

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ АСТЕРОИДА В ОКЕАН И ПОСЛЕДУЮЩЕГО НАКАТА ВОЛНЫ НА БЕРЕГ

А. В. Абрамов^{1,2}, В. П. Елсуков¹, И. В. Минаев^{1,2}, В. А. Симоненко¹, А. С. Углов¹, С. Ю. Филатов^{1,2}

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

²ООО «СТРЕЛА» – открытый вычислительный центр, г. Снежинск Челябинской обл.

В настоящее время общепризнанной является опасность для цивилизации, обусловленная столкновением с Землей астероидов. Отдельного внимания заслуживает рассмотрение падения опасных космических объектов в океан. Прежде всего, вероятность падений в океан примерно вдвое выше. Наличие толстого слоя океанической воды порождает новый по сравнению с ударами по суше поражающий фактор – гигантские цунами. Дополнительным стимулом для таких исследований явилось открытие на дне океана в последние годы ряда относительно молодых «ударных» кратеров (рис. 1).

Пятница, 13 апреля 2029 года. Этот день грозит оказаться роковым для всей планеты Земля. В 4:36 по Гринвичу астероид Апофис (рис. 2) массой

50 млн. тонн и диаметром 320 м пересечет орбиту Луны и ринется к Земле со скоростью 45 000 км/ч. По предварительным прикидкам, место падения Апофиса придется на полосу 50 км шириной, пролегающую через Россию, Тихий океан, Центральную Америку и уходит дальше в Атлантику. Наиболее вероятное место падения – это точка в океане в нескольких тысячах километров от западного побережья Америки. В результате, побережье Флориды может попасть под удар волн. По версии NASA, астероид приблизится к Земле на расстояние 325000 км (ближе, чем Луна) и будет виден невооруженным глазом. Вероятность столкновения с Землей составляет 0,002.

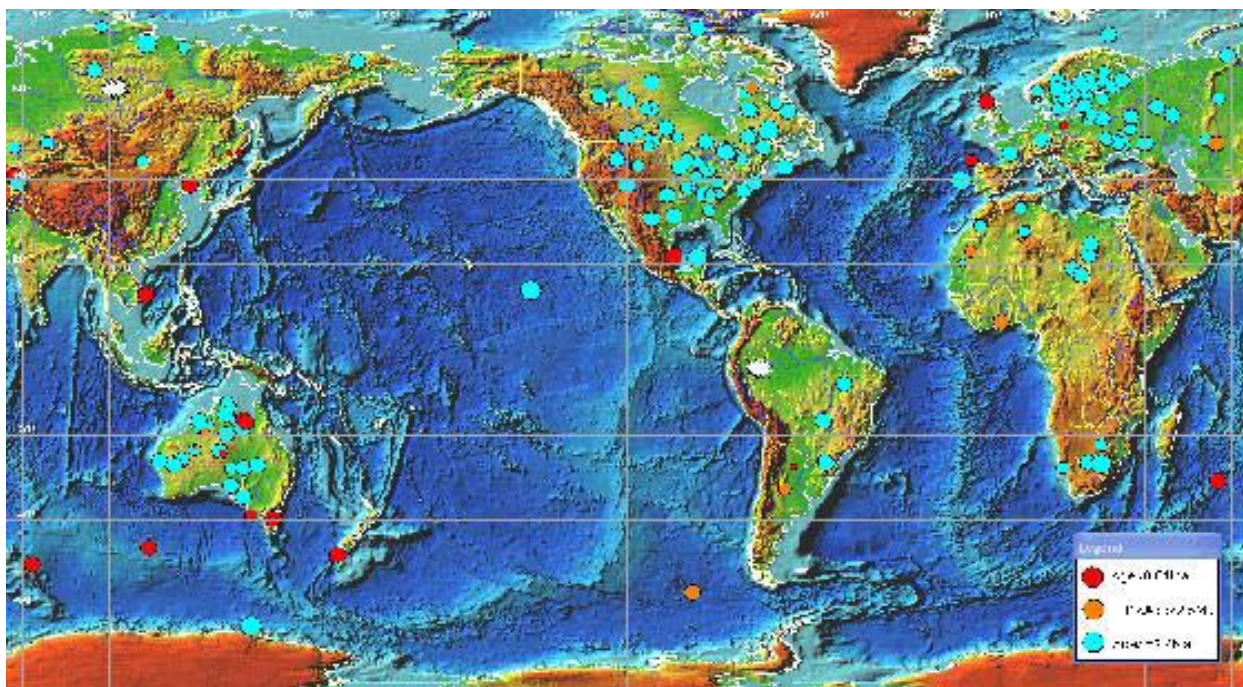


Рис. 1. Карта известных импактных структур

На поверхности суши (180 структур) и на дне морей и океанов (24 структуры). Размер пропорционален диаметру кратера. Цветом показано время образования (возраст в млн. лет) структуры. Белыми звездочками помечены эпицентры Тунгусского (1908г.) и Бразильского (1930 г.) взрывов. 16 из известных морских кратеров были обнаружены в 2005–2006 гг. после начала планомерного целенаправленного поиска подводных импактных структур.



