

УДК 551.466

А.С. Козелков

**ЭФФЕКТЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ВХОЖДЕНИЕ АСТЕРОИДА
В ВОДНУЮ СРЕДУ**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе обсуждаются существующие модели описания движения астероида в атмосфере, в воде и литосфере. В основе исследования лежат физико-математические и численные модели космогенных цунами. Дан краткий обзор астероидно-метеоритной опасности для Земли. Приведены формулы, позволяющие оценить параметры волн цунами, вызванные входом астероида в воду. 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 веков произошла существенная переоценка угрозы падения малых тел Солнечной системы на Землю. Это произошло по причине накопления серьезного багажа фундаментальных теоретических знаний о динамической и физической эволюции Солнечной системы в целом. По мере систематизации этих знаний тема взаимодействия нашей планеты с крупными небесными телами начала привлекать к себе все большее и большее внимание. В настоящее время общественность и средства массовой информации уделяют этой теме особое внимание, а падение метеорита в Челябинской области Российской Федерации 15 февраля 2013 года еще больше подогрело этот интерес. Все чаще 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 (АКО).

Столкновение с Землей крупных небесных тел с диаметром несколько километров это достаточно редкое событие, однако столкновения с телами малого и среднего размеров неоднократно имели место в прошлом. Наша планета не раз сталкивалась с небесными телами, а число доказанных метеоритных кратеров, получивших название «астроблем», уже к 1978 году насчитывало более сотни с прогнозом удвоения каждые 5.8 лет [1]. К настоящему времени количество кратеров составляет около двух сотен [56], хотя, скорее всего, эту цифру можно смело удвоить ввиду конфиденциальности и противоречивости некоторых данных [47].

Наибольшее количество кратеров находится в Северной Америке (шестьдесят), а если учитывать площадь разброса, то чемпионом является Австралия (рис. 1), на площади которой насчитывается 27 кратеров, самый маленький из которых имеет диаметр 80 метров. Диаметры кратеров колеблются от нескольких метров до нескольких десятков километров и постоянно меняются под действием эрозии и других геологических процессов. К наиболее известным кратерам можно отнести Аризонский кратер (рис. 2), имеющий диаметр 1200 метров и глубину 180 метров. По предположениям, причиной его возникновения стало падение небесного тела, летящего со скоростью примерно 50 000 км/ч и имеющего диаметр 50-60 метров и вес сотни тонн. В России к наиболее известным кратерам относится группа кратеров Маша, находящаяся в Западной Якутии, с диаметрами 180-300 метров и глубиной до

80 метров, образовавшаяся в результате падения метеорита примерно 7000 лет назад (рис. 2). Информацию о наиболее крупных кратерных образованиях, найденных на Земле, можно найти в [1, 5, 16 – 19, 56, 68, 99].



Рис. 1. Распределение «импактных» структур (астроблем) по поверхности планеты Земля



Рис. 2. Кратер Бэрринджера в городе Винслоу США, штат Аризона, образовавшийся 49000 лет назад в результате падения метеорита (слева) и группа молодых кратеров Маша в Западной Якутии Российской Федерации (справа)

В течение последних 15 лет человечество серьезно подошло к изучению астероидно-кометной опасности, выполняя всесторонний поиск и анализ потенциально опасных околоземных объектов (Near-Earth Objects, NEOs), различные программы изучения которых привели к открытию около десяти тысяч околоземных астероидов (рис. 3) [65]. Большая часть этих астероидов способна пересекать орбиту Земли (Earth-crossing asteroids, ECAs), однако лишь небольшая часть из всех этих объектов подвергается систематическому исследованию и каталогизируется. Так называемые «долгопериодические» кометы (long-period comets) могут подойти на потенциально опасную орбиту столкновения с Землей всего за два месяца до своего обнаружения [24].



Рис. 3. Статистика обнаружения околоземных небесных тел (слева) и их распределение по диаметру (справа) (онлайн источник: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats>)

В настоящее время обнаружено более 800 астероидов большого диаметра, чьи орбиты могут пересечься с Землей. Каждый год регистрируется 2-3 пролёта на расстоянии 0.5-3 млн км от Земли тел диаметром 100-1000 метров, и зачастую пролёт обнаруживается уже после максимального сближения. В целом, в пределах 0,2 а.е. от Земли вращается более 7000 комет и астероидов, которые потенциально могут столкнуться с нашей планетой [2, 65, 68], причем 90 % из них имеют диаметр более километра (рис. 3) [3, 47, 65, 68], однако из последних каталогизировано всего лишь 7% от общего количества [24]. Статистически предсказано, что 93% из них могут столкнуться с Землей, а третья часть из всех метеоритов, способных пересечь орбиту Земли, столкнется с ней [49, 50]. Более того, по имеющимся данным орбиту Земли пересекают несколько десятков активных комет и несколько сотен угасших диаметрами ядра до 1 км. Предполагают, что именно такие кометы оставили свой след на Земле в виде кратеров, количество которых превышает 20% от общей численности. Столкновения с астероидами рассматриваются как наиболее вероятные, поскольку лишь 0,4% опасных сближений приходится на периодические кометы [68]. Большая часть сближений приходится на активные кометы, однако число потухших комет, которые по своим наблюдательным свойствам не отличаются от астероидов, может быть значительно больше.

За последние десятилетия крупные астероиды неоднократно пролетали в непосредственной близости к Земле. Первый астероид, получивший имя «Аполлон» и опровергнувший общепринятое мнение о том, что орбиты всех астероидов находятся в пределах Главного пояса, был открыт в 1932 году. Он имел орбиту с перигелийным расстоянием меньше радиуса Земли и вскоре после открытия исчез, дав себя обнаружить лишь в 1973 году. Точно такая же история произошла с двойным астероидом «Гермес» размером в 1,5 км, обнаруженным в 1937 году на расстоянии примерно 750 тысяч километров всего за три месяца до его максимального сближения с Землей. Впоследствии он, так же, как и «Аполлон», был утерян и обнаружен лишь в 2003 году. В 1996 году один из астероидов прошел на расстоянии около 470 тысяч километров и был открыт только за четыре дня до его наибольшего сближения с Землей, а в 2002 году на этом же расстоянии прошел другой метеорит, который был обнаружен только после того, как стал удаляться от Земли.

Неподготовленность человечества к встрече с таким «космическим пришельцем» демонстрируется в работе [68], в которой приводится пример открытия кометы «С/1983 Н1», через две недели пролетевшей около Земли на расстоянии всего лишь 0,0312 а.е. Сейчас пристальное внимание приковано к ставшему знаменитостью астероиду «Апофис» диамет-

ром 300 метров, открытому в 2004 году. В 2029 году «Апофис» пройдет на расстоянии очень близком к Земле - всего лишь 40000 (сорока тысяч) километров, а после возвращения в 2036 году он имеет более чем ненулевую вероятность столкновения с нашей планетой.

За последние сто лет было достоверно зафиксировано столкновение с Землей девяти крупных небесных тел:

1. «Челябинский метеорит» наблюдался не только в Челябинской, но и в Тюменской и Свердловской областях Российской Федерации, а также на северных территориях республики Казахстан. Метеорит упал в 80 км от города Сатка Челябинской области. Мощность взрыва при падении составила 300 тонн в тротиловом эквиваленте.

2. 22 апреля 2012 года у поверхности Земли над американскими штатами Невада и Калифорния появилось небесное тело,двигающееся с огромной скоростью. Разбрасывая раскаленные частицы, метеорит взорвался в небе над Вашингтоном. Мощность взрыва составила около 4 килотонн в тротиловом эквиваленте, что почти в восемьдесят раз меньше мощности метеорита, взорвавшегося над Челябинском. Установлено, что метеорит Саттер Милл образовался еще в период становления Солнечной системы.

3. Одиннадцатого февраля 2012 года в Китае прошел метеоритный дождь, после которого обнаружили почти сотню камней, крупнейший из которых весил 12,6 кг. Образцы метеоритов собирались на площади в 100 километров. По мнению специалистов, метеориты происходили из пояса астероидов между Марсом и Юпитером.

4. Пятнадцатого сентября 2007 года на территории высокогорного департамента Дезагвадеро в Перу, расположенного у озера Титикака вблизи границы с Боливией, упал метеорит, образовавший кратер шириной 30 и глубиной шесть метров, из которого забил фонтан кипящей воды вперемешку с горными породами.

5. Ранее, 20 июня 1998 года метеорит упал в Туркмении, вблизи города Куня-Ургенч. Перед падением в небе был виден ослепительно яркий свет. Основная часть метеорита весом 820 килограммов упала на хлопковое поле, образовав воронку диаметром 5 метров и глубиной 3.5 метра.

6. Семнадцатого мая 1990 года яркий астероид наблюдали жители башкирского города Стерлитамак. На месте падения небесного тела был обнаружен кратер диаметром 10 метров и глубиной 5 метров, а также крупный фрагмент весом 315 килограммов и два фрагмента весом 6 и 3 килограмма.

7. Двенадцатого февраля 1947 года в отрогах Сихоте-Алиня упал железный метеорит, образовавший более 100 кратеров, около 30 из которых диаметром от 7 до 28 м и глубиной до 6 метров. На площади порядка 10 кв. км было собрано около 30 тонн метеоритного вещества. Основная часть энергии метеорита была передана атмосфере, и лишь около процента выделилось при ударе о Землю.

8. На юге Африки лежит пятиметровая глыба, получивший название Гоба, и являющаяся осколком метеорита массой 60 тонн, упавшего в 1920 году в Намибии и сопровождавшегося метеоритным дождем.

9. Наиболее известным метеоритом прошлого столетия является Тунгусский метеорит, упавший 30 июня 1908 года около 7 часов утра местного времени над территорией Восточной Сибири в междуречье Лены и Подкаменной Тунгуски. Взрывной волной в радиусе около 40 км был повален лес, уничтожены звери, пострадали люди. Из-за мощной световой вспышки Тунгусского взрыва и потока раскаленных газов возник лесной пожар, довершивший опустошение района.

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 [8, 58]. Первой документально зарегистрированной катастрофой регионально масштаба является Тунгусский метеорит, после падения которого лес был повален на площади более 2000 квадратных километров (рис. 4). Последствия столкновения астероидов разного размера с Землей обсуждаются в [68, 83].

Взрывы крупных метеоритов могут существенно влиять на климат и структуру земной коры не только в континентальном, но и глобальном масштабах. Падение астероида в океан спровоцирует выброс миллионов тонн водяного пара в атмосферу, и неизбежно вызовет гигантскую волну цунами, последствия обрушения которой на сушу трудно прогнозируемы. Все это ставит изучение проблемы падения астероидов во главе актуальнейших задач современного естествознания. По своей сложности и социальной значимости для человечества эта задача сопоставима с проблемой управления термоядерной энергией.

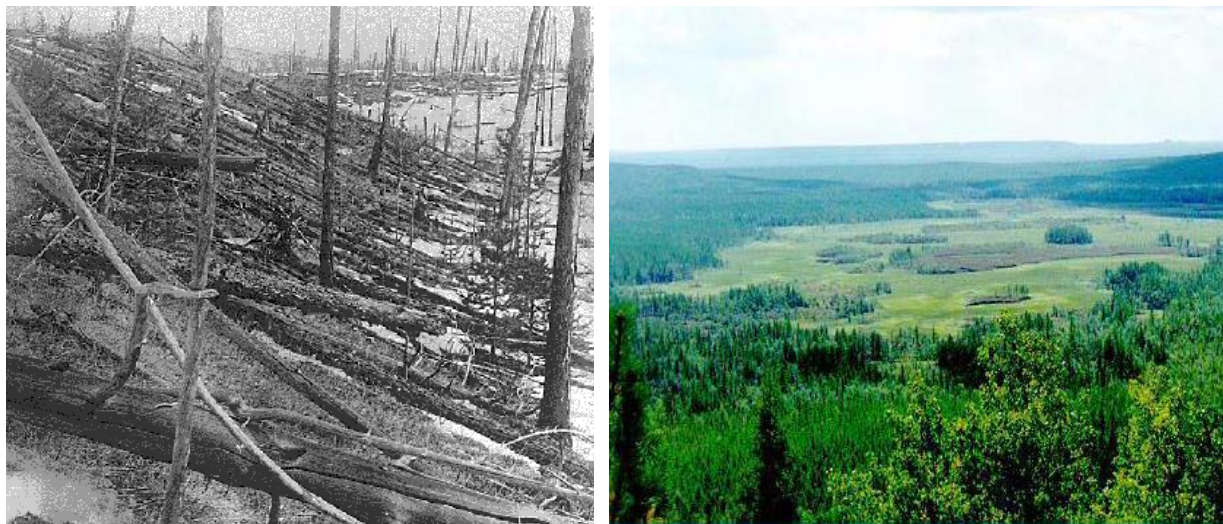


Рис. 4. Вывал леса на месте падения Тунгусского метеорита (слева – сразу после падения, справа – в настоящее время)

Естественно, что у тел меньшего размера вероятность столкновения с Землей гораздо выше, чем у больших или гигантских астероидов. Приблизительная вероятность падения астероидов различного размера и их характеристики представлены в табл. 1 [4–6, 58].

