

УДК 523.6

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН ЦУНАМИ ПРИ ПАДЕНИИ ДЕСЯТИКИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ В ОКЕАН

© 2022 г. В. В. Шувалов*

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

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

Поступила в редакцию 19.08.2021 г.

После доработки 19.12.2021 г.

Принята к публикации 13.01.2022 г.

Приведены результаты численного моделирования генерации и начальной стадии распространения волн цунами при падениях астероидов с размерами порядка 10 км в океан глубиной от 1 до 6 км. В расчетах получены амплитуды и длины волн на расстоянии 2000 км от точки удара. Приведены приближенные формулы, которые позволяют оценить амплитуды и длины волн с точностью 10–20%. Подтверждается вывод о том, что при падении астероида с размером порядка десяти километров в океан генерируются длинные волны цунами, аналогичные тем, которые возникают при землетрясениях.

Ключевые слова: астероидная опасность, численное моделирование, кратеры, волны цунами

DOI: 10.31857/S0320930X22030069

ВВЕДЕНИЕ

Более двух третей поверхности Земли покрыто морями и океанами. Поэтому большая часть космических тел, сталкивающихся с Землей, падает в воду. Основное отличие таких ударов от ударов по твердой поверхности состоит в том, что в атмосферу выбрасывается большая масса воды с содержащимися в ней солями и генерируются волны цунами, которые могут распространяться на расстояния в тысячи километров.

Выброс воды в атмосферу связан с возможным влиянием на эволюцию биосферы Земли и обсуждался, например, в недавних работах (Koeberl, Ivanov, 2019; Шувалов, 2021). В этих работах было показано, что при падении в океан десятикилометровых астероидов в атмосферу выбрасывается более 10^{16} кг воды. Через 30 мин облако водяных паров, перемешанных с воздухом, достигает размеров в тысячи километров. Масса воды в нем составляет около 10^{15} кг, масса содержащихся в океанской воде солей — около 3.5×10^{13} кг, в том числе около 2×10^{13} кг хлора и 10^{12} кг серы. Такие выбросы воды и содержащихся в ней солей могут сильно повлиять на химические реакции в атмосфере, на поглощение падающего солнечного излучения и на глобальную циркуляцию атмосферы. Все это может заметно повлиять на условия жизни на поверхности Земли и даже привести к массовым вымираниям (Тооп и др., 1997).

Генерация волн цунами, вызванных падением космических тел, и возможные катастрофические последствия их распространения обсуждаются, начиная с 90-х годов прошлого столетия. В работах (Hills и др., 1994; Ward, Asphaug, 2000) предполагалось, что даже волны, вызванные падением небольших (сотни метров в диаметре) астероидов, распространяются на большие (тысячи километров) расстояния и могут вызвать разрушения в прибрежной зоне. Однако чуть позднее в работе (Melosh, 2013) на основании взрывных экспериментов (Van Dorn и др., 1968) была высказана идея, что даже волны, вызванные падением километровых ударников, могут разрушаться и терять энергию в шельфовой зоне. Окончательной ясности в этом вопросе нет до сих пор.

Задачу об ударных цунами можно условно разделить на три стадии: образование волны, распространение на большие расстояния и выход на берег. Эти три стадии, как правило, изучаются отдельно и независимо друг от друга. Для рассмотрения первой стадии численно решается полная система гидродинамических уравнений, описывающая образование водяного кратера, кратера в грунте, выброс вещества из кратеров и падение под действием силы тяжести, схлопывание кратеров и генерацию волн (см., например, Crawford, Mader, 1998; Шувалов, Трубецкая, 2002; Weiss и др., 2006). Для рассмотрения второй стадии, как правило, используют модельные начальные данные, решают волновые уравнения, уравнения

мелкой воды или уравнения Буссинеска, используют реальные профили дна океана (см., например, Ward, Asphaug, 2000; Korycansky, Lynett, 2005). Для описания выхода волны на берег и ее обрушения используются, в основном, модификации тех же методов, что используются для описания распространения волны (см., например, Aditia, Pudjarasetya, 2020), хотя для детального описания этого процесса желательнее решение полной системы уравнений гидродинамики.