Рис. 2. Астероид Апофис

В настоящее время нет экспериментальной информации о крупномасштабных столкновительных цунами. Поэтому одним из основных инструментов исследований является математическое моделирование. В данной работе рассматривалось падение в океан глубиной 1–6 км каменного астероида диаметром 1 км, сталкивающегося с Землей со скоростью 22 км/с.

Результаты столкновения космических тел с Землей существенно зависят от многих факторов: размера тела, его состава, скорости сближения с Землей и угла входа в атмосферу, от свойств вещества в области падения и т. д.

Движение космического тела в атмосфере сопровождается образованием воздушной ударной волны большой интенсивности. В силу высокой скорости движения тела (15–25 км/с) фронт головной ударной волны в воздухе будет отстоять на незначительном расстоянии от объекта. Поэтому при рассмотрении удара тела о воду, для упрощения расчетной модели присутствием воздуха можно пренебречь.

При столкновении астероида с преградой в ней будут протекать физические процессы: испарение воды, ударное нагружение, плавление и фазовые превращения пород океанического дна, и механическое разрушение дна и астероида. Характерное время динамических процессов в окрестности удара составляет ~ десятки секунд, а характерное время движения волны цунами в океане – несколько тысяч секунд. Рассчитать весь процесс для таких времен с помощью многомерных конечно-разностных или конечно-элементных методик с приемлемой точностью невозможно даже с помощью самых мощных ЭВМ. Поэтому расчет столкновения кос-

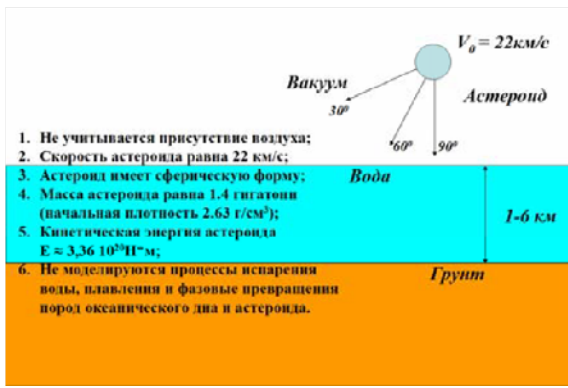
мического тела с преградой, как правило, разбивается на два этапа.

Одна из первых работ в РФ по падению астероида и кометы в океан в двумерной постановке была выполнена в РФЯЦ-ВНИИТФ в 2007 г. [4] в газогидродинамическом приближении с помощью программы МЕЧ – конечно-разностной методики, для угла падения в океан 90 градусов. Используемая программа не позволила просчитать падение космических тел под различными углами, поэтому восполним этот пробел.

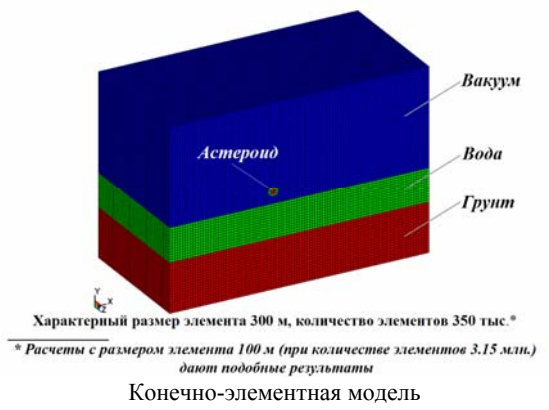
На первом этапе с помощью конечно-элементной программы LS-DYNA [1] на суперкомпьютере СКИФ-УРАЛ Южно-Уральского государственного университета и рабочей станции при поддержке ООО «СТРЕЛА» были рассчитаны процессы взаимодействия космического опасного объекта с преградой.

Взаимодействие вода-астероид моделировалось в МКЭ с применением алгоритма связывания; вода на неподвижной сетке в эйлеровой формулировке, а астероид и грунт – на деформируемой сетке с применением лагранжевой формулировки. Алгоритм связывания позволяет вычислять силы связывания на границе раздела текучей среды с астероидом и грунтом. Данные силы добавляются к текучей среде (эйлеровое пространство) и к узлам астероида и грунта (лагранжевое пространство). Обе задачи решаются с применением явного метода интегрирования по времени, который хорошо подходит для задач импульсного нагружения.

При описании материалов гранита и воды использовались уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена с соответствующими параметрами [2, с. 314–317].



Расчетная схема, принятые допущения



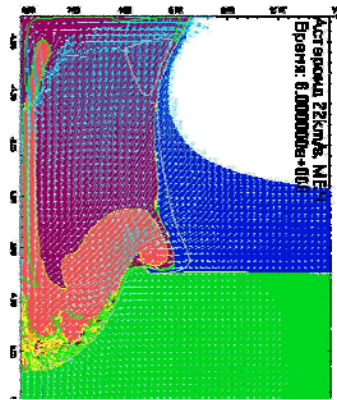
Конечно-элементная модель

Рис. 3. Расчетная схема и конечно-элементная модель

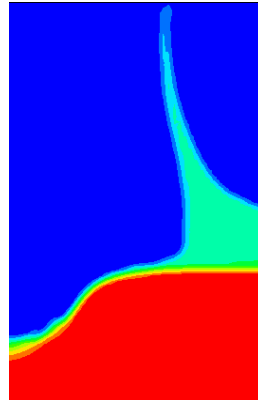
В результате проведенных сопоставлений полученных решений в более общей постановке по программе МЕЧ [4] и использованием программы LS-DYNA на суперкомпьютере СКИФ-УРАЛ, рабочей станции получено удовлетворительное совпадение результатов расчета по высоте волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиусу водяной каверны (рис. 4), что позволяет дальнейшие расчеты проводить по программе LS-DYNA, определяя первоначальные параметры волны столкновительного цунами, с использованием верифици-

рованной конечно-элементной модели. Не моделирование испарения воды, плавление и фазовых превращений пород океанического дна и астероида не привели к существенной погрешности расчета параметров поднятой волны и параметров образовавшегося кратера.

