

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.466

А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин², Е.Н. Пелиновский^{2,3}

ЦУНАМИ КОСМОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»¹

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород³

Цель: В работе обсуждаются цунами космогенного происхождения.

Метод: В основе исследования лежат физико-математические и численные модели космогенных цунами.

Результаты: Представлен краткий анализ потенциально опасных околоземных объектов, вероятность и возможные последствия их столкновения с Землей.

Область применения: Представленные результаты могут быть использованы при разработке усовершенствованных моделей космогенных цунами.

Ключевые слова: космогенные цунами, метеориты, астероиды, физико-математические и численные модели.

Введение

На рубеже XX и XXI вв. произошла существенная переоценка угрозы падения малых тел Солнечной системы на Землю, и эта тема начала привлекать все большее внимание. Падение метеорита в Челябинской области 15 февраля 2013 г. еще больше подогрело этот интерес. Стала появляться информация о сближении с Землей космических тел размерами от нескольких десятков метров до километров. Многие из этих объектов пролетают в непосредственной близости к Земле, на расстоянии, сравнимом с расстоянием до Луны. В связи с этим стали разрабатываться прогнозы опасного сближения астероидов с Землей на будущие десятилетия и даже столетия, а в науке прочно закрепился термин, олицетворяющий эту угрозу, – астероидно-кометная опасность.

В случае вхождения астероидов и метеоритов диаметром 5-6 км в Атлантический океан в нем могут возникнуть гигантские волны высотой несколько сотен метров, способные уничтожить Европу и Северную Америку [7]. Такие события уже происходили в прошлом. В данной работе представлен обзор текущего состояния исследований по космогенным цунами, а также методы и модели, используемые в настоящее время для анализа этого явления.

Данные о столкновениях астероидов с Землей

Столкновение с Землей крупных небесных тел с диаметром несколько километров, представляют достаточно редкие события, однако столкновение с телами малого и среднего размеров неоднократно имели место в прошлом. Число доказанных метеоритных кратеров, получивших название «астроблем» к настоящему времени составляет около двух сотен [1]. В течение последних 15 лет выполнен всесторонний поиск и анализ потенциально опасных околоземных объектов, приведший к открытию около десяти тысяч околоземных астероидов [2]. В настоящее время обнаружено более 800 астероидов большого диаметра, чьи орбиты могут пересечься

с Землей. Каждый год регистрируется 2–3 пролёта тел диаметром 100–1000 м на расстоянии 0,5–3 млн км от Земли, и многие такие пролеты регистрируются уже постфактум. В целом, вокруг Земли вращается более 7000 комет и астероидов, которые потенциально могут столкнуться с нашей планетой, причем 90% из них имеют диаметр более километра и 20% имеют опасные орбиты, сближающие их на расстояние менее 8 млн км [2 – 4], а 1% астероидов сближается с Землей на расстояние меньшее, чем до Луны [5]. Более того, по имеющимся данным, орбиту Земли пересекают несколько десятков активных комет и несколько сотен угасших комет, диаметрами ядра до 1 км. Столкновения с астероидами рассматривается как наиболее вероятные, поскольку лишь 0,4% опасных сближений приходится на периодические кометы [3]. Так называемые «долгопериодические» кометы могут подойти на потенциально опасную орбиту столкновения с Землей всего за два месяца до своего обнаружения.

Основную опасность в глобальном масштабе представляют собой тела диаметром более 1 км, тогда как серьезные континентальные или региональные разрушения могут вызвать тела и гораздо меньшего диаметра [7]. Последствия столкновения астероидов разного размера с Землей обсуждаются в [3, 8]. Оценки рисков показывают, что 53% астероидов могут упасть в Мировой океан с последующим образованием цунами [5]. Естественно, что у тел меньшего размера вероятность столкновения с Землей гораздо выше, чем у больших или гигантских астероидов. Так, метеорит диаметром 50 м сталкивается с Землей примерно раз в 100 лет, вызывая разрушения на площади около 2 кв. км, при этом энергия столкновения оценивается в 10 Мт (ТНТ эквивалент) [3, 9, 10–24]. С метеоритами диаметр в 1 км и более, Земля сталкивается в среднем раз в 100–200 тысяч лет. Следует отметить, что атмосфера Земли оказывает существенное воздействие на крупные астероиды, и зачастую они полностью испаряются в атмосфере [3, 8]. Это наблюдалось при падении Тунгусского метеорита, когда до Земли дошла только ударная волна, и в случае с Челябинским метеоритом, когда на землю упало несколько десятков фрагментов малого размера.