В данной работе будет рассматриваться первая стадия и, частично, вторая. На формирование волны цунами при падении космического тела в океан влияют три основных фактора: распространение в воде ударной волны, образующейся при контакте ударника с водой, движение грунта в процессе кратерообразующего течения и падение в воду вещества, выброшенного из кратера. Степень важности каждого из этих факторов определяется соотношением между размером ударника D и глубиной океана H . Если $D/H < 10$, то ударник полностью тормозится и разрушается в слое воды и подводный кратер в грунте не образуется (Artemieva, Shuvalov, 2002). В этом случае распространение ударной волны генерирует в воде кратерообразующее течение, образуется временный водяной кратер. Движущийся вал этого кратера образует первую волну (rim wave, RW), распространяющуюся от точки удара. Схлопывание водяного кратера и последующие колебания генерируют последующие волны (collapse waves, CW). При $D/H < 10$ RW быстро затухают, и на большие расстояния уходят только CW (Wünnemann и др., 2007). Длина волны CW определяется размером водяного кратера, при этом она сравнима или меньше глубины океана. При $D/H > 0.5$ наличие слоя воды слабо влияет на кратерообразующее течение в грунте, а волна цунами (аналог RW) образуется за счет выталкивания воды валом растущего кратера в грунте и падения в воду выброшенного из кратера вещества (Shuvalov, Dyrvik, 2004; Wünnemann и др., 2007). Длина волны цунами в этом случае больше глубины водоема (мелкая вода), и она распространяется на большие расстояния в виде уединенной волны (Wünnemann и др., 2007).

В работе (Wünnemann и др., 2010) указывалось, что и CW и RW по своим характеристикам отличаются от классических волн цунами, возникающих при сильных подводных землетрясениях, что проявляется, в частности, в их более быстром затухании. Однако в (Wünnemann и др., 2010), как и в других работах, где изучалось затухание волн в океане, вызванных ударами космических тел (см., например, Robertson, Gislér, 2019), рассматривались только удары сферических астероидов, диаметры которых были меньше глубины океана. При падении очень больших тел, аналогичных тому, падение которого привело к образованию кратера Чиксулуб 65 млн лет назад, образуется

кратер размером порядка 100 км, и можно ожидать, что возникнут волны цунами, похожие на те, которые возникают при землетрясениях. В этом случае размер ударника оказывается в несколько раз больше глубины океана. Целью данной работы является численное моделирование образования и начальной стадии распространения (первые тысячи километров) волн цунами, образующихся при падениях астероидов с размерами порядка 10 км в океан с разной глубиной.

В первой части статьи описывается постановка задачи и методы, используемые при ее решении; во второй — результаты расчетов генерации и распространения волн цунами при вертикальном падении сферических астероидов с диаметрами от 5 до 20 км в океан с глубиной от 1 до 6 км, приводятся приближенные формулы для оценки амплитуды и длины волн на расстоянии 2000 км от точки падения; в третьей части приведены основные выводы, обсуждаются использованные приближения и оставшиеся невыясненными вопросы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для расчета кратерообразующего течения при падении астероида в океан, образования и распространения волн цунами использовался программный комплекс COBA (Shuvalov, 1999), который неоднократно применялся для моделирования ударных явлений, в том числе падений астероидов в море (см., например, Shuvalov, Dyrvik, 2004; Шувалов, 2021). Для воды и воздуха решалась полная система уравнений гидродинамики Эйлера, для грунта решалась полная система уравнений Навье—Стокса, чтобы учесть внутреннее трение. В расчетах явно выделялись границы между водой, воздухом и грунтом. Решалась осесимметричная двумерная задача.

Для описания термодинамических свойств воздуха использовалось табличное уравнение состояния (Кузнецов, 1965). Для воды использовалось уравнение состояния Тилотсона (Tillotson, 1962). Ударник и грунт считались состоящими из кварца, для которого использовалось уравнение состояния, полученное по программе ANEOS (Thompson, Lauson, 1972) с начальными данными из (Melosh, 2007). Распределение плотности и давления воздуха по высоте в равновесной атмосфере Земли задавалось согласно модели CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere, <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/atmospheric/cira/cira86/>).

При расчете кратерообразования учитывалась прочность грунта по модели Кулона—Мора и акустическая флюидизация (Wünnemann, Ivanov, 2003).