Исследуем правомочность сделанного допущения о возможности не учета в модели воздушных ударных волн. На рис. 5 приведены результаты расчета в программе LS-DYNA с учетом воздуха и без него.

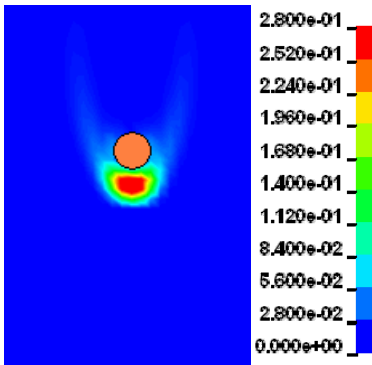


Результаты решения по программе МЕЧ

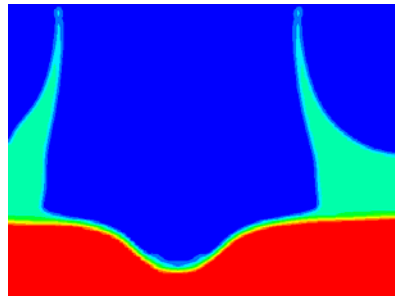


Результаты решения по программе LS-DYNA

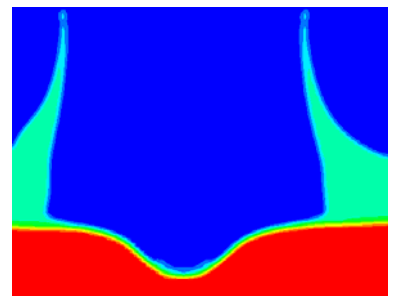
Рис. 4. Результаты верификации созданной расчетной модели



Расположение ударных волн вокруг астероида (ГПа)



Вакуум



Воздух

Рис. 5. Анализ сделанных допущений

Результаты сравнения показывают, что не учет в расчетах атмосферы не приводит к значимой погрешности определения параметров волны и размеров кратера при моделировании падения астероида в океан.

В проводимых расчетах астероид моделируется телом, имеющим сферическую форму диаметром 1 км массой $M \approx 1,4$ гигатонн, с начальной плотностью $\rho = 2,63$ г/см³. Рассмотрим, как влияет задаваемая форма ОКО на параметры волны и размер кратера. Для этого проведем два расчета, когда ОКО массой $M \approx 1,4$ гигатонн представляет собой сферу ($\varnothing = 1$ км), цилиндр ($\varnothing = 0,6$ км, и высотой 1,85 км) или «шайбу» ($\varnothing = 1,6$ км, и высотой 0,26 км) падающими в океан со скоростью 22 км/с вертикально.

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера приводятся в табл. 1 и на рис. 6.

Результаты сравнения показывают, что не учет формы ОКО не приводит к существенной погрешности определения параметров волны и незначительно влияет на размеры кратера и водяной каверны. Это можно объяснить тем, что параметры рассматриваемых процессов в основном зависят от кинетической энергии ОКО, а она в рассматриваемых задачах была не низкой равной $3,36 \cdot 10^{20}$ Н·м.

Продолжим исследования зависимость высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиусу водяной каверны и параметров образовавшегося кратера для разных углов входа астероида в атмосферу Земли. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2 и рис. 7.

Таблица 1

Результаты полученных решений по определению параметров волны и кратера для ОКО в виде сферы, цилиндра и «шайбы»

	Сфера	Цилиндр	«Шайба»
Глубина океана в точке падения астероида, км	4	4	4
Высота волны, м.	9400	9000	9100
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	150	145	180
Диаметр кратера, м	14400	12000	19000
Первичная глубина кратера, м	3300	3900	2100
Диаметр водяной каверны, м	18900	17000	19500