Таблица 1
Характеристики метеоритов, контактирующих с Землей

Диаметр, м	Энергия столкновения (Мт)	Площадь воздействия, км ²	Вероятность падения, годы
50	10	1 900	100
100	75	7 200	1 000
200	600	29 000	5 000
500	10 000	190 000	40 000
1000	75 000	740 000	100 000
2000	1 000 000	Глобальный эффект	1 000 000
10 000	Десятки миллионов	Глобальный эффект	70 000 000
100 000	Сотни миллионов	Конец цивилизации	Несколько млрд.

Астероидно-кометная опасность для существующей цивилизации предполагает изучение всех небесных тел с размерами менее порога глобальной катастрофы (средний диаметр объекта 1-2 км) и более порога защиты земной атмосферы (средний диаметр объекта 50-100 м) [77]. Тела меньшего диаметра существенно замедлятся и разрушатся на высоте в результате воздействия на них атмосферного трения и напряжения внутреннего сдвига. Относительно данной высоты ударная волна приведет лишь к несущественным повреждениям земной поверхности.

При контакте с Землей основную роль играет масса, скорость и угол наклона траектории метеорита, его состав, плотность и форма имеют второстепенное значение. Классификация метеоритов по массе, скорости и наклону траектории представлены в [17, 68].

Оценка вероятности столкновения с метеоритами основывается на анализе известных кратеров на Земле и определения времени их возникновения изотопными методами [7]. По этой оценке получается, что за каждые 100 миллионов лет на Земле образуется от 500 до 1300 кратеров диаметром в 1 километр и более, то есть Земля сталкивается с огромными метеоритами в среднем через 100–200 тысяч лет.

Столкновения с крупными астероидами в масштабе жизни нескольких поколений человечества происходят достаточно редко, однако за всю свою историю планета Земля сталкивалась с несколькими тысячами метеоритов диаметром 1 км, и с десятками диаметром 10 км. Столкновения с метеоритами носят случайный, непредсказуемый характер и контакт с метеоритом любых размеров может произойти в любой момент, а учитывая возможное глобальное воздействие на Землю и тот факт, что астероиды с размерами 1–10 км удастся обнаружить лишь при непосредственной близости к Земле, человечеству необходимо серьезно отнестись к этой проблеме. Очерк истории метеоритных падений и возможные проблемы столкновения астероидов с планетой Земля приводится в [47, 68, 83, 99].

Отдавая должное мировому сообществу, следует отметить, что астероидно-кометная угроза воспринята им достаточно серьезно. Эта угроза признана как одна из наиболее важнейших из существующих проблем окружающей среды и космического пространства, требующих постоянного внимания, оценки степени реальной угрозы и разработке возможных мер противодействия и смягчения последствий столкновения. Во многих странах мира выполняются программы поиска, обнаружения, каталогизации и систематизации потенциально опасных космических объектов. Осуществляется постоянный мониторинг околоземных объектов с помощью телескопов-роботов, относящихся к ведущим специализированным астрономическим обсерваториям.

Наиболее интенсивно исследования опасных околоземных объектов проводятся в США. Начало этим исследованиям положило рабочее совещание на тему «Столкновение астероидов и комет с Землей: физические последствия и человечество», организованное в 1981 году Национальным управлением по космическим исследованиям США [70]. В настоящее время в США работает система LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search) [61], разработанная для поиска астероидов и комет, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Отслеживание околоземных астероидов осуществляется по программе «Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)», которая состоит из двух автономных систем наблюдения на станции наблюдения Мауи и в обсерватории Паломар [62]. Информацию о проектах, посвященных исследованию околоземных объектов, можно найти на сайте Международного планетного общества [63]. Библиографию по астероидно-кометной опасности, официальные отчеты по проблеме, каталоги, изображения малых тел, презентации и другую информацию можно найти на специальном сайте NASA [64]. В NASA существует отдельная программа по исследованию околоземных объектов [65]. В отчетах по этой программе, можно найти общую информацию, данные об орбитах комет и астероидах, сближающихся с Землей, статистику их обнаружения и вероятность столкновения с Землей с указанием степени опасности. Международная кооперация по мониторингу околоземных объектов осуществляется в рамках австрало-американского проекта CSS, а также в рамках проекта стран Европейского союза Asiago-DLR Asteroid Survey (ADAS).

В России исследования, связанные с астероидной опасностью, ведутся во многих отраслевых институтах и предприятиях, однако, к сожалению, не так интенсивно и вклад от их деятельности пока достаточно скромный. Существенным шагом для координации усилий в этом направлении стало решение Бюро Совета РАН по космосу от 31 марта 2011 г. № 10310-01, в рамках которого экспертные рабочие группы Совета по астероидно-кометной опасности и космическому мусору были преобразованы в объединенную экспертную рабо-

чую группу по космическим угрозам [67]. Созданная группа призвана выработать комплексный подход к решению проблем прогноза и противодействия астероидно-метеорной опасности в отечественной науке.

Наблюдения за астероидами в околоземном пространстве систематически ведутся в Пулковской обсерватории. Исследования по различным программам мониторинга ведутся в институте Солнечно-земной физики СО РАН и в специальной астрофизической обсерватории РАН. Необходимо отметить вклад Института астрономии РАН, которым впервые в России выполнен комплексный анализ по всем аспектам данной проблематики. Проанализированы астрономические, геофизические и прикладные методы исследований и обнаружения небесных тел, проведена достоверная оценка степени их угрозы, а также анализ методов противодействия и уменьшения ущерба. Результаты работы института в этом направлении рассмотрены на совместном заседании Бюро Совета РАН по космосу и Президиума НТС Роскосмоса 23 июня 2010 г. [69]. На данном заседании выработано решение, по результатам реализации которого разработан проект концепции Федеральной целевой программы «Развитие системы противодействия космическим угрозам (2011–2020 гг.)», а также предложения по мероприятиям реализации системы астероидно-кометной безопасности России.

По астероидно-кометной безопасности ежегодно проводятся научные конференции, в основном международные. Данные научных исследований по астероидно-кометной безопасности насчитывают уже десятки книг и тысячи статей, публикуемых различными изданиями, наиболее известным из которых является международный журнал исследований Солнечной системы ICARUS [66] - официальное издание подразделения планетных исследований Американского астрономического общества. Здесь публикуются результаты последних наблюдательных, экспериментальных и теоретических исследований в области астрономии, геологии, метеорологии, физики, химии, биологии и других научных аспектов Солнечной системы и внесолнечных планетных систем. К российским изданиям, периодически публикующим исследования по астрономическим и фундаментальным вопросам науки Солнечной системы и астероидно-кометной опасности, относятся «Астрономический вестник», «Доклады Академии наук». Отметим здесь одну из самых свежих российских монографий – «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра» под редакцией Б.М. Шустова и Л.В. Рыхловой [68], в которой впервые сделана попытка обобщить все имеющиеся данные по этой теме. В ней рассмотрены современные представления о свойствах малых тел Солнечной системы, проблемы их обнаружения и мониторинга. Рассмотрены вопросы оценки уровня угрозы, способы защиты, уменьшения ущерба и возможных последствий падения небесных тел на Землю, а также развитие отечественной и международной кооперации по решению данной проблематики. В книге представлены актуальные данные по потенциально опасным телам, зафиксированным сближениям комет и астероидов, основные ресурсы в сети Интернет, содержащие информацию по астероидно-кометной безопасности, данные о количественном составе основных групп астероидов, а также каталог импактных структур планеты Земля. Часть представленной в монографии информации опубликована в англоязычном издании [83].

Систематизация и обобщение накопленных знаний позволяют выделить ряд проблем, изучение которых имеет важное значение как для лучшего понимания физики отдельных процессов, так и для развития вычислительных технологий, применение которых может быть направлено на решение фундаментальных задач и прогнозирование последствий астероидно-кометного взаимодействия. 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. Развитие существующих и построение новых физико-математических моделей для реалистичного моделирования столкновений небесных тел представляют достаточно актуальную и сложную проблему для современной математической

физики. Уровень развития вычислительных технологий для полномасштабного моделирования процесса столкновения находится на самой начальной стадии, поскольку численные расчеты двумерных, а тем более трехмерных физико-математических задач о прохождении разрушающегося тела сквозь атмосферы планет и их ударов о поверхности являются весьма трудоемкими и сводятся к описанию лишь отдельных стадий и обособленных процессов. Естественными выглядят попытки построения приближенных моделей, одна из которых, доведенная до пользовательской программы, создана в Аризонском университете [40].

Одной из слабо изученных стадий воздействия астероида на поверхность Земли является падение небесного тела в Мировой океан и образование волны цунами – такие волны называют «космогенными» цунами. Учитывая тот факт, что водная поверхность составляет около двух третей от всей земной, вероятность падения астероида в океан гораздо выше (в пять раз [77]), чем на сушу. Однако, к настоящему времени обнаружено всего 15-20 кратеров, образованных при ударе в море [96]. Это связано с меньшей исследованностью и молодостью морского дна, а также особенностями подводного кратерообразования.

Описание космогенного цунами представляется достаточно сложным в силу взаимовлияния друг на друга нескольких стадий, из которых можно выделить основные пять [81]¹:

1. Движение и определение характеристик движения 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 в итоге повлияют на конечную скорость столкновения.

2. Формирование кратера на водной поверхности. Процесс взаимодействия астероида с водой является сильно нелинейным и формирование 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, образующегося за астероидом при прохождении толщи воды, на параметры очага цунами.

4. Разрушение водного кратера, влияние этого разрушения на формирование начальной волны, а также начальная стадия распространения вблизи источника возмущения.

5. Распространение космогенного цунами и накат на сушу. Описание данной стадии может опираться на нелинейную теорию мелкой воды, достаточно хорошо развитую для волн цунами сейсмического происхождения [60, 82, 102–104]. Свойства распространения космогенного цунами будут, видимо, сопоставимы с сейсмическими, однако возникают неопределенности, связанные с тем, что до настоящего времени достоверно не зарегистрировано ни одного космогенного цунами.

С точки зрения математического моделирования космогенного цунами (да и вообще моделирования) самой сложной и, вообще говоря, недостаточно проработанной, является первая стадия в части термохимии, которая важна для расчета траектории и потери массы астероида. Методы исследования в этой области, как экспериментальные, так и теоретические, за последние десятилетия серьезно усложнились. Движение газа около обтекаемого тела определяется не только силовыми и температурными полями, но и химическими процес-

¹ В работе [81] рассматривается пять стадий эволюции космогенного цунами, начиная от удара метеорита о поверхность океана до наката на берег. В настоящей работе, эти стадии укрупнены и добавлены еще две – исследование движения астероида в атмосфере с целью определения более точных характеристик удара о поверхность и движение астероида в толще океана. Вообще говоря, для полной картины необходимо добавить еще и шестую стадию – формирование кратера на дне океана. При большом диаметре астероида и сильном ударе, деформация донной поверхности также может послужить одной из причин возникновения космогенного цунами.

сами, зависящими от скорости и температуры. Данные химические процессы, как правило, характерны для пограничного слоя, где при гиперзвуковом обтекании они усложняются из-за разрушения поверхности тела и связанное с этим химического взаимодействия разрушающегося вещества с воздухом. Многочисленные химические реакции, проходящие в пограничном слое, в итоге существенно влияют на аэродинамические характеристики, тепловые потоки и скорость разрушения. Из-за существенной нелинейности уравнений пограничного слоя для определения его характеристик вводят допущения и упрощения, а также пользуются уже наработанными данными в части ударно-волнового взаимодействия и излучения.