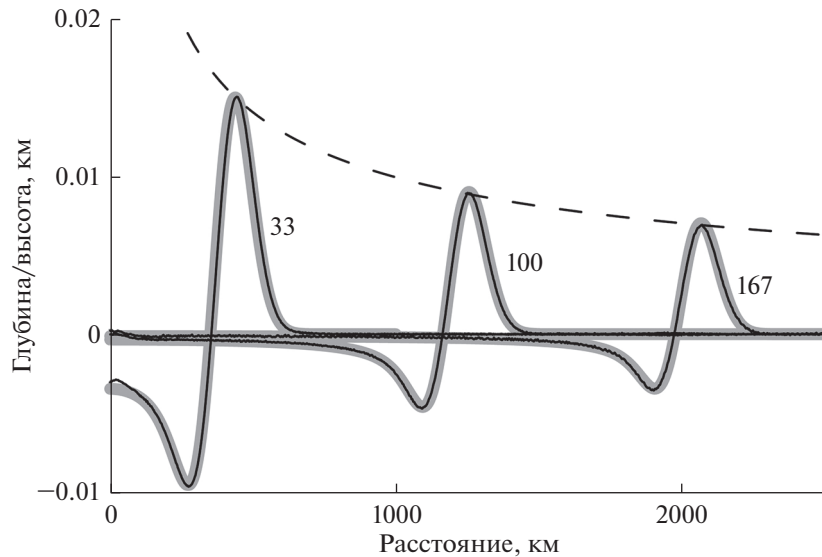


Рис. 1. Профили свободной поверхности океана в разные моменты времени. Сравнение точного решения (2) модельной задачи (толстые серые линии) с результатами численного расчета (тонкие черные линии). Время в секундах указано около каждой кривой. Пунктирная кривая соответствует закону затухания амплитуды волны $\sim 1/\sqrt{r}$.

Целью данной работы было не только моделирование образования волны цунами в результате кратерообразующего течения, но и начальная стадия ее распространения, на расстояния порядка 2–3 тысяч километров. Основная трудность при этом связана с тем, что характерные вертикальный (амплитуда волны) и горизонтальный (расстояние, на которое распространяется волна) масштабы различаются на много порядков. Формально, если амплитуда волны составляет несколько сотен метров, то размер ячейки для ее аккуратного описания должен быть несколько десятков метров. При горизонтальном размере расчетной сетки 3000 км это приводит к нереально большому количеству расчетных ячеек. Однако, если мы рассматриваем очень длинные волны, как в данном случае, когда на поздней стадии течение происходит в условиях, близких к описываемым приближением мелкой воды, то вертикальное смещение поверхности определяется градиентом горизонтальной скорости. В этом случае можно предположить, что вертикальные смещения, т.е. профиль волны, будут описываться правильно независимо от вертикального размера ячейки. Важно правильно описывать градиенты горизонтальной скорости, т.е. размер ячейки должен быть много меньше длины волны, но может быть сравним или даже больше амплитуды волны.

Для проверки этих рассуждений были проведены модельные расчеты по используемой в работе программе задачи, имеющей точное решение. Рассматривалось начальное возмущение поверхности воды $h_0(x, y)$ в виде распределения Гаусса с характерным размером $L = 100$ км, соот-

ветствующим размеру кратера при падении десятикилометрового тела:

$$h_0(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2}{L^2} - \frac{y^2}{L^2}\right). \quad (1)$$

Распространение такого возмущения в приближении мелкой воды описывается формулой Пуассона (Полянин, 2001):

$$h(t, x, y) = \frac{1}{2\pi c} \frac{\partial}{\partial t} \times \iint \frac{h_0(x', y') dx' dy'}{\sqrt{c^2 t^2 - (x' - x)^2 - (y' - y)^2}}, \quad (2)$$

где $c = \sqrt{gh}$ – скорость распространения возмущений.

На рис. 1 показано сравнение аналитического решения, полученного по формуле (2), с результатами численного расчета той же задачи. Глубина океана равна 4 км, размер ячейки в расчетах был равен 0.2 км, в два раза больше, чем начальная высота возмущения $A = 0.1$ км и в 10–20 раз больше, чем амплитуда волны на расстояниях порядка 1000 км. Тем не менее результаты очень хорошо совпадают. Пунктирная кривая на рис. 1 соответствует закону затухания амплитуды волны $\sim 1/\sqrt{x^2 + y^2}$.

Исходя из приведенных выше результатов, начальная стадия задачи (кратерообразующее течение, формирование волны и ранняя нелинейная стадия распространения) на небольших расстояниях и при большой начальной амплитуде волны