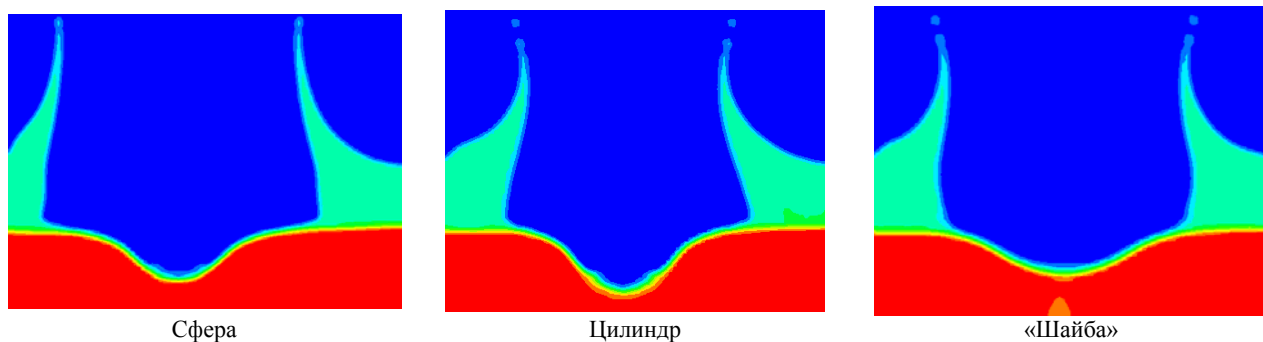


Рис. 6. Изменения параметров волны и размеров кратера для случая падения ОКО

Таблица 2

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера в зависимости от угла входа астероида в атмосферу

Угол падения астероида	30°	45°	60°	90°
Высота волны, м	9200 и 4700	10500 и 6600	9500 и 9200	9400
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	180 и 170	170 и 175	160 и 150	150
Диаметр кратера, м	10500	12300	13000	14400
Первичная глубина кратера, м	1400	2100	2700	3300
Диаметр водяной каверны, м	15000	17400	18600	18900

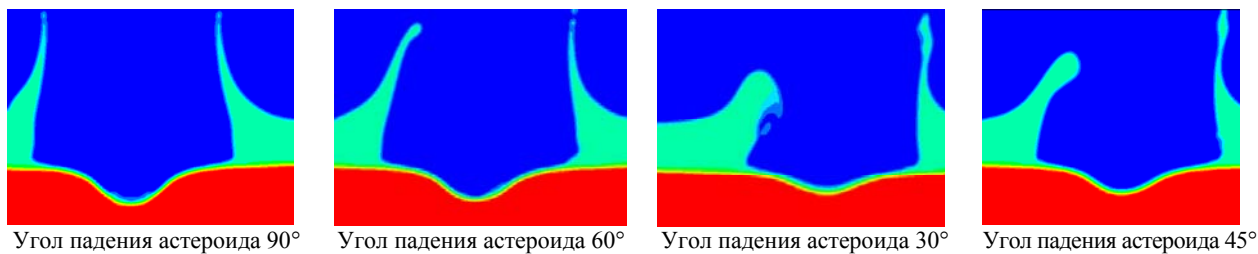


Рис. 7. Изменения параметров волны и размеров кратера в зависимости от угла входа астероида в атмосферу

Анализ расчетных данных показывает, что для углов падения 60° и 90° градусов результаты мало отличаются друг от друга. Даже для угла падения 30° мы не имеем кардинального отличия. Поэтому следует ожидать того, что воздействие на морское побережье столкновительного цунами для рассматриваемых углов соударения, будет практически одинаковым. По этой причине при продолжении исследований было предложено рассматривать только случай осесимметричного внедрения астероида в океан. Первичные параметры образовавшегося кратера с уменьшением угла входа астероида в атмосферу уменьшаются.

Продолжим исследование зависимости высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиуса водяной каверны и параметров образовавшегося кратера от диаметра астероида. Результаты расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 8.

Анализ расчетных данных показывает, что первоначальная высота максимальной волны, горизонтальный компонент скорости ее движения, радиус водяной каверны, первичные параметры образовавшегося кратера с уменьшением диаметра астероида уменьшаются. Астероид диаметром 0,5 км на дне не образует значимого кратера.

Исследуем зависимость высоты волны, горизонтальной компоненте скорости движения волны, радиуса водяной каверны и параметров образовавшегося кратера от глубины океана в точке падения астероида. Результаты расчетов представлены на рис. 9 и в табл. 4.

Анализ расчетных данных показывает, что первоначальная высота максимальной волны, горизонтальный компонент скорости ее движения, радиус водяной каверны сначала возрастают при увеличении глубины океана в точке падения астероида, затем принимают практически одно значение. Первичные параметры образовавшегося кратера с увеличением глубины океана в точке падения астероида уменьшаются.

В результате моделирования в программе LS-DYNA были получены изменения кинетической и внутренней энергии для рассматриваемой задачи падения астероида диаметром в 1 км, в океан глубиной 4 км. Кинетическая энергия астероида равна $3,36 \cdot 10^{20}$ Н·м, а энергия поднятой волны составляет примерно 25 % от энергии астероида – $0,767 \cdot 10^{20}$ Н·м.

Таблица 3

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера для разных диаметров астероида

Диаметр астероида, км	0,5	1	1,5
Высота волны, м	7800	9400	10000
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	100	150	175
Диаметр кратера, м	–	14400	13500
Первичная глубина кратера, м	–	3300	5000
Диаметр водяной каверны, м	9600	18900	18000