Можно выделить ряд проблем, изучение которых важно как для понимания физики космогенных цунами, так и для развития вычислительных технологий, их моделирования и предсказания. Вычислительные технологии для данной проблематики, по существу, являются единственным инструментом для понимания процессов столкновения, динамики, кратерообразования в планетарном масштабе. Многие процессы высокоскоростных соударений планетарного масштаба, такие как плавление, излучение, испарение и другие, невозможно воспроизвести в лабораторных условиях на Земле. Одной из слабо изученных стадий воздействия астероида на поверхность Земли является падение небесного тела в Мировой океан и образование волны цунами. Учитывая тот факт, что водная поверхность составляет около 2/3 от всей земной, вероятность падения астероида в океан гораздо выше, чем на сушу, примерно в пять раз [12]. Однако к настоящему времени обнаружено всего 15–20 кратеров, образованных при ударе в море [13]. Это связано с трудностями исследований на дне океана.

Модели космогенного цунами

Обзоры по тематике космогенных цунами содержатся в [3, 8, 14–16, 23, 29, 34]. Описание космогенного цунами представляется достаточно сложным в силу взаимовлияния друг на друга нескольких стадий, из которых можно выделить основные:

1. Определение характеристик астероида в атмосфере. На этой стадии, помимо оценки вероятности такого события, а также определения размеров, формы, скорости, плотности метеорита, необходимо учитывать ряд сложнейших процессов, таких как вращение, абляция, термохимия, потеря скорости и массы и др., которые повлияют на конечную скорость столкновения астероида с Землей.

2. Формирование кратера на водной поверхности. Процесс взаимодействия астероида с водой является сильно нелинейным, и формирования кратера сопровождается рядом специфических процессов, таких как парообразование, выброс воды в атмосферу, столкновение с водой нескольких осколков, приводящее к формированию группы очагов и др. На этом

этапе необходимо определить связь между характеристиками метеорита, батиметрией морского дна и параметрами очага возмущения.

3. Движение астероида в толще океана. Достаточно крупный астероид, упав в океан, способен беспрепятственно пройти сквозь его толщу и сформировать кратер на дне. На данном этапе необходимо определить влияние схлопывания газового пузыря на параметры очага цунами, образующегося за астероидом при прохождении толщи воды.

4. Разрушение водного кратера, влияние этого разрушения на формирование очага цунами.

5. Распространение цунами очень большой амплитуды и накат на сушу. По сравнению с цунами сейсмического происхождения волны цунами космогенного происхождения являются более нелинейными (их амплитуда достигает 100 м и более) и более дисперсионными (их длина сопоставима с глубиной океана).

С точки зрения моделирования космогенного цунами самой сложной задачей является движение астероида в атмосфере в части термохимии, которая важна для расчета траектории и потери массы астероида. Кинетическая энергия каменного метеорита диаметром 100 м, падающего со скоростью 20 км/с, составляет около 3×10^{17} Дж, что соответствует энергии очень сильного цунами сейсмического происхождения. Энергия астероида диаметром 1 км будет на три порядка больше, что в несколько раз превысит энергию сильнейшего Чилийского землетрясения 1960 г. Оценка кинетической энергии (в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента), выделенной в результате столкновения, может быть осуществлена по формуле [20]

$$E = 6.256 \times 10^{-8} d^3 v^2 \rho_a, \quad (1)$$

здесь d – диаметр астероида; v – скорость астероида относительно Земли; ρ_a – плотность астероида (здесь и далее все единицы величин в формулах соответствуют системе СИ). В [20] приводятся оценочные значения кинетической энергии столкновения для короткопериодических и долгопериодических комет различного диаметра.

Также проблематичной является стадия удара небесного тела о водную поверхность и формирование каверны с последующей ее эволюцией, образованием подводных пузырей и их влиянием на формирование очага. Исследования в этой области связаны с теорией кратерообразования, которые, можно разделить на два направления. Первое из них опирается на теорию взрыва, а второе – на механику несжимаемых жидкостей. Применение методов механики несжимаемой жидкости объясняется тем, что давление, возникающее при взрыве, настолько велико, что прочностными и упругопластическими свойствами среды в большинстве случаев можно пренебречь, как и силами трения по сравнению с инерционными силами. Более того, если пренебречь сжимаемостью среды, то и получается модель несжимаемой жидкости, в которой, в общем случае, можно учесть и силы трения с помощью введения вязкости. Моделирование кратерообразования в рамках данной модели дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [17].

При падении метеорита в воду наблюдается ряд специфических эффектов: движение метеорита в водной среде; обрушение волн; выброс воды в атмосферу; парообразование и др. [19, 28], для которых потребуется усложнение общей модели. Кроме того, в отличие от твердой поверхности, при ударе тела о поверхность воды значительная его часть (от 25 до 100% в зависимости от скорости и угла наклона траектории) остается нерасплавленной. Все эти процессы являются серьезным препятствием для теоретического анализа.