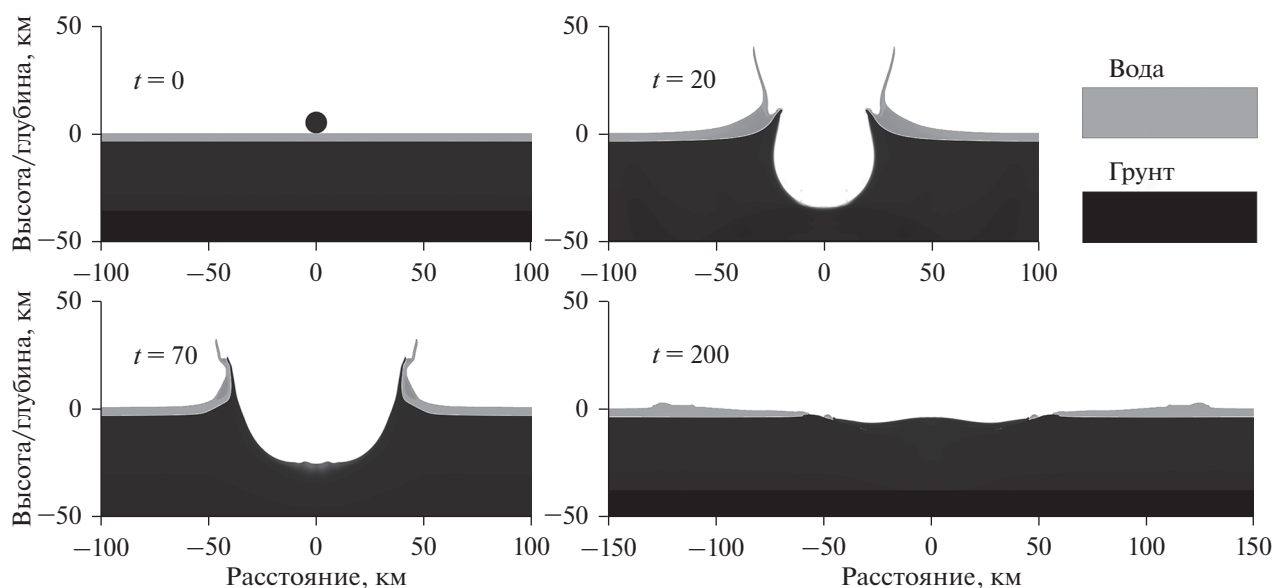


Рис. 2. Формирование волны цунами при вертикальном падении десятикилометрового астероида в океан с глубиной 4 км со скоростью 20 км/с. Время t указано в секундах.

рассматривалась нами на подробной сетке, а распространение волны на расстояниях порядка тысячи километров на более грубой. Разностная сетка состояла из 1000×4000 ячеек (4000 в горизонтальном направлении) с размером 0.1 км. По мере распространения волны размер ячеек удваивался, в конце расчета составлял 0.4 км в вертикальном направлении и 0.8 км в горизонтальном. На ранней нелинейной стадии амплитуда волны была большой, а ячейки маленькие, и разрешение сетки позволяло аккуратно описывать волну. На поздней стадии размер ячейки был даже больше амплитуды волны, но, как показали описанные выше тесты, линейная волна хорошо описывается даже в этом случае. Кроме того, для сокращения времени расчета на поздней стадии число ячеек в вертикальном направлении было уменьшено до 100, так как грунт в это время уже был неподвижен, а движение воздуха на больших высотах в данной задаче не интересно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 показаны результаты расчета вертикального падения десятикилометрового сферического астероида в океан с глубиной 4 км со скоростью 20 км/с в течение первых 200 с. К моменту 20 с образуются промежуточные кратеры в грунте и, чуть большего размера, в воде. Примерно через минуту водяной кратер перестает увеличиваться, кратер в грунте достигает своих максимальных размеров, конус выбросов из грунтового кратера “сгребает” воду, как бульдозер. Через 200 с формируется донный кратер с центральной горкой, который начинает заполняться водой, формируется

волна цунами (RW в терминологии (Wünnemann и др., 2007)).

На рис. 3 показана начальная стадия распространения волн цунами до расстояний около 3000 км после падения десятикилометрового астероида со скоростью 20 км/с в океан с глубиной 2, 4 и 6 км. Во всех случаях на расстояниях до 1000 км волна заметно нелинейна и затухает быстрее, чем следует из теории мелкой воды. Чем больше глубина океана, тем раньше формируется линейная волна (RW – rim wave), затухающая по закону $\sim 1/\sqrt{r}$, где r – расстояние от точки падения. За первой волной идет вторая (CW – collapse wave), образующаяся при отражении от центра потока воды, заполняющего кратер в грунте (аналог схлопывания водяного кратера). В соответствии с выводами работы (Wünnemann и др., 2007), чем больше глубина, тем больше амплитуда CW по отношению к амплитуде RW. Это еще лучше видно на рис. 4, где показаны профили волн цунами для тех же ударов, что и на рис. 3, но в моменты времени, когда пики первой волны (RW) находятся на одинаковом расстоянии 2000 км от эпицентра удара. Амплитуды всех волн (и RW, и CW) заметно увеличиваются с увеличением глубины океана. Это связано с тем, что при большей глубине океана больше энергии выделяется в слое воды, больше воды выбрасывается в атмосферу (и соответственно, падает назад) и конус выбросов из грунтового кратера “сгребает” большую массу воды. При глубине океана $H = 4$ км волна, образующаяся при отражении от центра потока воды, заполняющего кратер (CW), уже сравнима по амплитуде с головной волной. При $H = 6$ км амплитуда RW за-