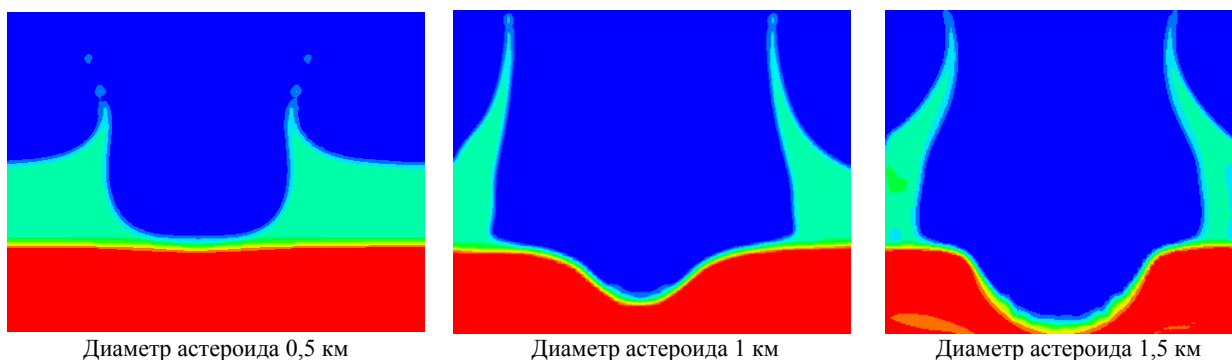
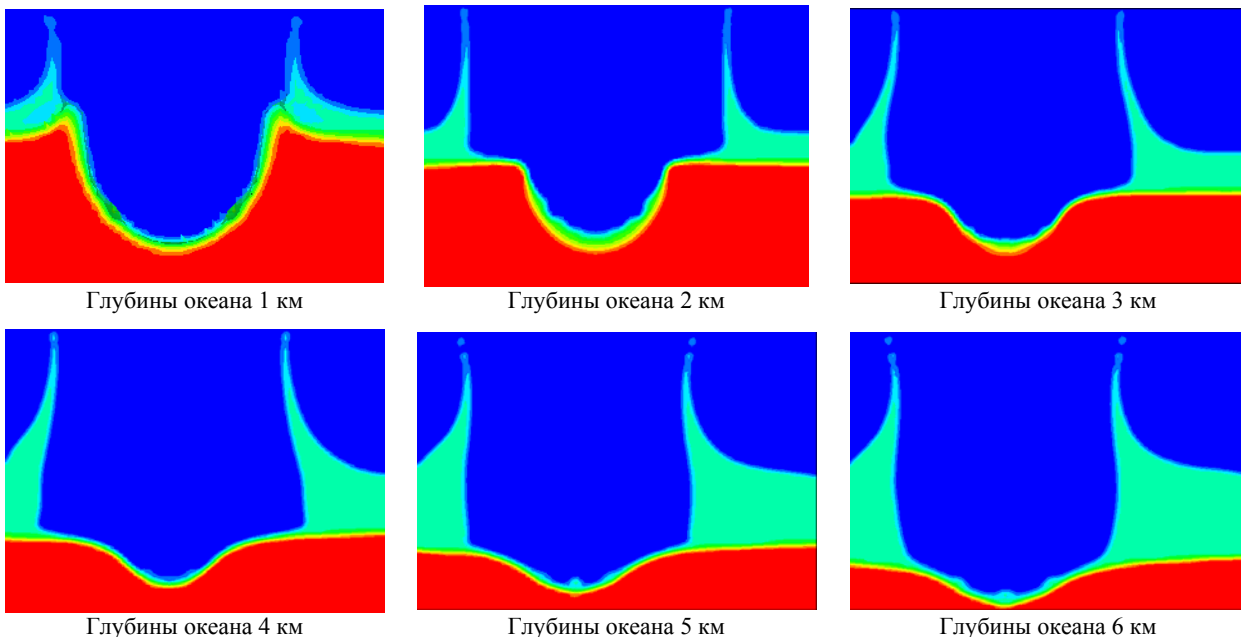


Рис. 8. Изменения параметров волны и размеров кратера для разных диаметров астероида



Глубины океана 1 км

Глубины океана 2 км

Глубины океана 3 км

Глубины океана 4 км

Глубины океана 5 км

Глубины океана 6 км

Рис. 9. Изменения параметров волны и размеров кратера от глубины океана в точке падения астероида

Таблица 4

Результаты полученных решений для параметров волны и кратера для различных глубин океана в точке падения астероида

Глубина океана в точке падения астероида, км	1	2	3	4	5	6
Высота волны, м	3300	6600	7200	9400	9000	8700
Горизонтальный компонент вектора скорости, м/с	220	195	170	150	127	100
Диаметр кратера, м	8400	10200	12300	14400	12900	12700
Первичная глубина кратера, м	6900	4500	3700	3300	3000	2800
Диаметр водяной каверны, м	9000	17700	18400	18900	16800	16700

Анализ расчетных данных показывает, что наибольшие параметры волны получены для случая падения астероида диаметром 1 км в океан глубиной 4 км. Рассмотрим для этого случая параметры образовавшегося цунами.

Волна цунами «чувствует дно» даже в самом глубоком океане; кажется, эта едва заметная последовательность волн представляет движение всего вертикального столба воды (рис. 10).