Помимо волн, образовавшихся непосредственно из-за удара о поверхность, также образуются вторичные волны, связанные с динамикой кратера в результате его схлопывания и заполнения водой. Часть процессов, учитываемых в модели падения на твердую поверхность, при падении метеорита в воду можно не рассматривать. К таким процессам можно отнести разброс и дробление метеорита, которые не повлияют на формирование волновой картины, если, конечно, фрагменты не являются достаточно крупными.

Падение крупного метеорита, способного вызвать волну цунами высотой в сотню

метров, является редким событием, однако прогнозирование данного явления представляется актуальным (они имели место ранее [22, 23] и могут нанести существенный ущерб при возникновении вновь [24]). В работе [22] приводится исторический очерк космогенных цунами, которые возникали в прошлом (около 10), их географическое распределение показано на рис. 1. Особо отметим два события, которые произошли на территории России (Калуга, 380 млн лет назад, когда на этой территории было море, и Баренцево море, 142 млн лет назад).

Исследование возникновения космогенных цунами порождает массу проблем, для решения которых построение единой физико-математической модели едва ли представляется возможным. Общая модель должна учитывать процессы гидро-, аэродинамики, механики напряженно-деформированного состояния, динамики многокомпонентных сред, а в более сложном случае и многофазных сред. По этой причине при моделировании космогенных цунами выделяют ряд подзадач, для которых строятся конкретные модели. К наиболее общим из таких задач можно отнести: формирование очага, т.е. непосредственно падение метеорита; кратерообразование на дне океана; выброс воды в атмосферу; распространение волны; ряд других.

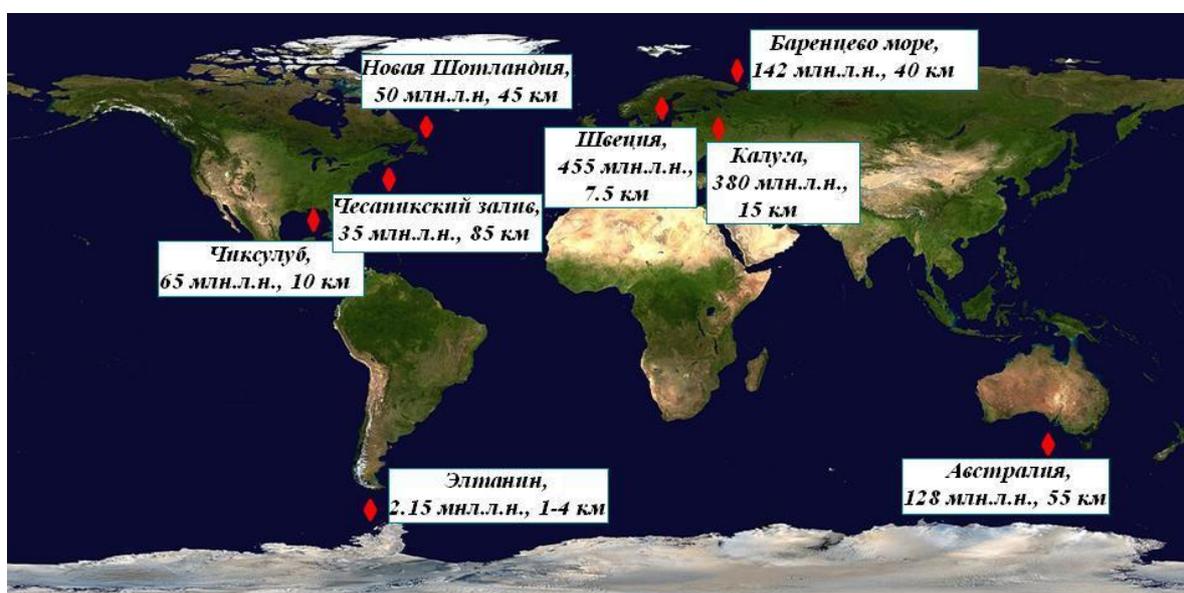


Рис. 1. Места наблюдения исторических «космогенных цунами» [22]

На этапе образования водного кратера можно выделить три связанных гидродинамических потока. Первый поток - воздушный, возникающий в результате выталкивания телом газа из промежуточного водного кратера (каверны), созданного падением (рис. 2). Скорость данного потока существенно связана со вторым гидродинамическим потоком, возникающим при схлопывании стенок полости кратера, который в результате устремляется вверх и приводит к образованию султана [25]. В процессе погружения за телом образуется третий гидродинамический поток – турбулентный вихревой след с развитой кавитацией, состоящий из пары крупных вытянутых вихрей, вращающихся в разные стороны.