Также проблематичной является стадия удара о поверхность и формирование каверны, с последующей ее эволюцией, образованием подводных пузырей и их влиянием на формирование очага. Экспериментальные исследования и моделирование формирования каверны по большей части сводится для твердых материалов или вязкоупругих жидкостей [119], между которыми и жидкостью можно провести лишь некоторую аналогию, хотя имеются и существенные различия.

Модели описания движения астероида и его входа в воду

Атмосфера

Столкновение с крупным астероидом окажет воздействие на все оболочки планеты – литосферу, атмосферу, гидросферу и, несомненно, биосферу. Полномасштабную физико-математическую модель такого столкновения, учитывающую все процессы, проходящие в оболочках Земли, построить крайне трудно. Сверхмощный источник импульса, порождаемый астероидом, определяет актуальность решения различных классов задач со своей спецификой, относящихся к нестационарному движению твердой, жидкой и газообразной фазы при экстремальных концентрациях энергии.

Методы исследования взаимодействия метеоров с планетами Солнечной системы весьма разнообразны и в большинстве своем заимствованы из других наук. Метеорит крупных размеров, подобный Тунгусскому или Челябинскому, вторгаясь в атмосферу Земли с космической скоростью, создаст в ней ощутимые оптические, акустические и даже механические явления. Движение астероида в атмосфере Земли определяется направлением его вхождения. Действительная скорость влета метеорита в атмосферу равна его геоцентрической скорости, увеличенной в результате притяжения Земли. Минимальная скорость «догоняющего» или «догоняемого» метеорита равна 11.2 км/с, средняя скорость вхождения составляет, как правило, 30–40 км/с, тогда как максимальная скорость «встречного метеорита» может достигать 70 км/с и выше. При скорости вхождения 17.5 км/с и нулевом угле относительно зенита, атмосфера поглощает больше чем половину кинетической энергии каменных метеорных тел с диаметрами порядка 230 метров и железных метеорных тел с диаметром порядка 50 метров. Для угла вхождения 45 и 60 градусов такая потеря кинетической энергии характерна для тел диаметром 360 и 70 метров, и 500 и 100 метров соответственно для каменных и железных метеоритов. Для скоростей вхождения 50 км/с и углов 45 и 60 градусов, стандартная модель абляции дает потерю половины кинетической энергии для тел размером 3000 и 1900 метров соответственно [58]. Эти цифры могут быть гораздо меньше, если процесс абляции не интенсивен и можно говорить о том, что астероиды в несколько сотен метров достигают Земли практически без торможения.

В любом случае, полная модель для «космогенного цунами», несомненно, должна учитывать этот аспект. Особенно это касается комет, которые состоят в основном из льда, и до океана может долететь лишь небольшой её обломок, способный все же сгенерировать существенную волну. Смоделировать потерю скорости на траектории позволяет двухстадийная модель, на первом этапе которой на основании решения системы уравнений Навье-Стокса вычисляется сила лобового сопротивления астероида для некоторого диапазона средних чисел Маха движения, а на второй стадии на основании этих данных вычисляется угол входа в «мишень» и все динамические характеристики, включая потерю массы. Самым трудоемким

здесь является первый этап, в котором помимо решения полной системы уравнений Навье-Стокса, необходимо моделировать разрушение астероида высокоэнтальпийным потоком воздуха с учетом термохимических процессов. С точки зрения численного моделирования данная задача (особенно стадия, связанная с термохимией) весьма и весьма непроста и требует дополнительных упрощений и допущений.

При движении астероида в разреженной атмосфере удары молекул воздуха о его поверхность приводят к «микровзрывам», которые разрушают кристаллическую решетку его поверхностного слоя. В результате таких непрерывных столкновений астероид получает дополнительный импульс, что приводит к повышению коэффициента сопротивления и увеличению скорости торможения, а его поверхность нагревается до нескольких тысяч градусов. Плавящееся на поверхности вещество непрерывно разбрызгивается (распыляется) под действием плотной встречной воздушной волны, уменьшая тем самым массу метеорита и образуя огненно-пылевой хвост, расширяющийся до тех пор пока давление в нем не выровняется до атмосферного. Нарастающее уплотнение воздуха в головной части движущегося астероида образует ударную волну, подобную волнам, возникающую вокруг твердого тела (пули или снаряда), движущегося в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. Головная часть ударной волны имеет конусообразную форму с углом раствора, зависящим от скорости астероида (рис. 5). В общем случае, форма ударной волны может быть любой, ввиду несимметричности тела астероида и его вращения во время движения, однако всегда в головной части образуется волна уплотнения, а в задней волна разгрузки.

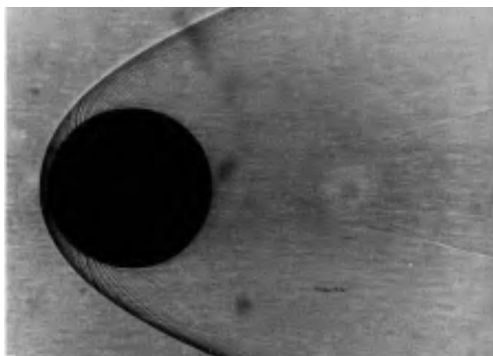


Рис. 5. Шар, движущийся со скоростью $M = 7.6$ в атмосферном воздухе [71]

Ударная волна в атмосфере при движении метеорита вызывает звуковые явления, проявляющиеся в основных трех отрывистых ударах [16, 19], сопровождающихся грохотом, а затем ослабевающим гулом. Из-за своей неправильной формы метеориты под давлением воздуха, как правило, дробятся, вследствие чего на Землю падают группы метеоритов или метеоритные дожди. Падение одиночного метеорита является довольно редким событием. Некоторые физические аспекты ударно-волнового взаимодействия астероида и атмосферы, а также формулы оценки параметров ударной волны можно найти в [83].

Теория движения метеорного тела в атмосфере, а также связанные с этим явлением процессы, включая методы их изучения, систематически изложены в монографии И.С. Астаповича [17]. В монографию включены оригинальные работы автора и руководимого им коллектива, дан исчерпывающий обзор публикаций, проводимых мероприятий (конференций, семинаров) и научных исследований советской школы «метеоритики». Движения метеора в земной атмосфере достаточно подробно рассматривается в монографиях Е.Л. Кринова [16, 19]. Здесь обсуждаются вопросы, связанные с атмосферными траекториями астероидов, явления, сопровождающие падения метеоритов, изучается физика образования ударных волн, пылевые следы, статистика падения метеоритов и многие другие вопросы, в том числе касающиеся химии и минералогии. Приводится сводка всех известных на то время данных о падении двух гигантских метеоритов XX века – Тунгусского и Сихотэ-Алинского.

Комплексное моделирование взаимодействия крупного астероида с атмосферой рассматривается в работе [20]. Модель, предполагающая наличие конечного воздушного взрыва, основывается на рассмотрении двух стадий. Стадия резкого нестационарного торможения описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений физики метеоров и входа космических аппаратов в атмосферу, учитывающей абляцию за счет плавления и испарения. На заключительном участке траектории моделируется динамика взрывоподобного распада с помощью модели взрыва летящего тела [22].

Проблеме физики метеорных явлений в атмосфере посвящена монография В.А. Бронштена [21]. В ней рассматриваются процессы торможения и потери массы, особенности движения атмосфере метеоритов, формирующих ударные волны. Подробно рассматривается процесс свечения метеоритов, их спектры, проблема дробления, а также вопросы, связанные с формированием и разрушением ионных следов метеоритов. Рассматривается автотельность задачи о движении и абляции метеорита в предположении, что движение в основном зависит от трех параметров: начальной массы, плотности и угла входа.

Обзор литературы по движению метеорита в атмосфере можно найти в [23], где изучены методы решения обратной задачи для наблюдаемой траектории болида и получено более ясное представление о динамике и термодинамике. Изучение аэродинамики движения метеорита в атмосфере представлена в [25]. Здесь рассматриваются вопросы движения тел различной природы в атмосфере, а к изучению движения крупных метеоров применяется гиперзвуковая аэродинамика. Вопросы разрушения как крупных, так и мелких метеоритов в атмосфере, а также связанный с этим процесс образования кратеров рассматривается в работах [26–35].

Математическое моделирование вхождения астероида в атмосферу на примере Венеры рассматривается в [36]. Здесь изучается влияние аэродинамического торможения в атмосфере на процесс разрушения и кратерообразования, показано, что двумерные и трехмерные модели находятся в хорошем согласии, хотя двумерная модель несколько завышает площадь разброса фрагментов. Изложение и решение проблемы фрагментации астероидов с учетом угла входа в атмосферу и оценка площади повреждения в результате столкновения можно найти в [51, 52].

В [37] взрывные процессы в атмосфере моделируются с помощью модели «стандартной атмосферы», которая предсказывает развитие сильной головной ударной волны, сопровождаемой интенсивной кумуляцией энергии и большим объемом сильно нагретого воздуха. Двумерная численная модель, учитывающая излучение и абляцию, применяется для изучения падения Тунгусского метеорита в [38]. Моделирование показывает наличие двух стадий – стадию разрушения основного тела в высокоскоростную струю мелких осколков и стадию замедления образованной струи с кумуляцией энергии, приводящей к образованию мощного баллистического факела на высоте примерно 4 км. Баллистика метеороидов, режимы обтекания тел различных размеров при входе в атмосферу Земли с метеорными скоростями рассматривается в [39]. Показано, что баллистика метеороида существенно зависит от свойств атмосферы планеты и его торможение можно рассматривать как растянутый удар об атмосферу во времени.

Современное состояние аэродинамики входа тел в атмосферу представлено в [25]. Монография посвящена актуальным вопросам движения тел разной природы в атмосфере, рассматривается гиперзвуковое обтекание тел различной формы газовыми смесями, изучаются вопросы конвективного и лучистого теплообмена, сопровождающегося уносом материала, а также свечение возмущенного потока. Аэродинамика больших скоростей применяется к анализу движения метеоров.

В целом, можно отметить, что развитие методов гиперзвуковой аэродинамики существенным образом сказалось на изучении и анализе метеорных явлений в атмосфере. Развитый физико-математический аппарат, соответствующее программное обеспечение [25, 36, 37, 43, 85], а также доступные вычислительные ресурсы уже в настоящее время позволяют моделировать ведущие физические процессы аэродинамики метеорита. Численные методы

позволяют в сравнительно короткие сроки и с достаточной точностью определить акустические, термодинамические характеристики объекта, его светимость, а методы баллистики определить траекторию объекта с помощью рассчитанных аэродинамических коэффициентов. Однако существуют и не до конца изученные вопросы. Аэродинамика гиперзвуковых скоростей развивается применительно к моделированию физических процессов в космонавтике, и основные результаты исследований, включая процессы столкновения, относятся к ограниченному диапазону скоростей (до 16 км/с) [9, 57]. Естественно, существующие модели можно модифицировать и к более широкому диапазону скоростей, имея данные о свойствах материалов и воздуха для высоких температур. Проблема здесь лишь в том, что практически все существующие методики расчета гиперзвуковой аэродинамики в *полной* мере описывают процессы взаимодействия тела с совершенным газом. В этих методиках процессы конвективного теплообмена в пограничном слое, которые могут существенно повлиять на процесс уноса массы и излучения, описываются приближенными эмпирическими или упрощенными дифференциальными моделями. Еще одной проблемой применения существующих методов аэродинамики является неопределенность формы астероида и его «нелинейное» вращательное движение [53]. На форму траектории движения астероида существенным образом влияет процесс его дробления в полете, который также проблематично смоделировать с помощью существующих моделей. С помощью существующих газодинамических моделей достаточно сложно в полной мере описать процесс «внезапных» ярких вспышек, наблюдающихся в атмосфере, на интенсивность появления и яркость которых, кроме скорости, наверняка влияет и процесс дробления. Вопрос моделирования образования и распространения «огненно-пылевого» хвоста, в котором происходит взаимодействие с ударной волной и турбулентное перемешивание с продуктами распада, для исследования является также достаточно сложным, учитывая даже то, что в настоящее время турбулентность моделируется только полуэмпирическими моделями. Однако наиболее сложный вопрос моделирования движения метеорита в атмосфере все же относится к разработке физических и математических моделей для физико-химической кинетики.