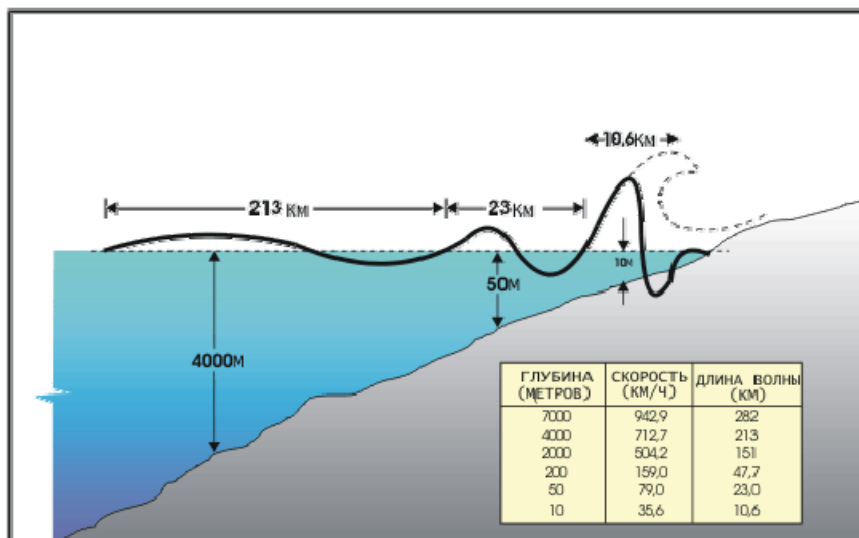


Рис. 10. Трансформация волны цунами

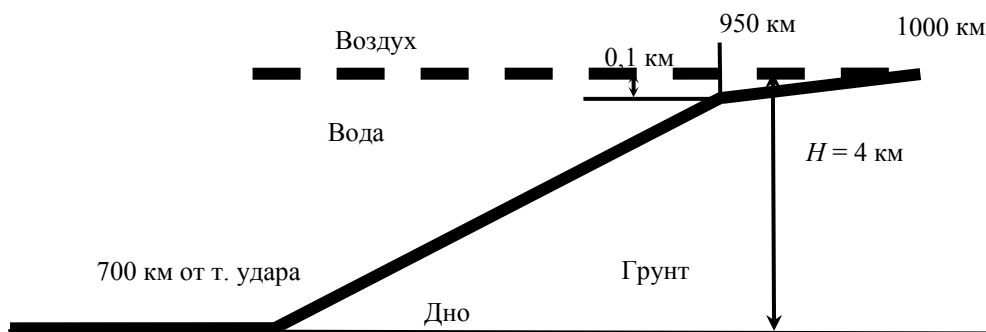


Рис. 11. Рельеф шельфа

Для рассматриваемого нами случая, к концу первого этапа продолжительностью $\sim 30-50$ с в системе «океан-скала» все существенно нелинейные процессы закончились: затухли ударные волны, сформировалась зона кратера, а сам астероид разрушился. На поверхности воды сформировалась волна высотой $\sim 8 \dots 10$ км и диаметром воронки $\sim 15 \dots 20$ км. Плотность воды стала равной $\sim 1,0 \dots 1,1$ г/см³, вектор скорости движения частиц среды в слое воды стал почти горизонтальным и приблизительно постоянно по глубине воды. Разброс величины модуля скорости по глубине не превосходит 15 %.

Известно, что в случае, когда длина волны, распространяющейся по поверхности воды, значительно больше глубины океана, ее распространение можно рассчитывать по теории мелкой воды. Очевидно, что в рассматриваемой задаче данное условие будет выполнено для достаточно больших времен. В рассматриваемом случае на момент времени $t = 35$ с длина поверхностной волны сравнима с глубиной океана. Тем не менее, для оценки распространения поверхностной волны на втором этапе расчетов была использована классическая теория мелкой воды. Принятые параметры шельфа и дна показаны на рис. 11.

Цифрами 700 и 1000 км отмечены расстояния от точки входа астероида в океан до начала шельфа и до береговой линии соответственно.

Для описания цилиндрически расходящейся волны цунами и ее воздействия на побережье с учетом профиля шельфа океана была разработана специальная программа, в которой реализовано приближение мелкой воды [3]. Уравнения теории мелкой воды, описывающие распространение одномерной круговой поверхностной волны, имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial R} = g \frac{\partial \eta}{\partial R}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial R} + \xi \left(\frac{\partial u}{\partial R} + \frac{u}{R} \right) = 0.$$

Здесь R – расстояние от начала координат (точка входа тела в воду), расположенного на невозмущенной поверхности океана; t – время; g – ускорение свободного падения; $u = u(R, t)$ – скорость поверхно-

стной волны; $\eta = \eta(R, t)$ – профиль поверхностной волны; $\xi = h(R) + \eta(R, t)$; $h(R)$ – профиль дна мирового океана.

Уравнения (1) являются уравнениями гиперболического типа и для них можно применять известные конечно-разностные аппроксимации.

Своеобразием рассматриваемой задачи является то, что распространение поверхностной волны осуществляется на очень большие расстояния ~ 1000 км. Время распространения составляет величину порядка нескольких тысяч секунд. Это означает, что при численном решении уравнений приходится делать большое число циклов по времени. Поэтому конечно-разностные уравнения, аппроксимирующие уравнения (1), должны обладать минимальным сглаживающим эффектом.