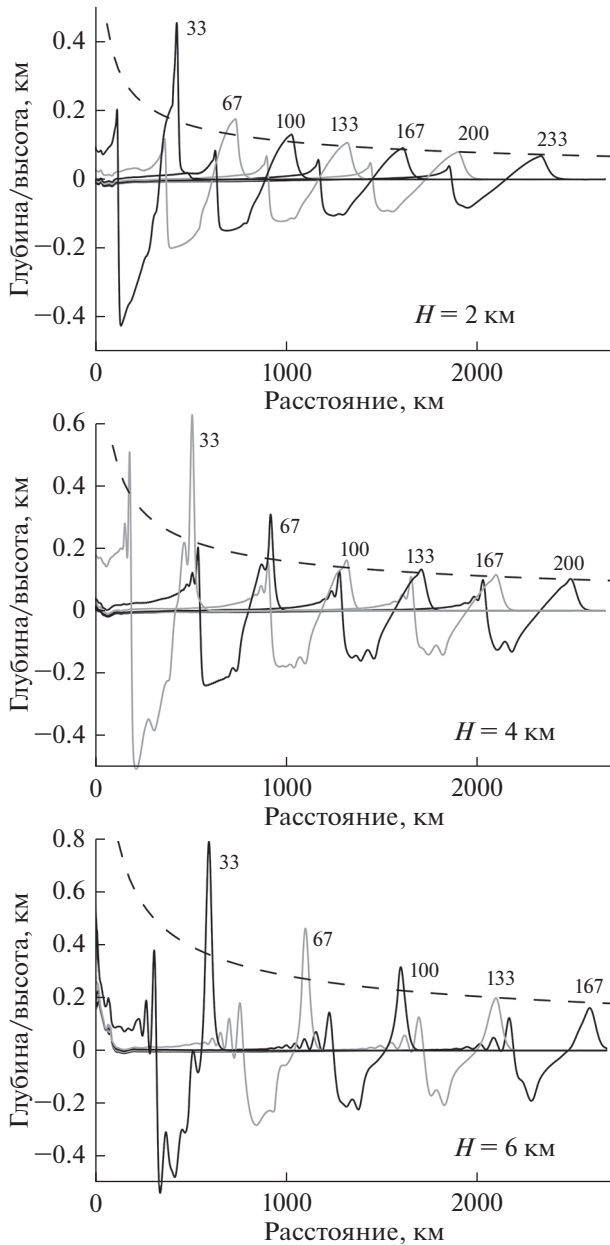


Рис. 3. Профили волны цунами в разные моменты времени при вертикальном падении десятикилометрового астероида со скоростью 20 км/с в океан с глубиной H . Моменты времени в минутах указаны у каждой кривой. Пунктирные кривые соответствуют закону затухания амплитуды волны $\sim 1/\sqrt{r}$. Чтобы различать кривые в местах их пересечения, некоторые нарисованы серым цветом.

метно больше, чем амплитуда CW , но это связано с тем, что на этих расстояниях RW еще очень сильно затухает. На расстоянии 4000 км (этот вариант был рассчитан до больших расстояний, чем другие) амплитуда CW становится больше, а сама волна заметно диспергирует.