В полномасштабной модели для космогенного цунами на стадии движения астероида в атмосфере, в первом приближении физико-химической кинетикой можно пренебречь, ограничившись лишь учетом потери массы и скорости астероида на траектории. Методика расчета траекторий тел с переменными аэродинамическими и тепловыми характеристиками и уносом массы представлена в [25]. Самым простым решением этой задачи является численное интегрирование уравнений динамики твердого тела с вычислением аэродинамических коэффициентов и параметров теплообмена в каждой точке траектории. Однако этот путь весьма трудоемок, поскольку необходимо решать задачу гиперзвукового обтекания тела при изменяющихся внешних условиях в каждой точке траектории. Наиболее применимым на практике подходом к расчету характеристик астероида на траектории является определение аэродинамических коэффициентов в выделенных «квазистационарных» точках, однако применять такой метод нужно весьма аккуратно, поскольку есть вероятность ошибки в связи с резким изменением аэродинамических коэффициентов от точки до точки.

Обзор работ по аналитическому и численному исследованию траекторий торможения тел, а также расчету уноса массы за счет конвективного нагрева можно найти в [25]. Здесь особо отмечается, что диапазон больших скоростей входа, где излучение является основным источником аэродинамического нагрева, значительно менее изучен. В этом случае, унос массы и изменение формы астероида могут оказать очень существенное влияние на его траекторию.

Литосфера

Процесс воздействия астероида на литосферу связан с тремя явлениями [5]: сжатие пород грунта и метеорита при ударе, гидродинамическое растекание вещества и рассеяние метеоритного вещества в текучей массе. Все три процесса проходят одновременно или накладываются друг на друга, однако их относительная составляющая изменяется.

При ударе астероида о поверхность планеты происходит резкое торможение, и начальная кинетическая энергия в значительной степени переходит в тепло. Мгновенное торможение формирует мощную ударную волну, имеющую шаровидный фронт и распространяющуюся по полусферической области, приводящей в ускоренное движение земные породы (рис. 6). В нижней полусфере ударная волна образует пустоту, называемую первичным кратером с уплотненными и частично расплавленными стенками. По мере углубления в грунт, астероид увлекает за собой дополнительные массы вещества. От стенок воронки по породам какое-то время распространяется ударная волна, сжимая их, после чего давление падает до нормального, образуя волну разрежения. В однородном материале ударная волна распространяется до достижения предела упругости или в случае падения метеорита до сейсмического отражателя. После отражения волна также увлекает за собой породы и при достижении поверхности нижней части кратера волна поднимет его центр, образуя характерный купол (рис. 6, рис. 7).

После отражения от земной поверхности волна движется обратно к метеориту. Ударная волна создает «космическое» давление, под действием которого как земные породы, так и породы метеорита сильно сжимаются, что приводит к взрывному росту температуры и давления, которые нагревают и плавят вещество в области падения. В эпицентре этой области температура может достигать колоссальных значений, приводящих к мгновенному испарению вещества, в результате которого образуется плазма, еще более усиливающая взрыв, разбрасывающий обломки пород во все стороны от воронки. Масштаб проникновения в грунт обычно немногим больше размеров самого метеорита, поэтому в момент столкновения энергосодержание происходит в массе порядка массы астероида. Ударные волны в астероиде сначала сжимают его, а затем, отразившись от поверхности, разрывают на части. Возникшего при этом давления зачастую хватает для того, чтобы полностью испарить астероид. При этом начальная скорость ударных волн, как в мишени, так и в ударнике, равна приблизительно половине скорости удара, а давление достигает сотен ГПа [68].

Когда энергия в ударной волне становится меньше некоторой критической величины, слои грунта уже не испаряются, однако этой энергии еще хватает для дробления вещества [13]. Раздробленное вещество выбрасывается вверх в виде твердых частиц (рис. 6), вследствие чего возникает кратер, оценка размеров которого и динамика вылетающих частиц исследовались в [15]. На дне кратера образуется впадина, существующая буквально миллисекунды и засыпаемая обвалом своих же стенок и возвращающимся после взрыва раздробленным веществом, которое по периметру воронки кратера образует *брекчию* [1], скрывающую весь расплав, который позже начинает остывать и затвердевать. После остывания и затвердевания на дне кратера образуется слой импактита — горной породы с весьма необычными геохимическими свойствами (рис. 7). Столкновение, сжатие, дробление и распространение ударной волны занимает доли секунды, формирование самого же кратера длится гораздо дольше. На основе законов подобия можно построить зависимость образовавшегося кратера от размера ударника [68]. В общем случае эта зависимость не является линейной, но принято считать, что размер конечного кратера приблизительно на порядок больше размера ударника. Размер же сплошного покрова выбросов из кратера считают в 2-3 раза больше размера самого кратера. С увеличением расстояния от места столкновения ударные волны затухают и переходят в сейсмические, для оценки амплитуды которых используют формулу для максимальной скорости смещения твердой породы, полученную для подземных ядерных взрывов.

Развитие теории ударного метаморфизма тесно связано как с ударами метеоритов, так и со взрывами. При помощи ядерных взрывов можно воспроизвести ударные явления, соизмеримые по масштабу и мощности с ударами метеоритов [14, 42], по крайней мере для тех, которые создали самые большие известные на Земле кратеры. Математическая модель образования формы воронки при взрыве на поверхности снаряда представлена в [41]. В этой модели область, близкая к расположению взрывного вещества, считается идеальной несжимаемой жидкостью и рассматривается при давлениях, больших некоторого критического значе-

ния, постоянного для каждой определенной среды. Для данного давления вводится значение критической скорости, считающееся постоянным вдоль всей границы воронки. Внутри области скорость больше этого критического значения, а вне области среда неподвижна, так что граница является твердой стенкой.

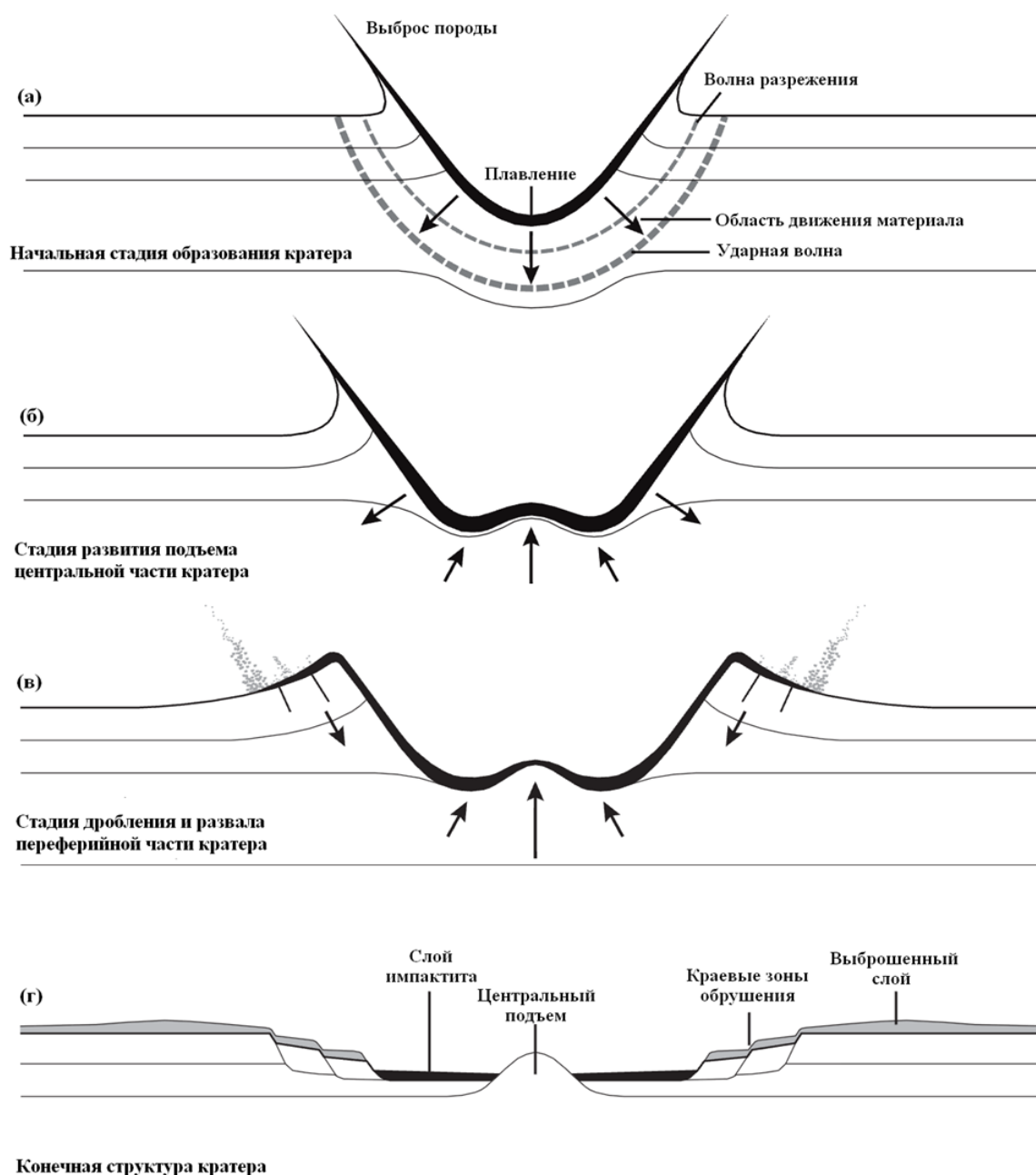


Рис. 6. Стадии образования кратера при падении астероида [73]

Однако механизм ударного кратерообразования имеет ряд существенных отличий от взрывного. Масса и размеры движущегося астероида крайне малы по сравнению с количеством и объемом вещества, приведенного в движение в результате удара. С математической точки зрения, это процесс можно связать с неограниченной кумуляцией энергии в ограниченном пространстве, которая описывается законами теории кумулятивных струй [9, 11, 14], в основе которой лежат явления детонации [12–14], лазерного излучения [12], а также взрыва. Изучение данного явления также связано с теорией сильного точечного взрыва, для которого построен ряд автомодельных решений [13, 21]. Ударное кратерообразование при падении астероида на поверхность планеты со скоростями порядка нескольких десятков или даже со-

тен километров в секунду, может описываться моделью «сосредоточенного удара» [13], которая используется при описании пробивания различных преград. При применении данной теории имеет смысл рассматривать планеты, лишённые атмосферы, например, такие как Луна и достаточно крупные метеориты, поскольку маленькие тела «сгорают» в атмосфере, не достигнув поверхности вследствие трения и разрушения. Модель «сосредоточенного удара» целесообразно применять для ударов только с очень большими скоростями, когда удельная энергия во много раз превышает энергию связи атомов и веществ метеорита и мишени. Тогда можно описать стадию падения, когда ударная волна охватывает массу грунта, значительно превышающую массу астероида, в этом случае вещество в ударной волне ведет себя как плотный газ.

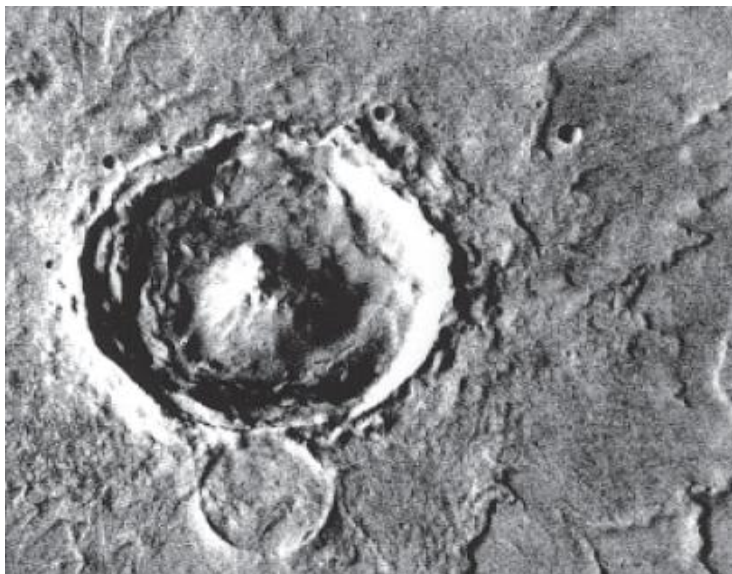


Рис. 7. Кратер «Yuty» на Марсе, диаметр 19 км [73]

Для оценки полной массы грунта, которая испаряется при ударе метеорита, используют закон затухания ударной волны [13, 15]. Согласно этим оценкам, при скорости метеорита ~ 100 км/с испаряется масса грунта в 100 раз превышающая массу метеорита. Теория перераспределения момента импульса при соударении метеоритов представлена в [54]. Теория, позволяющая разработать сценарий бомбардировки потенциально опасных для Земли объектов, основывается на точечном источнике и подтверждается лабораторными экспериментами.