Были опробованы схемы Мак-Кормака, Лакса-Вендроффа, Неймана. Все они оказались неудовлетворительными. Заслуживающей внимания оказалась конечно-разностная λ – схема Моретти, которая при аппроксимации дифференциальных уравнений использует информацию о характеристиках уравнений (1). Схема Моретти не нуждается в использовании искусственной вязкости, дает монотонные профили, в ней практически нет численной диссипации. Однако прямое использование λ – схемы Моретти давало решения, физически неправдоподобные. Поэтому была выполнена модификация (Н. А. Скоркиным) λ – схемы, которая сохранила все положительные свойства исходной схемы Моретти. С помощью этой модифицированной схемы были решены задачи о распространении поверхностной волны на большие расстояния.

Чем больше время перехода с программы LS-DYNA на расчет по теории мелкой воды (программа SWAT), тем меньше погрешность такой аппроксимации задачи.

В качестве исходных данных для кода SWAT задается профиль волны и воронки в грунте, т. е. распределения высоты волны $\eta(R, t)$ и глубины океана $h(R)$ в зависимости от расстояния R , отсчитываемого от точки падения тела в воду. На поверхности воды задается распределение горизонтального компонента вектора скорости воды $V_R(V_X)$ для $0 < R < 25$ км. Интервал $0 < R < 1\ 000\ 000$ м разбивается на частич-

ные интервалы конечно-разностной сетки. Временной интервал тоже дискретизируется с помощью шага счета Δt , выбираемого из условия устойчивого счета по конечно-разностной схеме. На выбранной сетке дифференциальные уравнения мелкой воды заменяются конечно-разностными. На левой границе задачи при $R = 0$ ставится условие для скорости $V_R = 0$. На правой границе при $R = 1000$ км тоже $V_R = 0$. Задача считается до прихода волны к береговой линии океана.

Для расчета натекания воды на берег уравнения SWAT'a автором программы записаны относительно полной глубины $H(R, t) = h(R) + \eta(R, t)$ в такой форме, что они становятся справедливыми и для расчета наката воды на сушу. Для численного решения этих уравнений используется та же модифицированная схема Моретти.

На рис. 12 показан водяной султан, образовавшийся в результате затекания воды в донный кратер,

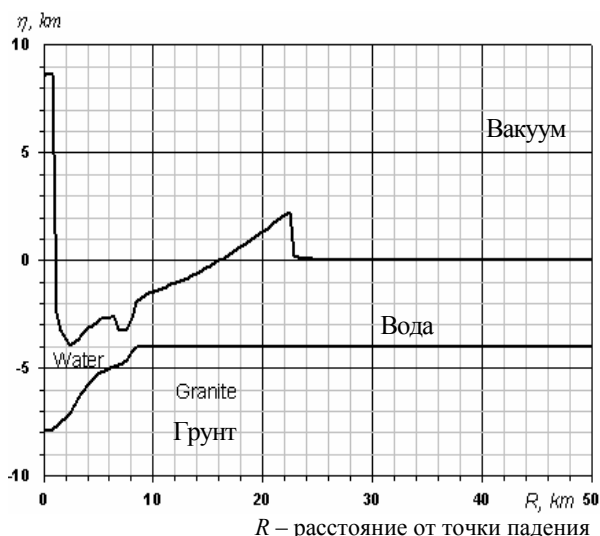


Рис. 12. Водяной султан $\eta(R)$

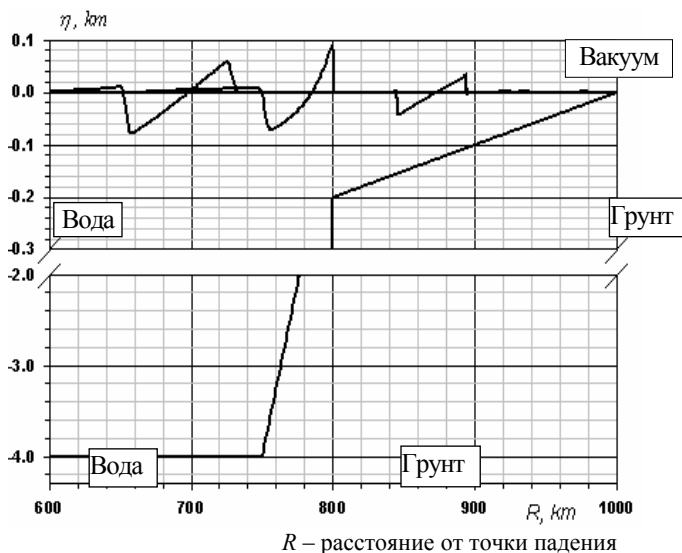


Рис. 13. Выход волны на шельф

на рис. 13 представлено положение цунами на три последовательные моменты времени.

Видно, как на шельфе увеличивается высота волны с 60 м до 100 м. Потом на мелководье происходит уменьшение высоты волны. Это есть ни что иное, как моделирование опрокидывания волны с помощью уравнений теории мелкой воды.

Теперь несколько слов о достоверности проведенных расчетов. В литературе имеются значительные расхождения (2–3 раза) в оценке высоты волны образующейся в результате столкновения астероида с поверхностью океана и высоты волны набегающей на берег.

В работе [5] приведены эмпирические формулы для вычисления высоты удаленной волны, образующейся при подводных ядерных взрывах. В табл. 5 представлены результаты сравнения высоты волны $\eta(R)$, вычислений по теории мелкой воды и по эмпирической формуле для различных значений расстояния R от места падения астероида.

