема роя. Как показывают вычисления площадей поражения, основанные на онлайн-калькуляторе, понижение плотности астероида при фиксированной массе приводит к увеличению эффективности ударного воздействия астероида в 1.4–1.5 раза, если  $D = 500$  и 300 м, и в 1.1–1.3 раза, если  $D = 100$  м. То есть рой фрагментов производит, вероятно, более сильное воздействие.

Если фрагменты расходятся на столь большое расстояние, что входят в атмосферу под разными углами, то и в этом случае необходимо, чтобы астероид был раздроблен на мелкие осколки. Но надо учитывать, что в этом случае часть фрагмен-

тов может упасть в ненаселенную местность или океан, что снизит ущерб.

Если известно, что астероид будет падать в океан, то с точки зрения уменьшения опасности цунами целесообразно раздробить его на фрагменты с размерами менее 100 м, которые будут тормозиться в атмосфере. Они могут создать опасность цунами для прибрежных районов только в случае падения вблизи берега, но в этом случае более серьезная опасность исходит не от цунами, а от воздушной волны (Berger, Goodman, 2018). Считается, что и удары астероидов с размерами менее 250 м вдали от побережья не создают угрозы для людей и инфраструктуры (Morrison, Venkatapathy, 2017). Астероиды с размерами 300–500 м при падении в тысяче километров от берега, когда воздушная ударная волна и тепловое излучение не опасны для объектов на суше, могут генерировать волну цунами, представляющую опасность для побережья (Chesley, Ward, 2006), но при этом предупреждение и эвакуация могут быть менее затратными, чем космическая миссия для отклонения или разрушения астероида (Gisler и др., 2011).

Моделирование образования и распространения цунами методами гидродинамики показывает, что только около 1% энергии астероида переходит в волну цунами (Robertson, Gisler, 2019). В этой работе утверждается, что при ударе астероидов с диаметрами 100–500 м в глубоководную часть океана вдали от шельфа волна существенно затухает и не представляет значительной опасности для всего побережья. Но вследствие сложностей моделирования многое остается неясным, например, насколько велика опасность, когда глубина кратера в воде составляет значительную долю от глубины океана, что важно при ударе тел с размерами ~500 м. Поэтому вопрос о том, насколько большим должен быть астероид, чтобы произвести опасное цунами, пока остается открытым. По-видимому, дробление 500-метрового астероида на фрагменты с размерами менее ~250 м существенно снизит опасность, если эти фрагменты упадут вдалеке от шельфа.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Мы оценили воздействие нескольких опасных факторов при падении на сушу астероидов с плотностью 3000 кг/м<sup>3</sup> и со скоростью 20 км/с. На расстояниях в десятки и сотни километров от места падения тел с диаметрами 150–500 м действие ударной волны, теплового излучения и сейсмических волн приводит к колоссальным разрушениям, что делает необходимым развитие средств уменьшения угрозы. Наибольшую площадь разрушений создает воздушная ударная волна. Дробление опасного астероида очень близко от Земли, когда астероид входит в атмосферу как компакт-

ный рой фрагментов, не снижает ущерба. Если после дробления на более удаленном расстоянии фрагменты входят в атмосферу и воздействуют на объекты Земли независимо друг от друга, то уменьшения ущерба в общем случае можно добиться, если основную массу фрагментов составляют тела с размерами менее ~30 м, которые не представляют катастрофической опасности. В противном случае суммарная площадь поражения лишь увеличивается. Это же касается и дробления астероида на еще более удаленном расстоянии от Земли, когда часть фрагментов все-таки не сходит со столкновительных орбит. Если эти фрагменты крупнее ~30 м и масса этих фрагментов не очень мала, то это не уменьшает опасности.

Изменение скорости астероида, его плотности, пористости и структуры кардинально не затронет выводов, но могут измениться критические значения размеров фрагментов, падение которых не представляет существенной опасности. Реальные ситуации могут быть довольно разнообразны. Астероид может упасть в ненаселенной местности или, наоборот, фрагменты астероида, падение которого прогнозировалось в районе с высокой плотностью населения, могут упасть в необитаемые районы или океан. Эвакуация может быть менее затратной или, наоборот, практически невозможна. С помощью онлайн-калькулятора можно достаточно быстро оценивать последствия падений разрушенных тел в конкретных случаях.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН (рег. № 122032900176-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов В.А., Глазачев Д.О., Емельяненко В.В., Краминцев А.П., Нароенков С.А., Овсяник А.И., 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. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. 272 с.
- Аристова Е.Ю. и 39 соавторов. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. С. 157–172.
- Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Артемьева Н.А., Шувалов В.В., Светцов В.В. Эффекты ударной волны, генерируемой при падении космических тел размером от 20 м до 3 км // Физика Земли. 2021. № 5. С. 133–145.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.
- Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. АН СССР. № 1. 1952. С. 20–110.