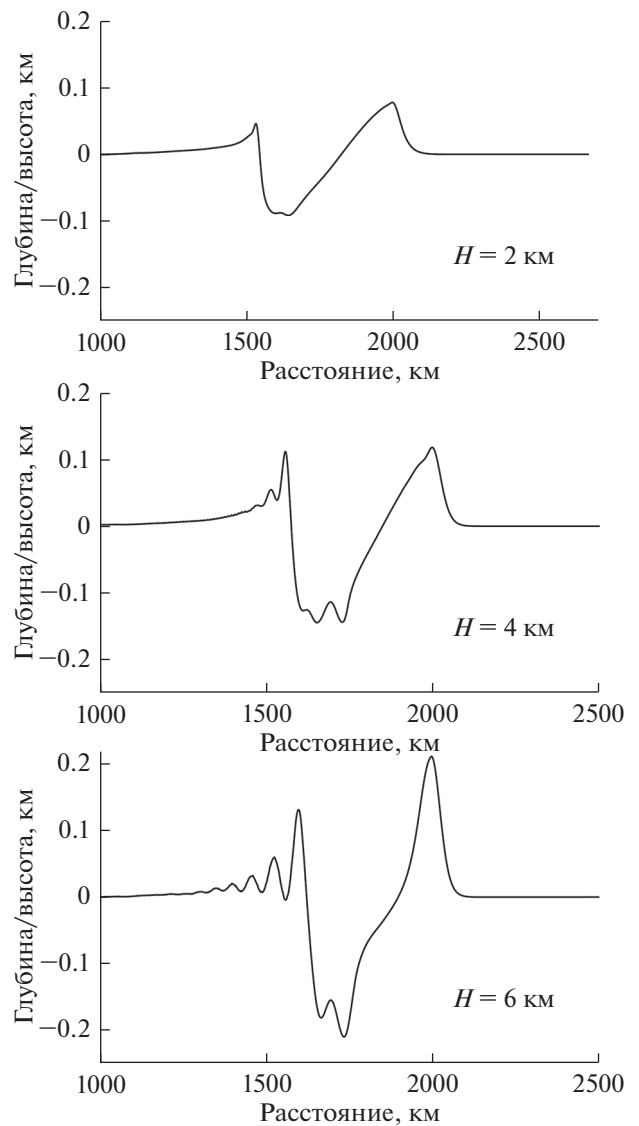


Рис. 4. Профили волны цунами в момент, когда пик RW находится на расстоянии 2000 км от точки удара. Глубина океана H указана на каждом рисунке. Диаметр астероида 10 км, скорость 20 км/с.

Для оценки того, как влияют на амплитуду волн цунами размер ударника и его скорость, были проведены расчеты ударов с разными параметрами. Полный список расчетов и полученных результатов приведен в таблице.

Скорость варьировалась от 12 до 34 км/с, диаметр от 5 до 20 км, энергия от $0.25E_0$ до $8E_0$. Здесь $E_0 = 2.7 \times 10^{20}$ кДж – энергия астероида с диаметром 10 км, падающего со скоростью 20 км/с. В таблице для каждого варианта для момента времени, когда пик первой волны находится на расстоянии 2000 км, приведены амплитуды A_1 и A_m положительной и отрицательной фазы RW , соответствующие длины волн L_1 и L_m , а также ампли-

Таблица 1. Список сосчитанных вариантов

H , км	U , км/с	D , км	E/E_0	A_1 , м	L_1 , км	A_m , м	L_m , км	A_2 , м
1	20	10	1	47 (48)	300 (307)	51 (53)	300 (280)	14 (14)
2	20	10	1	77 (76)	255 (262)	90 (88)	270 (280)	45 (47)
2	12	14	1	87 (91)	270 (285)	92 (98)	285 (285)	50 (48)
2	34	7	1	72 (64)	250 (236)	90 (76)	265 (265)	46 (40)
2	20	5	0.25	30 (39)	180 (159)	43 (49)	200 (212)	22 (25)
3	20	10	1	100 (104)	237 (233)	120 (112)	260 (280)	83 (72)
4	20	10	1	125 (132)	220 (210)	140 (141)	260 (280)	110 (93)
4	30	10	2.25	153 (162)	260 (247)	170 (166)	320 (329)	130 (109)
4	12	10	0.36	90 (108)	190 (171)	130 (115)	220 (228)	80 (76)
4	20	7	0.343	75 (87)	180 (146)	105 (88)	190 (226)	65 (59)
4	20	14	2.74	170 (196)	280 (289)	180 (186)	310 (343)	140 (139)
5	20	10	1	160 (160)	210 (192)	150 (147)	270 (280)	110 (112)
6	20	10	1	212 (188)	170 (177)	209 (160)	280 (280)	130 (129)
6	12	14	1	268 (213)	190 (205)	160 (189)	280 (280)	155 (164)
6	34	7	1	178 (166)	160 (145)	150 (133)	260 (280)	140 (121)
6	20	20	8	580 (350)	310 (353)	350 (170)	400 (424)	300 (308)

Примечание: H – глубина океана, U – скорость астероида, D – диаметр астероида, E/E_0 – относительная энергия ударника, A_1 – амплитуда первой волны (RW), L_1 – длина первой волны (положительной фазы), A_m – амплитуда отрицательной фазы первой волны, L_m – длина отрицательной фазы первой волны, A_2 – амплитуда второй волны (CW). В скобках приведены значения, полученные по формулам (3)–(7).