Форма промежуточного водного кратера до начала его трансформации с большой вероятностью будет совпадать с формой аналогичного кратера на твердой поверхности, однако механизм его образования совсем иной. Высоты и формы центральной и периферийной частей будут различаться. В водном кратере эти высоты будут зависеть от размера и формы астероида, его скорости, и, что немало важно, от процессов, происходящих в толще воды. Все это, несомненно, повлияет на высоту, форму и скорость распространения волны цунами из очага.

При падении в глубоководный район океана волна цунами, как показывают расчеты [13, 26, 27], будет сформирована в результате схлопывания промежуточного водного кратера. При диаметре астероида менее 0,5 км водный кратер не достигнет дна океана. В случае достижения дна астероидом, при достаточном его размере и скорости, образование донной

структуры может сопровождаться перемещением периферийной его части и структурного подъема дна в процессе роста кратера, что также может сгенерировать волну цунами. Такой процесс имел место при образовании кратера Мьолнир диаметром 40 км в Баренцевом море [13]. Этот кратер был образован 140 млн лет назад при падении астероида диаметром 1–3 км в море глубиной 300–500 м.

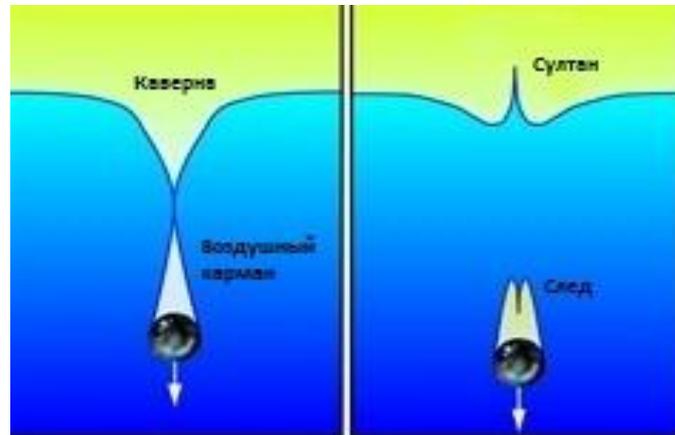


Рис. 2. Стадии формирования водного кратера. Образование каверны и «воздушного кармана» в толще воды (слева) и следа за телом с формированием «султана» на поверхности (справа)

Оценка достижения дна астероидом и возможное образование донного кратера приводится в [13]. Для определения влияния толщи воды на процесс кратерообразования на дне вводится параметр d/H (d – диаметр астероида, H – глубина моря). При $0,1 < d/H < 1$ толща океана существенно влияет на этот процесс, размеры и морфологию кратера, при $d/H < 0,1$ кратер не образуется вообще, а при $d > H$ слой воды не влияет на ход процесса кратерообразования. Если диаметр астероида в четыре раза больше, чем глубина океана, он достигает дна без особых разрушений и торможения.

Первая волна цунами начнет распространяться уже с начальной стадии падения тела – промежуточного водного кратера. Именно такую форму источника в качестве начального возмущения используют во многих работах по моделированию распространения космогенного цунами [22, 23, 28, 29]. В этих работах стадия падения и погружения астероида не рассматривается, а форма каверны на поверхности задается с помощью приближенных аналитических формул. В частности, предполагают, что на начальной стадии кратерообразования метеорит создает радиально симметричную полость, которая может быть описана функцией [16, 30]

$$\begin{aligned} \eta^{\text{imp}}(r) &= D_C(1 - r^2/R_C^2), & r \leq R_D, \\ \eta^{\text{imp}}(r) &= 0, & r > R_D, \end{aligned} \quad (2)$$

где D_C – глубина каверны, R_C и R_D – внутренний и внешний радиусы каверны соответственно. В случае равенства радиусов каверны $R_C = R_D$ поверхность представляет собой впадину (рис. 3), что соответствует выбросу воды в атмосферу или её испарению [16]. В случае $R_D = \sqrt{2}R_C$ вода, выброшенная из каверны, формирует внешний всплеск – кольцевую структуру, характерную при падении объекта в воду, объем которой в точности соответствует объему воды, выброшенному из каверны.