- Светцов В.В., Артемьева Н.А., Шувалов В.В.* Сейсмическая эффективность метеорных взрывов // Докл. Акад. наук. 2017. Т. 475. № 5. С. 576–579.
- Хазин В.М., Шувалов В.В., Светцов В.В.* Сейсмическая эффективность ударов космических тел // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 6. С. 566–576. (*Khazins V.M., Shuvalov V.V., Svetsov V.V.* The seismic efficiency of space body impacts // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 6. P. 547–556.)
- Artemieva N., Shuvalov V.* Atmospheric shock waves after impacts of cosmic bodies up to 1000 m in diameter // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 3. P. 592–608.
- Berger M., Goodman J.* Airburst-generated tsunami // *Pure and Appl. Geophysics.* 2018. V. 175. P. 1525–1543.
- Brown P.G. and 32 co-authors.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature.* 2013. V. 503. P. 238–241.
- Chesley S.R., Ward S.N.* A quantitative assessment of the human and economic hazard from impact-generated tsunami // *Natural Hazards.* 2006. V. 38. P. 355–374.
- Gisler G., Weaver R., Gittings M.* Calculations of asteroid impact into deep and shallow water // *Pure and Appl. Geophysics.* 2011. V. 168. P. 1187–1198.
- Glasstone S., Dolan P.J.* The effects of nuclear weapons. Washington, DC: U.S. Dep. Defense, Dep. Energy, 1977. 653 p.
- Horan L.S. IV, Holland D.E., Syal M.B., Bevins J.E., Wasem J.V.* Impact of neutron energy on asteroid deflection performance // *Acta Astronautica.* 2021. V. 183. P. 29–42.
- Hupp R., DeWald S., Wie B., Barbee B.W.* Suborbital intercept and fragmentation of an asteroid with very short warning time scenario // 4th IAA Planetary Defense Conf. 2015. IAA-PDC-15-03-09.
- Hussein A., Rozenheck O., Utrilla C.M.E.* From detection to deflection: Mitigation techniques for hidden global threats of natural space objects with short warning time // *Acta Astronautica.* 2016. V. 126. P. 488–496.
- Kaplinger B., Wie B., Dearborn D.* Earth-impact modeling and analysis of a near-Earth object fragmented and dispersed by nuclear subsurface explosions // *J. Astronautical Sci.* 2012. V. 59. P. 103–121.
- Kartashova A.P., Popova O.P., Glazachev D.O., Jenniskens P., Emel'yanenko V.V., Podobnaya E.D., Skripnik A.Ya.* Study of injuries from the Chelyabinsk airburst event // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 160. P. 107–114.
- King P.K., Syal M.B., Dearborn D.S.P., Managan R., Owen J.M., Raskin C.* Late-time small body disruptions for planetary defense // *Acta Astronautica.* 2021. V. 188. P. 367–386.
- Lubin P.* PI – Terminal planetary defense // Eprint arXiv:2110.07559. 2021. <https://arxiv.org/abs/2110.07559>.
- Mannan S., Lees F.P.* Lee's loss prevention in the process industries. V. 1: Hazard identification, assessment, and control. Amsterdam: Elsevier, 2005. id. 8 (79 p.)
- Morrison D., Venkatapathy E.* Asteroid generated tsunami: Summary of NASA/NOAA workshop. 2017. NASA/Technical Memorandum (NASA/TM-219463).
- Morrison D.* Overview of active planetary defense methods: Global collaboration for defending Earth from asteroids and comets // *Planetary Defense, Space and Society.* Springer Nature Switzerland, 2019. P. 113–121.
- Perna D., Barucci M.A., Fulchignoni M.* The near-Earth objects and their potential threat to our planet // *Astron. and Astrophys. Rev.* 2013. V. 21. id. 65 (28 p.).
- Popova O.P. and 59 co-authors.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science.* 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Robertson D.K., Gisler G.R.* Near and far-field hazards of asteroid impacts in oceans // *Acta Astronautica.* 2019. V. 156. P. 262–277.
- Sanchez J.P., Vasile M., Radice G.* On the consequences of a fragmentation due to a NEO mitigation strategy // 59th Int. Astronautical Congress IAC 2008. IAC-08-C1.3.10.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Thermal radiation and luminous efficiency of superbolides // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2018. V. 503. P. 10–16.
- Svetsov V.V., Shuvalov V.V.* Thermal radiation from impact plumes // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2019. V. 54. № 1. P. 126–141.
- Syal M.B., Dearborn D.S.P., Schultz P.H.* Limits on the use of nuclear explosives for asteroid deflection // *Acta Astronautica.* 2013. V. 90. P. 103–111.