В течение последних десятилетий анализ процесса кратерообразования при ударе астероидов о литосферы планет производился в двух направлениях, описанных ранее. Часть исследований относится к изучению возникновения кратеров в результате химических и ядерных взрывов, а другая часть основывается на механике несжимаемых жидкостей. В большинстве работ образование кратеров сначала рассматривается с теоретических позиций, а затем применительно к конкретному метеоритному кратеру, например, Аризонскому. Это наложило свой отпечаток на создание и использование прикладных пакетов программ для изучения кратерообразования. Программы, используемые при моделировании воздействия астероидов на поверхность планет, основываются на методах вычислительной гидродинамики [43, 48, 84, 85]. Например, в работе [84] при использовании двумерного численного моделирования оценивается, сколько вещества выбрасывается в атмосферу при столкновении астероидов и комет. При моделировании используются различные уравнения состояния для породы ударника и мишени, масса вещества, выброшенного в атмосферу, вычисляется функция времени на различных высотах, однако атмосфера моделируется вакуумом. В рабо-

те [43] показано, что диаметр кратера при гиперзвуковом соударении с Землей, зависит от диаметра и кинетической энергии метеорита, а угол соударения более существенно влияет на выброс вещества на ранней стадии столкновения.

Применяемые в настоящее время для исследований физико-математические модели достаточно адекватно описывают процесс кратерообразования [37, 85, 94, 96, 98], поскольку есть возможность их калибровки с применением результатов экспериментальных исследований [75, 80, 85, 98], учитывающих пористую структуру материалов [44, 45]. Надо отметить, что математическое моделирование кратерообразования достигло достаточно хорошего уровня, и исследователи уже концентрируют внимание на более сложных моделях расчета формы кратеров, учитывающих анизотропную структуру пористой среды, механизмы ее деформации при ударах, а также обвал порового материала [45]. Однако данные модели еще далеки от совершенства, поскольку научные изыскания по ним еще не закончены и большинство из них опирается на эмпирические зависимости, а погрешность в расчетах достигает более 20% [85]. В принципе, это касается и численных методов для моделирования такого класса задач, для чего необходима комбинация «эйлерова» и «лагранжевого» подходов к построению схем, что приводит к определенным ограничениям и сложностям эффективного использования [46].

В практических расчетах кратерообразования наиболее целесообразна модель несжимаемой среды, которая отражает существенные стороны пробивания при очень больших скоростях и позволяет провести необходимые оценки с достаточной полнотой [9]. В рамках данной модели формирование кратера «идентично» для грунта и жидкости. Предлагаемая в настоящей работе модель, основанная на решении полных уравнений Навье-Стокса, представлена далее.

Гидросфера

Исследования в области кратерообразования можно разделить на два направления. Первое из них опирается на теорию взрыва, а второе опирается на механику несжимаемых жидкостей. Применение механики несжимаемой жидкости объясняется тем, что давление, возникающее при взрыве, настолько велико, что прочностными и упругопластическими свойствами среды в большинстве случаев можно пренебречь, также как и силами трения по сравнению с инерционными силами. Более того, если пренебречь сжимаемостью среды, то и получается модель несжимаемой жидкости, в которой можно учесть и силы трения с помощью введения вязкости. Моделирование кратерообразования в рамках данной модели дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [75, 85]. С помощью методов гидродинамики можно описать общее течение явления, впоследствии уточнив его, учитывая уже свойства реальной среды.

По существу, данный факт упрощает построение физико-математической модели падения метеорита в воду, в рамках которой описание формирования водного кратера будет аналогичным, как и для грунта. Однако при падении метеорита в воду наблюдается ряд специфических эффектов, таких как движение метеорита в водной среде, обрушение волн, выброс воды в атмосферу, парообразование и др. [59, 78, 79], 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 многих методов теоретического анализа.

Помимо волн, образовавшихся непосредственно из-за удара о поверхность, также образуются волны, распространяющиеся из кратера наружу 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 в общем случае не повлияют на формирование общей волновой картины, если конечно фрагменты не являются достаточно крупными.

Самым ярким и наиболее важным для изучения процессом в гидросфере является порождаемая при падении метеорита волна цунами. Кинетическая энергия каменного метеорита диаметром 100 метров, падающего со скоростью 20 км/с., составит около 3×10^{17} Дж, что соответствует энергии очень сильного цунами сейсмического происхождения. Энергия астероида диаметром 1 км будет составлять еще на три порядка больше, что в несколько раз превысит энергию сильнейшего землетрясения XX века².

Оценка кинетической энергии (в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента), выделенной в результате столкновения, может быть осуществлена по следующей формуле [121]:

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

где d – диаметр астероида, v – скорость астероида относительно Земли, D – плотность астероида. На основании данной формулы в [121] приводятся оценочные таблицы типичных значений кинетической энергии столкновения для короткопериодических и долгопериодических комет различного диаметра.

Метеорит диаметром 5-6 километров, упавший в центр Атлантического океана, сгенерирует волну цунами высотой в несколько сотен метров, способную уничтожить Европу и Северную Америку [24]. По другим оценкам [55], астероид диаметром 1.5 км, столкновение с которым может происходить раз в полмиллиона лет, способен уничтожить существующую цивилизацию.

Астероиды размером большим, чем глубина океана, способны сгенерировать вблизи места удара волны с амплитудой, сравнимой с этой глубиной [68]. Конечно, падение крупного метеорита, способного вызвать волну цунами высотой в сотню метров, представляется маловероятным или даже ничтожным, по крайней мере, для существующей цивилизации, однако прогнозирование данного явления все же представляется актуальным, при том, что они имели место ранее [87, 91] и могут нанести существенный ущерб при возникновении вновь [92]. В работе [87] приводится исторический очерк космогенных цунами, которые возникали в прошлом на нашей планете, при том их географическое проявление (рис. 8) соответствует распределению «импактных» структур (рис. 5), что может свидетельствовать в пользу их локального характера распространения по сравнению с цунами, образованными сейсмическими источниками.

Так же, как и в случае атмосферы и литосферы, исследование возникновения космогенных цунами в общем случае 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 источника, т.е. непосредственно падение метеорита, кратерообразование на дне океана, выброс воды в атмосферу, распространение волны и ряд других.

Для моделирования распространения космогенного цунами наиболее важной стадией является образование и начальная стадия эволюции водного кратера (источника цунами) на поверхности океана. До начала распространения основной волны, на этапе образования кратера можно выделить три стадии – три связанных гидродинамических потока. Первый поток – воздушный, возникающий в результате выталкивания телом газа из полости, созданной падением. Скорость данного потока, существенно связана с потоком водным (второй гидродинамический поток), возникающим при схлопывании стенок полости кратера, который в результате устремляется вверх. Схлопывание стенок водной полости в результате образует узкое горлышко, напоминающее сопло Лавалля (рис. 9, в), скорость истечения воздуха из которого может достигать колоссальных значений.

² Здесь имеется в виду землетрясение 1960 года, произошедшее в Чили.

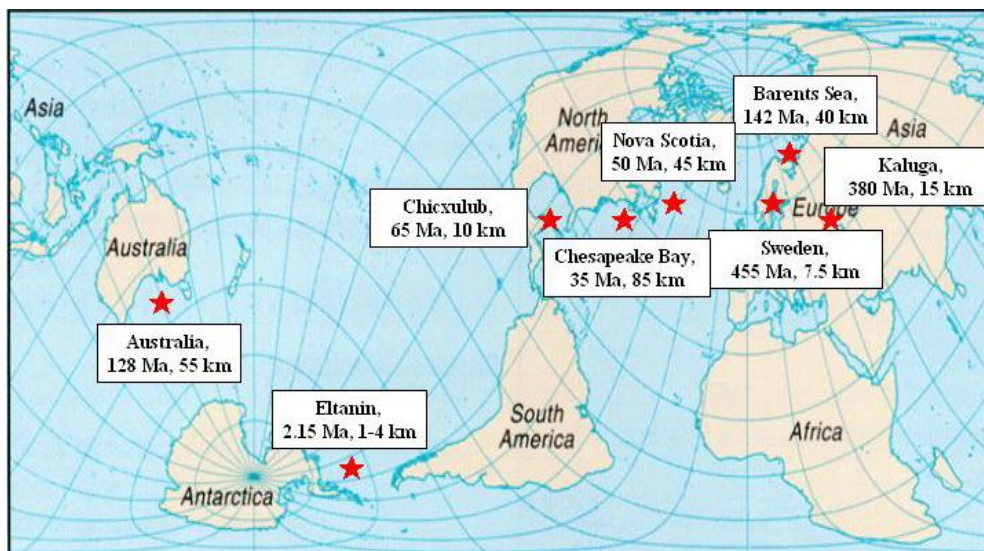


Рис. 8. Места наблюдения исторических «космогенных цунами» ([87])

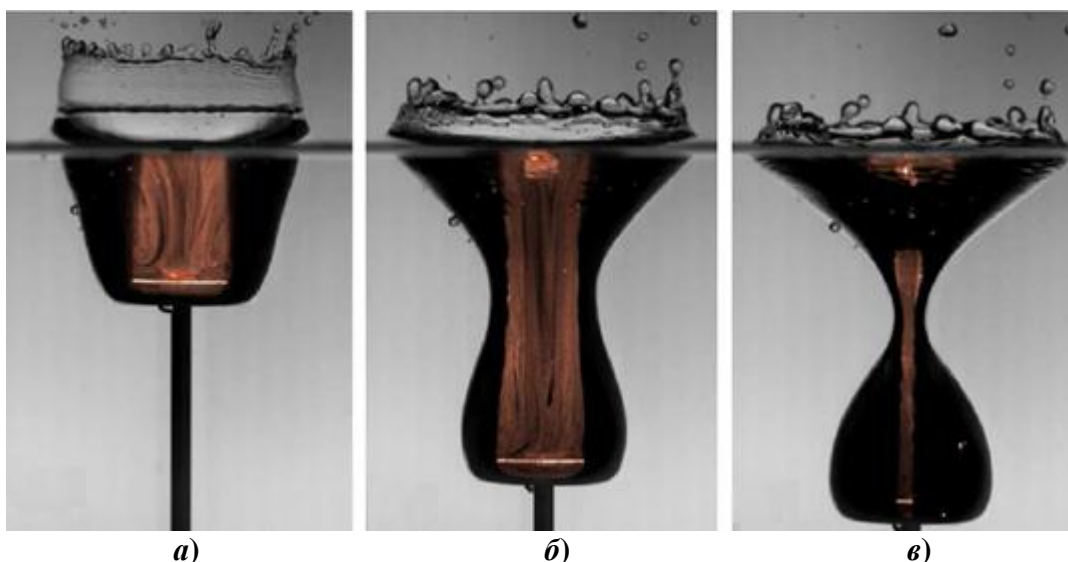


Рис. 9. Стадии образования и схлопывания воздушной полости при падении тела в воду ([86])

Экспериментальные исследования истечения газа из осесимметричной воздушной полости, возникающей при столкновении тела с водой, представлены в [86]. В начале расширяющаяся полость, образованная падением пластинки со скоростью 1 м/с (рис. 9, а), под действием гидростатического давления со стороны жидкости, начинает сужаться (рис. 9, б). Скорость истечения воздуха в опыте, при минимальном диаметре полости образовавшегося «сопла» (рис. 9, в), достигла более чем 300 м/с, что сопоставимо со скоростью звука в воде³. Скорость истечения струи из полости, диаметр которой оценивался с помощью лазера, определялась по скорости микроскопических капель глицерина, за которыми следила камера, производящая 15 тысяч кадров секунду.

Из процесса схлопывания воздушной полости также можно выделить две стадии, которые в итоге и сформируют общую картину на поверхности воды. На первой стадии, после окончательного схлопывания «сопла», на поверхности воды образуется конусообразная каверна (рис. 10, а). Дальнейшая её трансформация за счет гидростатического давления и пото-

³ Пока можно только представить какая скорость этой воздушной струи будет при падении тела в воду со средней скоростью 20 км/с.