Предполагая переход кинетической энергии астероида в потенциальную энергию смещения уровня воды, в [30] выводятся простые аналитические формулы для вычисления радиуса и глубины каверны:

$$D_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon\rho_I R_I^3 V_I^2}{\rho_w g R_C^2}}, \quad R_C = R_I \left(2\varepsilon \frac{V_I^2}{g R_I} \right)^{\delta} \left(\frac{\rho_I}{\rho_w} \right)^{1/3} \left(\left(\frac{\rho_w}{\rho_I} \right)^{1/3 - \delta} \left(\frac{1}{q R_I^{a-1}} \right)^{2\delta} \right), \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; ε – доля кинетической энергии метеорита, переходящая в энергию цунами; ρ_I , R_I , V_I – плотность, радиус и скорость метеорита; q и α – коэффициенты, связанные со свойствами метеорита и водного слоя, $\delta = 1/(2\alpha + 2)$. Численные результаты, полученные с применением сложных нелинейных моделей, вполне согласуются с параметризацией вида (2) и (3) [16], хотя этот вопрос нуждается в дальнейших исследованиях.

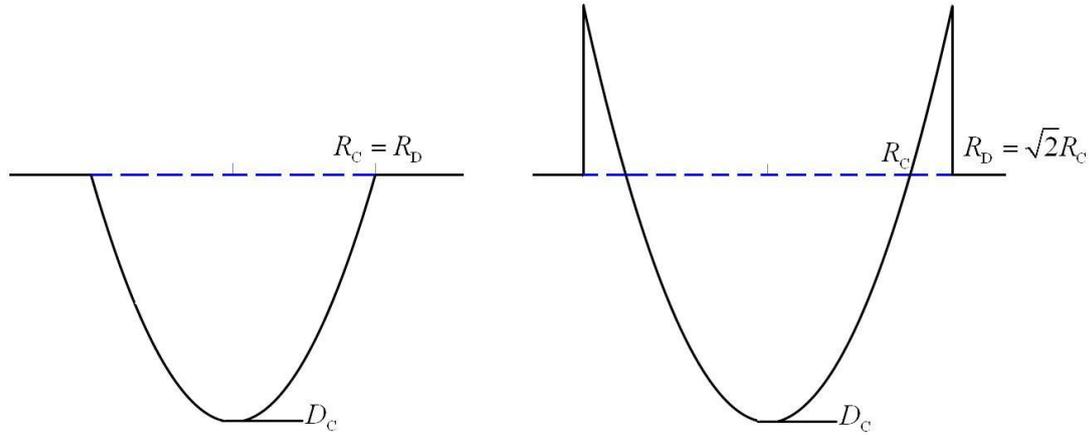


Рис. 3. Начальное возмущение водной поверхности

Экспериментальные исследования образования каверны на поверхности воды при падении тела с гиперзвуковой скоростью описаны в [17]. В эксперименте оценивались радиус и глубина каверны, образованной ударом о жидкость стеклянного шарика диаметром 2 мм, движущегося со скоростью 4,64 км/с. Использование таких экспериментов полезно на стадии калибровки численных моделей. Использование этих знаний для объяснения механизма образования земных кратеров, вообще говоря, некорректно, поскольку здесь исследуются прочностные кратера малого диаметра, морфология которых отличается от крупных гравитационных кратеров [13].

Сформированная волна цунами, согласно расчетам по линейной теории, как уже говорилось, может достигать высоты несколько сотен метров и даже нескольких километров [13, 22, 26–28, 31, 32]. При численном моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» [13, 26] амплитуда волны цунами достигает более километра непосредственно в очаге, 300 м на расстоянии 70 км от очага и около 10 м вблизи побережья Южной Америки. В расчетах потенциального цунами от возможного падения астероида 1950 DA (1,1 км в диаметре) в Атлантический океан, которое может произойти 16 марта 2880 г., высота цунами может достигать 100 м вблизи побережья Северной Америки и 20 м вблизи Европы [6]. Анализ численных расчетов наклонного падения астероида (15° к горизонту) показывает, что возникающая волна цунами быстро становится симметричной (в радиусе 50 км) и ее амплитуда слабо зависит от направления распространения [26]. В цитируемых численных работах для моделирования распространения цунами используется линейная теория волн на воде в бассейне постоянной глубины. Очевидна, однако, неприменимость линейной теории волн к волнам космогенного происхождения.

В настоящее время не произошло ни одного космогенного цунами, что не позволяет сопоставить результаты моделирования с натурными данными. Высоты сгенерированных волн, полученные численно, могут быть сопоставлены с эмпирической формулой, выведенной на основании экспериментальных данных, полученных в ходе проведения подводных взрывов [26]:

$$h = 45 \frac{H}{L} (E)^{0.25}, \quad (4)$$

где h – высота волны; H – глубина океана; L – расстояние от источника. Оценка высот волны

цунами на разных расстояниях от источника при моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» дает хорошее совпадение с данными, полученными по формуле (4) [13, 26]. Однако эта формула дает адекватное совпадение только в случае генерации волны цунами в результате схлопывания промежуточного водного кратера. Если волна цунами генерируется еще и подвижками дна, происходящими в результате кратерообразования, то данная формула дает большую погрешность (до нескольких раз).