туда CW A_2 . Полученные результаты показывают, что амплитуды волн зависят и от отношения H/D , и от энергии E , и от размера ударника D . Для всех приведенных в таблице величин получены интерполяционные формулы (3)–(7), которые позволяют с точностью 10–20% оценить амплитуды и длины волн в рассматриваемом диапазоне параметров удара. Значения, полученные по этим формулам, приведены в таблице в скобках. Наибольшее расхождение наблюдается в последнем варианте с самыми большими глубиной и размером ударника. Это связано с тем, что в этом случае на расстоянии 2000 км волна еще нелинейна и сильно затухает.

$$A_1 = \left(20 + 280 \frac{H}{D}\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.25} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1.25}, \quad (3)$$

$$L_1 = \left(144 + 116 \frac{H}{D}\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.2}, \quad (4)$$

$$A_m = \left(300 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.3} - 97\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.2} \left(\frac{D}{D_0}\right), \quad (5)$$

$$L_m = 280 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.2}, \quad (6)$$

$$A_2 = \left(252 \left(\frac{H}{D}\right)^{0.5} - 66\right) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{0.2} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1.5}. \quad (7)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты показывают, что при ударах космических тел, размеры которых больше глубины океана, наличие слоя воды слабо влияет на процесс формирования и размеры донного кратера, а волна цунами образуется, главным образом, за счет “сгребания” воды конусом выбросов из кратера в грунте. Такой механизм формирования цунами отличается от классического, при землетрясениях, когда генерация волны связана, в основном, с вертикальными смещениями дна океана, и первая волна часто бывает не горбом, а впадиной. В этом смысле “ударные” цунами больше похожи на волны, образующиеся при обрушении надводных и подводных склонов (Lobkovsky и др., 2021). Еще одна особенность цунами, вызванных падением космических тел, состоит в том, что начальная стадия распространения волны сильно нелинейна. На расстояниях более 1000–3000 км волна цунами становится линейной и в дальнейшем затухает по закону $\sim 1/\sqrt{r}$, где r – расстояние от точки падения, что соответствует теории мелкой воды. На меньших расстояниях волна заметно нелинейна и затухает быстрее. Чем больше глубина океана и размер ударника, тем дольше длится нелинейная стадия. Таким образом, можно сделать вывод, что в рассматриваемых случаях ($D/H > 2$) на расстояниях 1000–3000 км формируются волны цунами длиной более 100 км,

похожие на цунами, генерируемые землетрясениями.

В работе рассматривались только вертикальные удары. Однако, исходя из того, что при ударах по твердой поверхности астероида с диаметром D при углах наклона траектории α более 15° образуются круглые кратеры такого же размера, как при вертикальном падении астероида с диаметром $D (\sin \alpha)^{1/3}$ (Gault, 1974), можно предположить, что такая же зависимость будет выполняться и для волн цунами, генерируемых косыми ударами.

Следует отметить, что на расстояниях в несколько тысяч километров, которые рассматриваются в данной работе, глубина океана может заметно меняться. Если изменение глубины небольшое, то полученные результаты можно использовать как оценку. Случай падения астероида на подводный склон требует дополнительного исследования.

В рассматриваемом случае ($D/H > 1$) механизм генерации волн цунами в большой степени определяется процессом образования донного кратера, поэтому параметры волн цунами могут зависеть от особенностей мишени, ее уравнения состояния, прочности. Для оценки этого влияния были проведены отдельные расчеты, где ударник и грунт состояли не из кварца, а из дунита с уравнением состояния, полученным по программе ANEOS (Thompson, Lauson, 1972) с начальными данными из (Potter и др., 2013), а также выполнены расчеты, в которых коэффициент внутреннего трения варьировался в интервале от 0.2 до 0.7. Отличие результатов не превышало 10–20%, т.е. было примерно таким же, как отличие между приведенными выше результатами и их оценками по формулам (3)–(7).

В работе не рассматривались глубины океана менее 1 км, так как минимальный размер расчетной ячейки составлял 0.1 км. Такие глубины, как правило, наблюдаются недалеко от берега, и в этом случае воздействие воздушной ударной волны на этот берег будет, по-видимому, более разрушительным, чем действие цунами. Вопрос о том, какая волна цунами при этом уходит в открытый океан (как, например, при образовании кратера Чиксулуб), требует отдельного детального исследования.

Автор благодарен Б.А. Иванову и двум другим, анонимным, рецензентам за внимательное прочтение статьи и ценные замечания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1021052706222-8-1.5.4 (FMWN-2022-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965. 463 с.

Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Наука, 2001. 575 с.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Численное моделирование падения астероидов в море // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 5. С. 450–465. (Shuvalov V.V., Trubetskaya I.A. Numerical modeling of marine impacts // Sol. Syst. Res. 2002. V. № 36. P. 417–430.)

Шувалов В.В. Выброс вещества в атмосферу при падении десятикилометровых астероидов в океан // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 2. С. 114–123. (Shuvalov V.V. Release of matter into the atmosphere during the fall of ten-kilometer asteroids into the ocean // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 6. P. 97–105.)

Aditia D., Pudjaprasetya S.R. Numerical simulation of wave runup and overtopping for short and long waves using staggered grid variational Boussinesq // J. Earthquake and Tsunami. 2020. V. 14. № 05. 2040005.

Artemieva N.A., Shuvalov V.V. Shock metamorphism on the ocean floor (numerical simulations) // Deep Sea Research, Part II. 2002. V. 49. P. 959–968.

Crawford D.A., Mader C.L. // Modeling asteroid impact and tsunami // Science Tsunami Hazards. 1998. V. 16. P. 21–30.

Gault D.E. Impact cratering // A Primer in Lunar Geology / Eds Greely R., Schultz P.H. NASA Ames, Moffiett Field. 1974. P. 137–175.

Hills J.G., Nemchinov I.V., Popov S.P., Teterev A.V. Tsunami generation by small asteroid impacts // Hazards From Comets and Asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson: Univ. Arizona Press, 1994. P. 779–789.

Koeberl K., Ivanov B. Asteroid impact effects on snowball Earth // Meteorit. and Planet. Sci. 2019. V. 54. № 10. P. 2273–2285.

Korycansky D.G., Lynett P.J. Offshore breaking of impact tsunami: The Van Dorn effect revisited // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L. 10608.

Lobkovsky Leopold, Mazova Raissa, Remizov Ilya, Baranova Natalia. Local tsunami run-up depending on initial localization of the landslide body at submarine slope // Landslides. 2021. V. 18. P. 897–907.

Melosh H.J. A hydrocode equation of state for SiO₂ // Meteorit. and Planet. Sci. 2007. V. 42. № 12. P. 2079–2098.

Melosh H.J. Impact-generated tsunamis: An overrated hazard // Proc. Lunar and Planet. Sci. Conf. 2013. [CD-ROM], 34.

Potter R.W.K., Kring D.A., Collins G.S., Kiefer W.S., McGovern P.J. Numerical modeling of the formation and structure of the Orientale impact basin // J. Geophys. Res.: Planets. 2013. V. 118. № 5. P. 963–979.

Robertson D.K., Gisler G.R. Near and far-field hazards of asteroid impacts in oceans // Acta Astronautica. 2019. V. 156. P. 262–277.

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

Shuvalov V., Dyppvik H. Ejecta formation and crater development of the Mjolnir impact // Meteorit. and Planet. Sci. 2004. V. 39. No 3. P. 467–479.

- Tillotson J.H.* Metallic equations of state for hypervelocity impact // General Atomic Report GA-3216 (General Atomic, San Diego, CA). 1962.
- Thompson S.L., Lauson H.S.* Improvements in the Chart D radiation-hydrodynamic CODE III: Revised analytic equations of state // Rep. SC-RR-71 0714. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1972. 119 p.
- Toon O.B., Zahnle K., Morrison D., Turco R.P., Covey C.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // Rev. Geophysics. 1997. V. 35. P. 41–78.
- Van Dorn W., LeMehaute B., Li-San H.* Handbook of explosion-generated, water waves // Rep. TC-130. Pasadena, Calif.: Tetra Tech, 1968. 192 p.
- Ward S.N., Asphaug E.* Large waves caused by oceanic impacts of meteorites // Tsunami and Nonlinear Waves / Ed. Kunda A. New York: Springer, 2000. P. 235–260.
- Weiss R., Wünnemann K., Bahlburg H.* Numerical modeling of generation, propagation and run-up of tsunamis caused by oceanic impacts: Model strategy and technical solutions // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 77–88.
- Wünnemann K., Ivanov B.A.* Numerical modeling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustically fluidized target // Planet. and Space Sci. 2003. V. 51. P. 831–845.
- Wünnemann K., Weiss R., Hofmann H.* Characteristics of oceanic impact-induced large water waves – Re-evaluation of the tsunami hazard // Meteorit. and Planet. Sci. 2007. V. 42. P. 1893–1903.
- Wünnemann K., Collins G.S., Weiss R.* Impact of a cosmic body into Earth's ocean and the generation of large tsunami waves: insight from numerical modeling // Rev. Geophysics. 2010. V. 48(4). RG4006. P. 1–26.