ка воздуха, успевшего высвободиться из газового пузыря в виде ударной волны, приведет к возникновению всплеска на поверхности («султана») (рис. 10, б). Вторая стадия представляет собой образование газового пузыря грушевидной формы (рис. 9, в) в котором движется тело. При опускании на дно в пузыре будет происходить нарастание скоростей, его диаметр быстро начнет увеличиваться до определенного предела, а давление падать. Прорыв пузыря может произойти либо в процессе погружения тела, либо при достижении дна. Если это произойдет в процессе погружения, то за телом образуется турбулентный вихревой след с развитой кавитацией (третий гидродинамический поток) (рис. 10, б), состоящий из пары крупных вытянутых вихрей (рис. 10, б), вращающихся в разные стороны. Впоследствии тело продолжит движение до полного погружения независимо от пузыря.

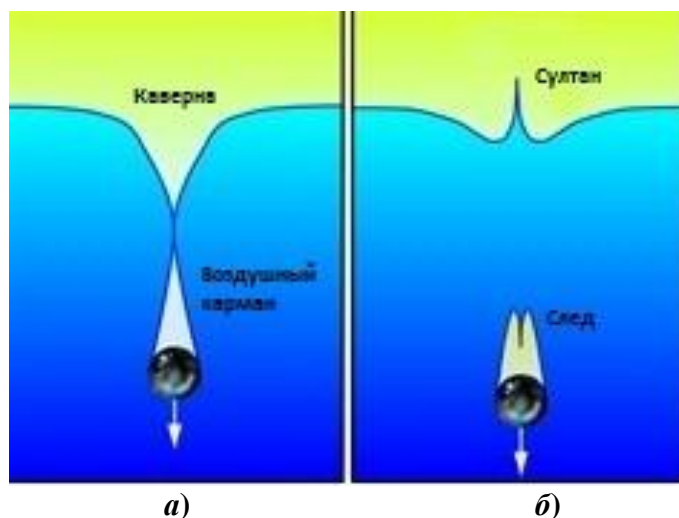


Рис. 10. Завершающие стадии формирования водного кратера:

a – образование «воздушного кармана» в толще воды; *б* – образование следа за телом с формированием «султана» на поверхности

Механизм эволюции самого пузыря в этом случае не очень понятен, но с большой долей вероятности он будет соответствовать описанию схлопывания пузыря в толще воды, представленному в [9]. Согласно этому описанию, пузырь сплющится в нижней своей части, образуя характерную шапку с выемкой выгнутой вверх (рис. 11), что впоследствии приведет к схлопыванию (к схлопыванию, видимо, может привести и процесс отделения пузыря от тела). В момент схлопывания возникнет гидравлический удар, приводящий к струе, имеющей кумулятивный характер и направленной вертикально вверх. Вообще говоря, данная струя также приведет к образованию «султана» на поверхности воды (второго) и по высоте он будет не меньше, чем на стадии трансформации каверны. При этом «вторичных» султанов на поверхности может быть несколько, вследствие разрушения основного пузыря на ряд более мелких (рис. 11) и это справедливо как для маленьких тел большой плотности, так и больших тел малой плотности [120].

Рис. 6, рис. 9 и рис. 10 наглядно демонстрируют различия в процессах кратерообразования в жидкой и твердой средах. В итоге форма 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 немаловажно, от процессов, происходящих в толще воды. Все это, несомненно, повлияет на высоту, форму и скорость распространения волны цунами из источника. Естественно, все эти аспекты нужно учитывать при падении тела диаметром много меньшим, чем глубина океана. Если размер тела сопоставим с глубиной океана, то он просто пробьет толщу воды до дна и процесс обрушения образовавшейся поло-

сти, будет соответствовать процессу трансформации конусообразной каверны на поверхности, описанному в [89, 93–97].

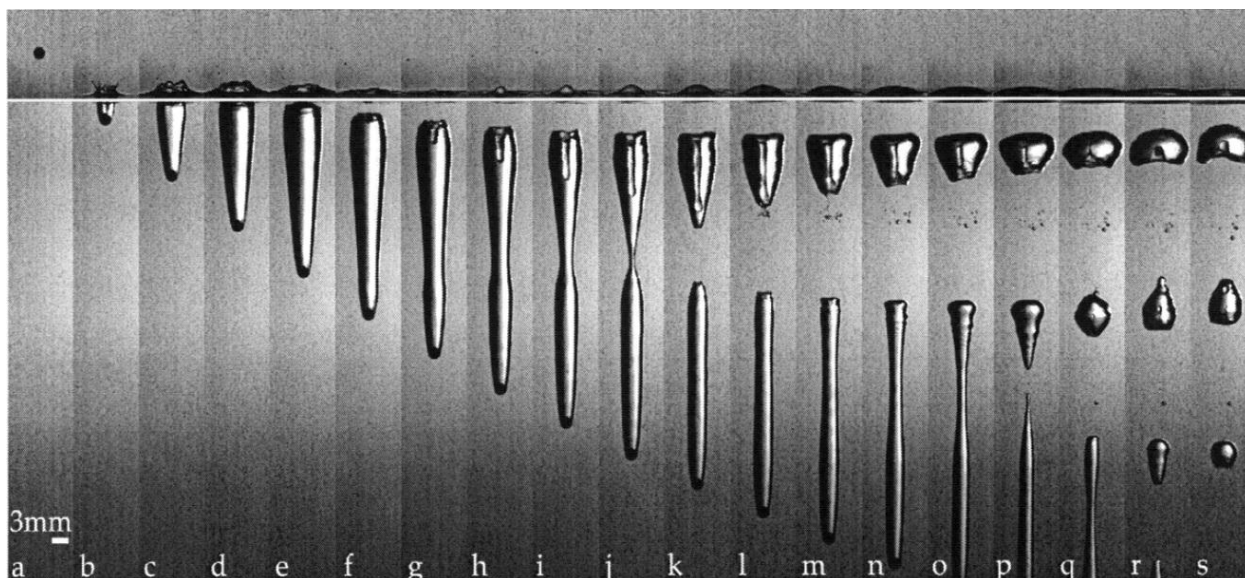


Рис. 11. Картина падения тела малого диаметра и большой плотности в глубокий бассейн [120]

При падении в глубоководный район океана волна цунами, как показывают расчеты [94, 96], 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 наблюдался при образовании кратера Мьолнир диаметром сорок километров в Баренцевом море [96]. Этот кратер был образован 140 миллионов лет назад при падении астероида диаметром 1–3 км в море глубиной 300–500 метров.

Оценка достижения дна астероидом и возможное образование донного кратера приводится в [96]. Для определения влияния толщи воды на процесс кратерообразования на дне, вводится параметр d/H (d – диаметр астероида, H – глубина моря). При $0.1 < d/H < 1$ толщина 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 [96].

Первая волна цунами начнет распространяться уже с начальной стадии падения тела – промежуточного водного кратера (рис. 9, а). Именно такую форму источника в качестве начального возмущения, используют во многих работах по моделированию распространения космического цунами [78, 87, 88, 90, 91]. В этих работах стадия падения и погружения астероида не рассматривается, а форма каверны на поверхности задается с помощью аналитических формул.

Согласно [98], аналитическая формула для мгновенно сформированного падением астероида каверны $u^{imp}(r_0)$ приведет к вертикальному смещению водной поверхности в источнике цунами, которое представляется в виде:

$$u^{surf}(r, t) = \frac{1}{4\pi^2} \operatorname{Re} \left(\int_k e^{i(kr - \omega(k)t)} dk \int_{r_0} u^{imp}(r_0) e^{-ikr_0} dr_0 \right), \quad (2)$$

$$\omega(k) = kc(k) = k\sqrt{gh} \sqrt{\operatorname{th}(kh) / kh},$$

где $r = |\mathbf{r}|$ – радиус-вектор точки, $k = |\mathbf{k}|$ – волновое число, $\omega(k)$ – частота, $c(k)$ – фазовая скорость волны цунами, h – глубина океана (постоянная), Re – означает действительную часть и $u^{\text{imp}}(\mathbf{r}_0) \neq 0$. Используя тождество

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{ik(r-r_0)} d\theta = J_0(kR) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr)J_n(kr_0)e^{in(\theta-\theta_0)} \quad (3)$$

выражение приводится (2) к виду:

$$u^{\text{surf}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \text{Re} \left(\int_0^{\infty} k e^{-i\omega(k)t} dk \int_{r_0} u^{\text{imp}}(\mathbf{r}_0) J_0(kR) dr_0 \right), \quad (4)$$

или

$$u^{\text{surf}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_0^{\infty} k J_n(kr) e^{-i(\omega(k)t - n\theta)} dk \int_{r_0} u^{\text{imp}}(\mathbf{r}_0) J_n(kr_0) e^{-in\theta_0} dr_0 \right), \quad (5)$$

здесь $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$, $J_n(x)$ – цилиндрическая функция Бесселя.

Предполагают, что на начальной стадии кратерообразования метеорит создает радиально симметричную полость, которая может быть описана функцией [60, 98]:

$$\begin{aligned} u^{\text{imp}}(\mathbf{r}) &= D_C (1 - r^2 / R_C^2), & r \leq R_D, \\ u^{\text{imp}}(\mathbf{r}) &= 0, & r > R_D, \end{aligned} \quad (6)$$

где D_C – глубина каверны, R_C и R_D – внутренний и внешний радиусы каверны соответственно.

В случае равенства внутреннего и внешнего радиусов каверны $R_C = R_D$ поверхность представляет собой впадину (рис. 12, а), что соответствует выбросу воды в атмосферу или её испарению [60].

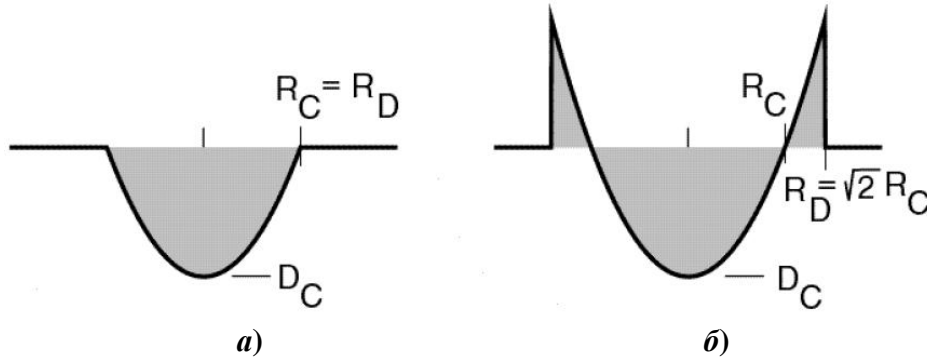


Рис. 12. Начальное возмущение водной поверхности [90]

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.

На основе оценки потенциальной энергии начального возмущения в [98] выводятся простые аналитические формулы для вычисления радиуса и глубины каверны:

$$D_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon\rho_I R_I^3 V_I^2}{\rho_w g R_C^2}}, \quad R_C = R_I \left(2\varepsilon \frac{V_I^2}{g R_I} \right)^\delta \left(\frac{\rho_I}{\rho_w} \right)^{1/3} \left(\left(\frac{\rho_w}{\rho_I} \right)^{1/3 - \delta} \left(\frac{1}{q R_I^{\alpha-1}} \right)^{2\delta} \right), \quad (7)$$

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.

Стадия образования начального возмущения на водной поверхности в исследованиях, связанных с цунами, является самой проблематичной и построение адекватной модели является задачей весьма нетривиальной в силу сложности решения исходных уравнений с одной стороны и отсутствия экспериментальных данных с другой. В проводимых в настоящее время экспериментах, как правило, оцениваются только внутренние геометрические размеры образованной каверны⁴. Такие эксперименты, в большинстве своем, относятся к пробиванию преград и взаимодействия тел на различных скоростях. Они входят в число приоритетных научных исследований многих научных центров и университетов. К сожалению, многие полученные результаты публикуются в труднодоступных изданиях (отчетах), так как выполняются по заказу промышленных корпораций, а доступные данные посвящены исследованию отдельных, порой обособленных друг от друга процессов.