В [20] приводится таблица высот волн космогенного цунами в зависимости от размера астероида, основанная на формуле, выведенной в Лос-Аламосской Национальной лаборатории для оценки высот цунами на расстоянии 1000 км от точки столкновения:

$$h = 1,0081 \times 10^{-5} (d^3 v^2 \rho_a)^{0.54}, \quad (5)$$

где все обозначения были приведены ранее.

Калибровка численных методик, предназначенных для моделирования распространения космогенных цунами, также может быть проведена на некоторых доступных экспериментальных данных. В работе [33] экспериментально исследовались гравитационные волны при свободном падении тела в мелководный бассейн. При этом опыты проводились так, чтобы как можно сильнее проявились эффекты, связанные с конечной глубиной жидкости. В проведенном эксперименте обращает на себя внимание тот факт, что при вертикальном падении кубического тела, помимо выброса вертикальной струи из основной массы жидкости, выбрасывается еще и горизонтальная струя. Показано, насколько сложно описать гравитационные волны, располагая только данными об энергии падающего тела, если она достаточно велика, а в случае падения небесного тела она будет очень велика. Еще один вывод из этих экспериментов: при всей сложности процессов вблизи тела на больших расстояниях от очага формируются уединенные волны предельной амплитуды. В связи с этим становится важным вопрос о возможном числе уединенных волн при падении астероида в океан. В представленном опыте больше двух следующих друг за другом уединенных волн получить не удалось, хотя здесь же отмечается, что в опыте со смещением участка дна бассейна уединенных волн наблюдалось большое количество.

Падение астероида в океан сгенерирует волну, отличающуюся от волны, порождаемой подводным землетрясением. Волны цунами сейсмического происхождения являются очень длинными, их длина намного превышает глубину океана, они распространяются с очень малой потерей энергии на большие расстояния со скоростью $c = \sqrt{gh}$. В проведенных вычислениях [29] скорость волн, сгенерированных в результате падения астероида, значительно меньше, чем \sqrt{gh} , а длина в два раза меньше диаметра промежуточного водного кратера. Отсюда следует важная роль дисперсионных эффектов в проблеме цунами космогенного происхождения, в то время как для описания цунами сейсмического происхождения широко используется теория мелкой воды [22, 37 – 39], в рамках которой давление является строго гидростатическим. Кроме того, в задачах с большими расчетными областями и сложной структурой дна неизбежно будут возникать области, в которых приближение мелкой воды, строго говоря, не применимо из-за трехмерного характера течения.

Для описания процессов в очаге цунами необходимо использовать полную систему уравнений Навье-Стокса. Однако численное интегрирование системы уравнений Навье-Стокса является весьма сложной и трудозатратной задачей. В настоящее время космогенные цунами моделируют с помощью уравнений Эйлера [29], уравнений Буссинеска [14, 31]; используют полуэмпирические модели [6, 24], а также уравнений мелкой воды, учитывающих донное трение [23]. Различные подходы к моделированию космогенного цунами рассматриваются в [34]. Здесь анализируются модели образования источника, возможность применения линейной теории и теории мелкой воды для распространения волн, а также сравнительный анализ результатов моделирования космогенных цунами, ранее полученных другими авторами, который зачастую показывает существенные различия в некоторых оценках.

Стратегия численного моделирования космогенного цунами, включая все стадии от образования начального возмущения на поверхности до заплеска на сушу, представлена в [32]. В этих расчетах глубина океана также предполагалась постоянной, а заплеск волны на берег вычислялся для модельного шельфа с определенным углом наклона. В представленной стратегии образование начальной волны, распространение и заплеск считались по разным программам. Сгенерированный источник волны цунами передавался в качестве граничного условия в программу расчета её распространения, после чего по специальной программе вычислялся заплеск волны на берег. Воздействие космогенного цунами на побережье Черного моря анализируется в [34]. Здесь в качестве источника использовалась аналитическая формула, а распространение моделировалось с помощью двумерных уравнений теории мелкой воды.

Одновременное моделирование стадии начального возмущения и распространения волны цунами на примере известных исторических подводных образований рассматривается в [13, 26, 27]. Здесь используются уравнения Эйлера, а глубина океана считается постоянной. В этих работах большее внимание все же уделяется кратерообразованию на дне океана, а не волнам цунами. Подчеркивается существенное влияние глубины океана на процессы, происходящие при падении астероида.