Результаты сравнения высоты волны

R , км	132	850–900
$\eta(R)$, км – по теории мелкой воды	200	30
$\eta(R)$, км – из работы [5]	220	21–27

Видно удовлетворительное согласование сравниваемых величин. Это означает, что использование предложенного в данной работе подхода к оценке параметров цунами, образующегося от падения астероида в океан, приемлемо как для качественного, так и для количественного описания данного физического явления. Модифицированная теория мелкой воды позволила провести расчет наката (заплеска) океанической волны на побережье рис. 14.

Расчеты показали, что для полученных параметров волны цунами, образовавшейся от падения в океан глубиной 4 км астероида диаметром 1 км, способно распространиться на берег, имеющий уклон в 32 гра-

дусов, на расстояние в 1,5 км, поднявшись на высоту до 80 м, что является опасным для населенных пунктов вдоль побережья.

Метод расчета наката волны на берег, протестирован сравнением результатов численных расчетов с аналитическими решениями (рис. 15).

На рис. 15 по данным работы [6] приведено сравнение методики расчета наката столкновительного цунами на океанический берег с аналитическим решением (черным цветом – эволюция волны в направлении берега, имеющего наклон 32°; красным цветом – аналитическое решение [6]). Видно удовлетворительное согласование сравниваемых величин.

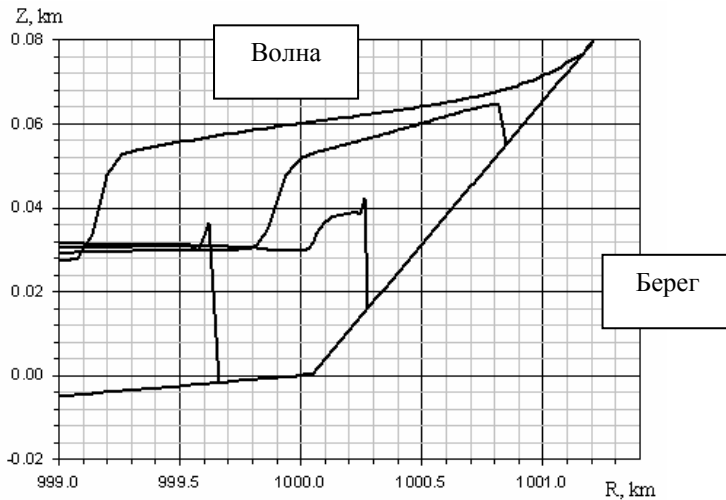


Рис. 14. Расчет наката столкновительного цунами на океанический берег, имеющий наклон 32°

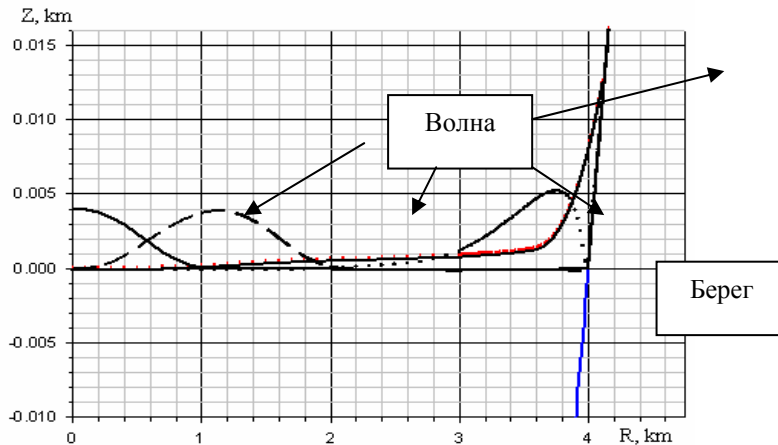


Рис. 15. Тестирование методики расчета наката волны на сушу

Использование предложенного в данной работе подхода к расчету параметров цунами, образующегося от падения астероида в океан, является вполне приемлемым как для качественного, так и для количественного описания данного физического явления. Как показали полученные результаты, последствия от падения каменного астероида могут быть разрушительными для побережья океана.

Литература

1. www.cluster.susu.ru, www.strela.snz.ru.
2. Melosh G. J. Образование ударных кратеров / G. J. Melosh. М.: Мир, 1994. С. 336.

3. Симоненко В. А., Скоркин Н. А. и др. Математическое моделирование мегацунами // Вестник ЮУрГУ, серия «Математика, физика, химия» – 2008. Вып. 11, № 22 (122). С. 62–69.

4. Скоркин Н. А., Домбровская Е. В., Елсуков В. П., Иванкова Т. А., Кутепова С. Г., Симоненко В. А., Углов А. С., Федоров В. В. Математическое моделирование цунами, обусловленных падением астероидов или комет // Доклад на Забабахинских научных чтениях – 2007.

5. Roddy D. J. Computer simulations of large asteroid impacts into oceanic continental sites / D. J. Roddy // Int. J. Impact Engng. 1987. Vol. 5. P. 525–541.

6. Мазова Р. Х. Линейная теория набегания волн на берег // Р. Х. Мазова, Е. Н. Пелиновский / Препринт ИПФ АН СССР. 1981, № 3.