Экспериментальные исследования образования каверны на поверхности воды при падении тела с гиперзвуковой скоростью описаны в [85]. В эксперименте, проведенном в лаборатории корпорации «Боинг», оценивались радиус и глубина каверны, образованная ударом о жидкость стеклянного шарика диаметром 2 миллиметра, движущегося со скоростью 4.64 км/с. В этом достаточно сложном эксперименте использовалась высокоскоростная центрифуга для создания поля тяжести порядка несколько сотен G , чтобы иметь возможность во столько же раз уменьшить линейные размеры экспериментальной области по сравнению с реальными размерами. Данные исследования использовались для калибровки численных методик, используемых для моделирования образования кратера. Форма кратера, полученная численно при использовании различных численных моделей, соответствует каверне, представленной на рис. 12, б, однако экспериментальные данные представлены только для полости, представленной на рис. 12, а. Использование этих экспериментов полезно на стадии калибровки численных моделей, для объяснения же механизма образования земных кратеров применение этих данных некорректно, поскольку здесь исследуются прочностные кратера малого диаметра, морфология которых отличается от крупных гравитационных кратеров [96]. Интересно отметить, что при использовании численной модели, учитывающей свойства атмосферы, результаты калибровки существенно отличаются от тех, в которых атмосфера не учитывается, при этом не в лучшую сторону.

В большинстве работ, в которых исследуется космогенное цунами, используется источник начального возмущения, полученный численным моделированием [89, 93–97]. Численные результаты, полученные с применением сложных нелинейных моделей, вполне согласуются с параметризацией вида (6). Форма самого кратера описывается вполне приемлемо (рис. 13), рассогласование наблюдается при описании внешней кольцевой структуры (рис. 13, а), состоящей из коротковолновых компонентов, которые из-за дисперсии и диссипации не повлияют на волновую картину вдали от источника [60].

Процесс падения астероида в океан сопровождается тремя стадиями, которые могут привести к формированию волны цунами – схлопывание промежуточного водного кратера, схлопывание подводного пузыря, порождающего кумулятивную струю, и процесс образования донного кратера. Сформированная волна цунами, согласно расчетам, может достигать высоты несколько сотен метров и даже нескольких километров [78, 87, 93–97]. При численном моделировании формирования подводной структуры «Элтанин⁵» [94, 96], амплитуда волны цунами достигает более километра непосредственно в месте столкновения, 300 метров на расстоянии 70 км от точки удара и около 10 м вблизи побережья Южной Америки. Для моделирования распространения цунами используется бассейн постоянной глубины. Анализ численных расчетов наклонного падения астероида (15° к горизонту) показывает, что волны цунами являются изотропными.

⁴ Или точнее сказать публикуются.

⁵ Глубоководная структура «Элтанин» образовалась в результате падения астероида в район океана глубиной около пяти километров. Ударное происхождение объясняется присутствием иридиевой аномалии, обнаруженной в донных отложениях и нерасплавленными фрагментами тела размером до 2 см.

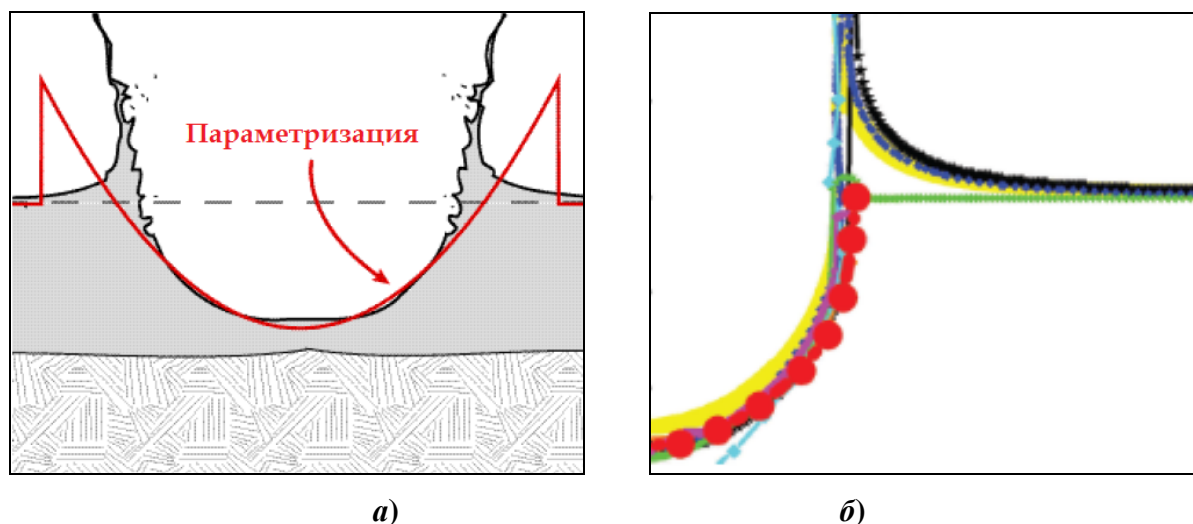


Рис. 13. Сопоставление результатов численного моделирования и параметризованной модели (а) (формула (6)) [98] и сопоставление численных результатов с экспериментальными данными (красная линия) (б) [85]

К настоящему времени не зарегистрировано ни одного космогенного цунами, что не позволяет сопоставить результаты моделирования с натурными данными. Высоты сгенерированных волн, полученные численно, могут быть оценены с помощью эмпирической формулы, выведенной на основании экспериментальных данных, полученных в ходе проведения подводных взрывов [94]:

$$H = 45HY^{0.25}/L, \quad (8)$$

где h – высота волны, H – глубина океана, L – расстояние от источника, Y – энергия столкновения в тротиловом эквиваленте. Оценка высот волны цунами на разных расстояниях от источника при моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» дает хорошее совпадение с данными, полученными по формуле (7) [94, 96]. 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 [121] приводится таблица высот волн космогенного цунами в зависимости от размера астероида, основанной на формуле, выведенной в Лос-Аламосской Национальной лаборатории для оценки высот цунами на расстоянии 1000 км от точки столкновения:

$$H = 1.0081 \times 10^{-5} (d^3 v^2 D)^{0.54}, \quad (9)$$

где d – диаметр астероида, v – скорость астероида относительно Земли, D – плотность астероида.

Калибровка численных методик, предназначенных для моделирования распространения космогенных цунами, может быть проведена и на некоторых доступных экспериментальных данных. В работе [100] экспериментально исследовались гравитационные волны при свободном падении тела на мелкую воду. При этом опыты проводились так, чтобы как можно сильнее проявились эффекты, связанные с конечной глубиной жидкости. Отклонения свободной поверхности регистрировались волномерами, работающими на принципе различимости электрической проводимости воды и воздуха. В приведенных результатах эксперимента 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. В работе также оценивается доля энергии начального возмущения, уносимая на большие расстояния. Показано, насколько сложно чисто теоретически описать гравитационные волны, располагая только данными об энергии падающего тела, если она до-

статочно велика, а в случае падения небесного тела она будет очень велика. Еще один вывод из этих экспериментов говорит о том, что при всей сложности процессов вблизи тела многообразии гравитационных волн на больших расстояниях невелико, т.е. при распространении волн от падения тел с неизвестной массой и скоростью можно исходить из того, что наибольшую опасность представляют 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 в опыте со смещением участка дна бассейна уединенных волн наблюдалось большое количество.

Падение астероида в океан генерирует 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 [89] скорость волн, сгенерированных в результате падения астероида, значительно меньше, чем \sqrt{gh} , а длина в два раза меньше, чем диаметр промежуточного водного кратера. Для формирования источника когерентных волн (такие волны могут распространяться на большие расстояния без существенных потерь энергии) размер промежуточного водного кратера должен быть в 3-5 раз больше, чем глубина океана, т.е. для океана глубиной 4 км водный кратер должен иметь диаметр 20 км. На основе эмпирической оценки диаметр астероида должен составлять 1 км [4].

Численные методы для моделирования распространения цунами сейсмического происхождения опираются на теорию мелкой воды [87], в рамках которой давление является строго гидростатическим и не учитываются дисперсионные свойства волн. Кроме того, в задачах с большими расчетными областями и сложной структурой дна неизбежно будут возникать области, в которых приближение мелкой воды, строго говоря, неприменимо из-за трехмерного характера течения [113].

В работе [93] отмечается, что процесс распространения космогенных цунами при моделировании образования кратера Мьолнир в рамках этого приближения описывается неадекватно. При падении астероидов образуются высокие и умеренно длинные волны, распространяющиеся под влиянием нелинейности и дисперсии. Сгенерированная падением астероида волна может иметь амплитуду в несколько километров, значительно превышающую глубину океана, а ее обрушение может сгенерировать цуг волн высотой, сопоставимой с этой глубиной. Такие волны, являющиеся сильно нелинейными, обрушиваются в открытом океане на участках постоянной глубины при достижении некоторой критической скорости распространения, формируя пакеты волн меньшей длины. Эффекты нелинейности при распространении таких волн на большие расстояния трудновычислимы и они могут быть очень опасны для ближайшего побережья. В связи с этим также интересен вопрос о том, какая часть энергии волны и в какой форме сохраняется после обрушения в открытом океане.

Для описания такого процесса 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 [89], уравнений Буссинеска [81, 93], используют полуэмпирические модели [90, 92, 98], а также уравнений мелкой воды, учитывающие донное трение [91]. В этих расчетах, как правило, глубину океана считают постоянной, не учитывают атмосферу и вязкость воды.

Различные подходы к моделированию космогенного цунами рассматриваются в [88]. 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 [95]. В этих расчетах глубина океана также предполагалась постоянной, а заплеск 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. Воздействие космогенного цунами на побережье Черного моря анализируется в работе [88]. Здесь в качестве источника использовалась аналитическая формула, а распространение моделировалось с помощью двумерных гиперболических неконсервативных уравнений, выведенных на основании теории мелкой воды. В расчетах использовалась реальная батиметрия бассейна Черного моря.

Одновременное моделирование стадии начального возмущения и распространения волны цунами на примере известных исторических подводных образований рассматривается в [94, 96, 97]. Здесь используются уравнения Эйлера, а глубина океана считается постоянной. В этих работах большее внимание уделяется именно 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 [55, 101]. Здесь источник задавался в виде аналитической формулы. По проведенным расчетам получается, что максимальная высота цунами на Японском побережье составит более 60 метров. Возможные последствия для Европы и Америки от падения астероида диаметром пять километров в середину Атлантического океана обсуждаются в [24, 101]. По данному прогнозу цунами наводнят две трети верхней части Восточных Соединенных Штатов Америки до предгорий Аппалач. В Европе самое сильное воздействие придется на Португалию.

Современный обзор по тематике образования космогенных цунами содержится в [60, 68, 81, 83, 87–89]. В этих работах приведены ссылки на большую часть наиболее значимых публикаций, выполненных по этой теме за последние двадцать пять лет. Анализ публикаций показывает, что построение моделей и прогнозирование воздействия космогенных цунами может основываться только на данных численных расчетов. Многое, особенно это касается источника, в этой области еще только предстоит исследовать. 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 в реальных акваториях моделировались только с источником, 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 анализ космогенных цунами.

Полноценное описание воздействия астероида на поверхность океана возможно только при использовании полномасштабной физико-математической модели, 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. Для генерации источника космогенного цунами необходимо решать полную систему уравнений Навье-Стокса с учетом свободной поверхности.

Заключение

В данной работе кратко представлено актуальное состояние в области астероидно-кометной опасности, основные ссылки и ресурсы, необходимые для более углубленного изучения данной проблематики. Представлено описание взаимодействия небесного тела с атмосферой, литосферой и гидросферой и проведен анализ существующих работ в данных обла-

стях, кратко сформулированы не до конца изученные проблемы. Описан механизм кратерообразования в литосфере и гидросфере, а также возможный механизм образования космогенного цунами.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133.