Моделирование распространения космогенных цунами и их возможное воздействие, включая оценку экономического ущерба, на побережье Тихого океана проводилось в [21, 35]. Здесь источник задавался в виде аналитической формулы. По проведенным расчетам получается, что максимальная высота цунами на Японском побережье составит более 60 м. Возможные последствия для Европы и Америки от падения астероида диаметром 5 км в середину Атлантического океана обсуждаются в [7, 35]. По данному прогнозу, цунами наводнят две трети верхней части Восточных США до предгорий Аппалач. В Европе самое сильное воздействие придется на Португалию.

Заключение

Были обсуждены кратко существующие методы расчета волн цунами космогенного происхождения. Много, особенно это касается очага, в этой области еще только предстоит исследовать, и здесь много не изученных вопросов. Численное моделирование данного явления пока еще осуществляется только в двумерном виде и на основе упрощенных моделей, что также не учитывает некоторые реальные эффекты при генерации и распространении. Работы по распространению волн в реальных акваториях моделировались только с очагом, задаваемом в аналитическом виде, а все исторические «импакты», способные сгенерировать волну цунами, не учитывали реальную батиметрию дна и были больше нацелены на моделирование кратерообразования, нежели на полноценный анализ космогенных цунами. Полноценное описание воздействия астероида на поверхность океана, на наш взгляд, возможно только при использовании полномасштабной физико-математической модели, основанной на системе уравнений гидродинамики и учитывающей, в том числе, многофазные течения. При изучении космогенных цунами на первом этапе межфазовым взаимодействием атмосферы и океана можно пренебречь, ограничившись лишь учетом плотности и давления. Такие модели в настоящее время уже разработаны за рубежом, и их сопоставление сделано в [17]. Отметим и российские программы [10, 18]. Они могут быть использованы для более точной оценки характеристик на всех стадиях образования и распространения волн цунами несейсмического происхождения.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133. Частично эта работа поддержана для ЕП грантом РФФИ (14-05-00092).

Библиографический список

1. Earth Impact Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> – 11.11.13.

2. Near-Earth Object Program (NASA, JPL). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
4. **Chapman, C.R.** The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 222. P. 1–15.
5. Report of the Near-Earth Object Science Definition Team. Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for Near-Earth Objects to Smaller Limiting Diameters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
6. **Ward S.N., Asphaug E.** Asteroid impact tsunamis of 2880 March 16 / S.N. Ward, E. Asphaug // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153. P. F6 – F10.
7. **Hills J.G., Goda M.P.** Damage from comet-asteroid impacts with earth / S.N. Ward, E. Asphaug // *Physica D*. 1999. V. 133. P. 189–198.
8. **Nemchinov I., Shuvalov V., Svetov V.** Main factor of hazards due to comets and asteroids / I. Nemchinov, V. Shuvalov, V. Svetov // *Catastrophic events caused by cosmic objects*; Eds. V.V. Adushkin, I.V. Nemchinov. – New York, Heidelberg: Springer, 2008. P. 1–89.
9. **Paine, M.P.** Asteroid impacts: The extra hazard due to tsunamis // *Science of Tsunami Hazards*. 1999. V. 17. №. 3. P. 155–166.
10. **Минаков А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А.** Численный алгоритм решения пространственных задач гидродинамики с подвижными твердыми телами и свободной поверхностью / А.В. Минаков, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерев // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2008. Т. XI. № 4 (36). С. 94–04.
11. **Benest D., Froeschele C.** Impacts on Earth / D. Benest, C. Froeschele. – New York, Heidelberg: Springer, 1998. – 233 p.
12. **Morrison, D.** Defending the Earth against asteroids: the case for a global response // *Science and Global Security*. 2005. V. 13. P. 87–103.
13. **Shuvalov, V.V., Trubestkaya I.A.** Numerical modeling of marine target impacts / V.V. Shuvalov, I.A. Trubestkaya // *Solar System Research*. 2002. V. 36. №. 5. P. 417–430.
14. **Korycansky D.G., Lynett P.J.** Run-up from impact tsunamis / D.G. Korycansky, P.J. Lynett // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170. P. 1076–1088.
15. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
16. **Левин, Б.В., Носов М.А.** Физика цунами и родственных явлений в океане / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус-К, 2005. – 360 с.
17. **Pierazzo E., Artemieva N., Asphaug E.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets / E. Pierazzo [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. V. 43. №. 12. P. 1917 – 1938.
18. **Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – 600 с.
19. **Badescu, V.** Risks for poisoning of coastal and inland population due to asteroid impacts in Southern regions of Black Sea // *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2008. V. 22. P. 461–476.
20. **Marusek, J.A.** Comet and asteroid threat impact analysis // Report of American Institute of Aeronautics and Astronautics, presented on the 2nd International Planetary Defense Conference (George Washington University, Washington, D.C., 5-8 March 2007). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.breadandbuttersscience.com/CATIS.pdf>
21. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean – II // *Earth, Moon and Planets*. 1997–1998. V. 76. P. 117–121.
22. **Kharif, C., Pelinovsky E.** Asteroid impact tsunamis / C. Kharif, E. Pelinovsky // *C. R. Physique*. 2005. V. 6. P. 361–366.
23. **Isvoranu, D., Badescu V.** Hydrodynamics of tsunamis generated by asteroid impact in the Black Sea / D. Isvoranu, V. Badescu // *Cent. Eur. J. Phys.* 2012. V. 10. P. 429–446.
24. **Chesley S.R., Ward S.N.** A Quantitative Assessment of the human and economic hazard from impact-generated tsunamis / S.R. Chesley, S.N. Ward // *Natural Hazards*. 2006. V. 38. P. 355–374.
25. **Лаврентьев, М.А., Шабат Б.В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 473 с.

26. **Shuvalov, V.V., Trubetskaya I.A.** Numerical Modeling of the Formation of the Eltanin Submarine Impact Structure / V.V. Shuvalov, I.A. Trubetskaya // Solar System Research. 2007. V. 41. №. 1. P. 56–64.
27. **Shuvalov, V.V., Dypvik H., Kalleson E.** Modeling the 2.7 km in diameter, shallow marine Ritland Impact Structure / V.V. Shuvalov [et al.] // Earth Moon Planets. 2012. V. 108. P. 175–188.
28. **Schuiling R.D., Cathcart R.B., Badescu V.** Asteroid impact in the Black Sea. Death by drowning or asphyxiation? / R.D. Schuiling [et al.] // Nat. Hazards. 2007. V. 40. P. 327–338.
29. **Gisler, G., Weaver R., Gittings M.** Calculations of Asteroid Impacts into Deep and Shallow Water / G. Gisler, R. Weaver, M. Gittings // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. P. 1187–1198.
30. **Ward, S.N., Asphaug E.** Asteroid impact tsunamis: A probabilistic hazard assessment / S.N. Ward, E. Asphaug // Icarus. 2000. V. 145. № 1. P. 64–78.
31. **Glimsdal, S., Pedersen G.K., Langtangen H.P.** Tsunami generation and propagation from the Mjølner asteroid impact / S. Glimsdal [et al.] // Meteoritics & Planetary Science. 2007. V. 42. № 9. P. 1473–1493.
32. **Weiss R., Wunnemann K., Bahlburg H.** Numerical modelling of generation, propagation and run-up of tsunamis caused by oceanic impacts: model strategy and technical solutions / R. Weiss, K. Wunnemann, H. Bahlburg // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 77–88.
33. **Букреев, В.И., Гусев А.В.** Гравитационные волны при падении тела на мелкую воду / В.И. Букреев, А.В. Гусев // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 2. С. 90–98.
34. **Badescu, V., Isvoranu D.** Dynamics and Coastal Effects of Tsunamis Generated by Asteroids Impacting the Black Sea / V. Badescu, D. Isvoranu // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. P. 1813–1834.
35. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean // Earth, Moon and Planets. 1994. V. 65. P. 7–13.
36. **Тирский, Г.А.** Взаимодействие космических тел с атмосферами земли и планет // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 5. С. 76–82.
37. **Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
38. **Зайцев А.И., Ковалев Д.П., Куркин А.А.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
39. **Kurkin A.A., Pelinovskii E.N., Choi B.H.** A comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian coast of the Sea of Japan based on numerical simulation / A.A. Kurkin [et al.] // Oceanology. 2004. T. 44. № 2. C. 163–172.

*Дата поступления
в редакцию 05.05.2014*

A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin², E.N. Pelinovsky^{2,3}

TSUNAMI OF COSMOGENIC ORIGIN

FSUE «RFNC – VNIIEF»¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Institute of applied physics of the Russian Academy of sciences³

Purpose: In this paper the tsunamis of cosmogenic origin are discussed.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models of cosmogenic tsunamis.

Results: A brief analysis of potentially hazardous near-Earth objects, their likelihood and possible consequences of a collision with Earth is presented.

Application domain: Presented results can be used to develop improved models of cosmogenic tsunamis.

Key words: cosmogenic tsunamis, meteors, asteroids, physical-mathematical and numerical models.