Библиографический список

1. **Хрянина, Л.П.** Метеоритные кратеры на Земле / Л.П. Хрянина. – М.: «Недра», 1987.
2. Сайт компании Minor Planet Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/>. – 08.07.13.
3. Сайт компании NASA Ames Research Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://impact.arc.nasa.gov/>. – 08.07.13.
4. **Paine, M.P.** Asteroid Impacts: The Extra Hazard due to tsunamis // Science of Tsunami Hazards. 1999. V. 17. No. 3. P. 155 – 166.
5. Взрывные кратеры на Земле и планетах: сборник статей. – М.: Мир, 1968.
6. **Кукал, З.** Природные катастрофы / З. Кукал. – М.: Знание, 1985.
7. **Benest, D., Froeschle, C.** Impacts on Earth. – Springer, 1998. 233 p.
8. **Nardo, D.** Comets and Asteroids. – Lucent Books, The Lucent Library of Science and Technology, 2004. 113 p.
9. **Лаврентьев, М.А.** Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 473 с.
10. **Забабахин, Е.И.** Некоторые вопросы газодинамики взрыва / Е.И. Забабахин. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. – 207 с.
11. **Забабахин, Е.И.** Кумуляция и неустойчивость: сборник научных статей / Е.И. Забабахин. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 112 с.
12. **Селиванов, В.В.** Ударные и денотационные волны. Методы исследования / В.В. Селиванов, В.С. Соловьев, Н.Н. Сысоев. – М.: МГУ, 1990. – 256 с.
13. **Зельдович, Я.Б.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
14. **Покровский, Г.И.** Взрыв / Г.И. Покровский. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
15. Вторая конференция по кометной и метеоритной астрономии, Астрон. журн. XIV, № 3, 249 (1937); К.П. Станюкович, В.В. Федынский, ДАН СССР 57, № 2 (1947); К.П. Станюкович, Метеоритика, № 7 (1950); Искусственные спутники Земли, № 4, 86 (1960).
16. **Кринов, Е.Л.** Основы метеоритики / Е.Л. Кринов. – М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1955. – 391 с.
17. **Астапович, И.С.** Метеорные явления в атмосфере Земли / И.С. Астапович. – М.: Физматгиз, 1958. – 640 с.
18. **Glikson, A.Y.** Large (>100 km Diameter) Impact Structures // The Asteroid Impact Connection of Planetary Evolution Springer Briefs in Earth Sciences. 2013. P. 91–100.
19. **Krinov, E.L.** Giant meteorites. – NY.: Pergamon Press, 1966. – 397 p.
20. **Коробейников, В.П.** Тунгусский феномен: газодинамическое моделирование / В.П. Коробейников, П.И. Чушкин, Л.В. Шуршалов // Следы космических воздействий на Землю: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990.
21. **Бронштейн, В.А.** Физика метеорных явлений / В.А. Бронштейн. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
22. **Головизин, В.П.** Несимметричное взаимодействие летящего со сверхзвуковой скоростью тела с взрывными и ударными волнам / В.П. Головизин, И.В. Красовская // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 5. С. 15 – 19.
23. **Барри, Н.Г.** Испарение и разрушение метеорного тела в атмосфере. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissertCat.com/>. – 30.07.13.
24. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from comet-asteroid impacts with earth // Physica D. 1999. V. 133. P. 189 – 198.
25. **Стулов, В.П.** Аэродинамика болидов / В.П. Стулов, В.Н. Мирский, А.И. Вислый. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 240 с.

26. **Chyba, C.F., Thomas, P.J., Zahnle, K.J.** The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. V. 361. P. 40–44.
27. **Melosh, H.J.** Atmospheric breakup of terrestrial impactors // In *Multiring basins*, edited by Schultz P. H. and Merrill R. B. – NY.: Pergamon Press, 1981. P. 29–35.
28. **Passey, Q., Melosh, H.J.** The effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1980. V. 42. P. 211 – 233.
29. **Ivanov, B.A., Deniem, D., Neukum, G.** Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // *International Journal of Impact Engineering*. 1997. V. 20. P. 411 – 430.
30. **Svetsov, V.V., Nemtchinov, I.V., Teterev, A.V.** Disintegration of large meteoroids in the Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131 – 153.
31. **Korycansky, D.G., Zahnle, K.J.** Atmospheric impacts, fragmentation, and small craters on Venus // *Icarus*. 2004. V. 169. P. 287 – 299.
32. **Bland, P.A., Artemieva, N.A.** Efficient disruption of small asteroids by the Earth's atmosphere // *Nature*. 2003. V. 424. P. 288–291.
33. **Григорян, С.С.** О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космич. исслед.* 1979. V. 17. № 6. С. 875 – 893.
34. **Фадеев, Ю.И.** Разрушение метеорных тел в атмосфере // *Физика горения и взрыва*. 1967. № 2. С. 276 – 289.
35. **Клумов, Б.А.** Моделирование долговременных последствий столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером / Б.А. Клумов, В.И. Кондауров, А.В. Конюхов [и др.] // *Докл. РАН*. 1994. Т. 337. № 2. С. 28–35.
36. **Korycansky, D.G., Zahnle, K.J.** High-resolution simulations of the impacts of asteroids into the Venusian atmosphere III: Further 3D models // *Icarus*. 2003. V. 161. P. 244–261.
37. **Roddy, D.J., Schuster, S.H., Rosenblatt, M., Grant, L.B., Hassig, P.J., Kreyenhagen, K.N.** Computer simulations of large asteroid impacts into oceanic and continental sites--preliminary results on atmospheric, cratering and ejecta dynamics // *International Journal of Impact Engineering*. 1987. V. 5. Iss. 1–4. P. 525–541.
38. **Shuvalov, V.V., Artemieva, N.A.** Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. 2002. V. 50. No. 2. P. 181–192.
39. **Тирский, Г.А.** Взаимодействие космических тел с атмосферами земли и планет // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 5. С. 76–82.
40. **Collins, G.S., Melosh, H.J., Marcus, R.A.** Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. V. 40. № 6. P. 817 – 840.
41. **Кузнецов, В.М.** О форме воронки выброса при взрыве на поверхности грунта // *ПМТФ*. 1960. № 3. С. 152– 56.
42. *Действие ядерного оружия.* – М.: Военное издательство МО СССР, 1965.
43. **Saito, T., Kaiho, K., Abe, A., Katayama, M., Takayama, K.** Numerical simulations of hypervelocity impact of asteroid/comet on the Earth // *International Journal of Impact Engineering*. 2006. V. 33. P. 713–722.
44. **Housen, K.R., Holsapple, K.A.** Impact cratering on porous asteroids // *Icarus*. 2003. V. 163. P. 102 – 119.
45. **Wünnemann, K., Collins, G.S., Melosh, H.J.** A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets // *Icarus*. 2006. V. 180. Iss. 2. P. 514 – 527.
46. **de Niem, D. Kührt, E., Motschmann, U.** A volume-of-fluid method for simulation of compressible axisymmetric multi-material flow // *Computer Physics Communications*. 2007. V. 176. Iss. 3. P. 170 – 190.
47. **Chapman, C.R.** The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 222. P. 1 – 15.
48. **O'Brien D.P., Greenberg R., Richardson J.E.** Craters on asteroids: Reconciling diverse impact records with a common impacting population // *Icarus*. 2006. V. 183. P. 79 – 92.
49. **Wetherill, G.W.** Steady state populations of Apollo-Amor objects // *Icarus*. 1979. V. 37. P. 96–112.
50. **Wetherill, G.W.** Where do the Apollo objects come from? // *Icarus*. 1988. V. 76. P. 1 – 18.

51. **Hills, J.G., Goda, M.P.** fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astron. J.* 1993. V. 105. No. 3 P. 1114 – 1144.
52. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from the impact of small asteroids // *Planet. Space Sci.* 1998. V. 46. No. 2–3. P. 219 – 229.
53. **Korycansky, D.G., Asphaug, E.** Impact evolution of asteroid shapes 1. Random mass redistribution // *Icarus.* 2003. V. 163. P. 374 – 388.
54. **Holsapple, K.A., Housen, K.R.** Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling // *Icarus.* 2012. V. 221. P. 875 – 887.
55. **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.
56. Earth Impact Database // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> – 11.11.13.
57. **Simonov, I.V.** The feasibility of using large impact to destroy a dangerous asteroid // *International Journal of Impact Engineering.* 2002. V. 27. P. 293 – 315.
58. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from the impacts of small asteroids // *Planetary and Space Science.* 1998. V. 46. Iss. 2–3. P. 219 – 229.
59. **Pierazzo, E., Garcia, R.R., Kinnison, D.E., Marsh, D.R., Lee-Taylor, J., Crutzen, P.J.** Ozone perturbation from medium-size asteroid impacts in the ocean // *Earth and Planetary Science Letters.* 1999. V. 299. Iss. 3–4. P. 263–272.
60. **Левин, Б.В.,** Физика цунами и родственных явлений в океане / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: «Янус-К», 2005. 360 с.
61. LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://asteroid.lowell.edu/asteroid/loneos/loneos.html>.
62. Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://neat.jpl.nasa.gov/>
63. Planetary Society. Projects on Near Earth Objects.// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://planetary.org>.
64. Asteroid and Comet Impact Hazards (NASA Ames Research Center)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://impact.arc.nasa.gov/>
65. Near-Earth Object Program (NASA, JPL) // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
66. ICARUS International Journal of Solar System Studies // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://icarus.cornell.edu/>
67. Экспертная рабочая группа по космическим угрозам // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard.
68. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
69. Институт астрономии РАН // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.inasan.rssi.ru>
70. **Chapman, C.R., Morrison, D.** *Cosmic Catastrophes.* – NY.: Plenum Press, 1989. 302 p.
71. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986.
72. **Мак-Кинли, Д.** Методы метеорной астрономии / Д. Мак-Кинли. – М.: Мир, 1964. – 375 с.
73. **French, В.М.** Trace of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution No. 954. – Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.
74. **Кашеев, Б.Л.** Метеорные явления в атмосфере Земли. Исследование метеоров № 2 / Б.Л. Кашеев, В.Н. Лебединец, М.Ф. Лагутин. – М.: Мир, 1967. – 260 с.
75. **Кузнецов, В.Н.** Экспериментальное исследование направленного взрыва в грунте / В.Н. Кузнецов, Е.Н. Шер // ПТМФ. 1962. № 3. С. 53–58.
76. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – 536 с.
77. **Morrison, D.** Defending the Earth Against Asteroids: the Case for a Global Response Science and Global Security. 2005. V. 13. P. 87 – 103.
78. **Schuiling, R.D., Cathcart, R.B., Badescu, V., Isvoranu, D., Pelinovsky, E.** Asteroid impact in the Black Sea. Death by drowning or asphyxiation? // *Natural Hazards.* 2007. V. 40. P. 327–338.
79. **Badescu, V.** Risks for poisoning of coastal and inland population due to asteroid impacts in Southern regions of Black Se // *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2008. V. 22. P. 461–476.

80. **Joanson, G.W., Higgins, G.H.** Engineering Applications of Nuclear Explosives: Project Plowshare // *Reviews of Geophysics*. 1965. V. 3. No. 3. P. 365 – 385.
81. **Korycansky, D.G., Lynett, P.J.** Run-up from impact tsunami // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170. P. 1076 – 1088.
82. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. – 276 с.
83. **Adushkin, V.V., Nemchinov, I.V.** Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects, Springer, 2008. P. 1 – 89.
84. **Saito, T., Kaiho, K., Abe, A., Katayama, M., Takayama, K.** Hypervelocity impact of asteroid/comet on the oceanic crust of the earth // *International Journal of Impact Engineering*. 2008. V. 35. P. 1770 – 1777.
85. **Pierazzo, E., Artemieva, N., Asphaug, E., Baldwin, E.C., Cazamias, J., Coker, R., Collins, G.S., Crawford, D.A., Davison, T., Elbeshausen, D., Holsapple, K.A., Housen, K.R., Korycansky, D.G., Wunemann, K.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. V. 43. № 12. P. 1917 – 1938.
86. **Gekle, S., Peters, I.R., Gordillo, J.M., van der Meer D., Lohse, D.** Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact // *Physical Review Letters*. 0031-9007/10/104(2)/024501(4).
87. **Kharif, C., Pelinovsky, E.** Asteroid impact tsunamis // *C. R. Physique*. 2005. V. 6. P. 361–366.
88. **Badescu, V., Isvoranu, D.** Dynamics and Coastal Effects of Tsunamis Generated by Asteroids Impacting the Black Sea // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 1813 – 1834.
89. **Gisler, G., Weaver, R., Gittings, M.** Calculations of Asteroid Impacts into Deep and Shallow Water // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 1187 – 1198.
90. **Ward, S.N., Asphaug, E.** Asteroid impact tsunami of 2880 March 16 // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153. P. F6 – F10.
91. **Isvoranu, D., Badescu, V.** Hydrodynamics of tsunamis generated by asteroid impact in the Black Sea // *Cent. Eur. J. Phys.* 2012. V. 10. No. 2. P. 429 – 446.
92. **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.
93. **Glimsdal, S., Pedersen, G.K., Langtangen, H.P., Shuvalov, V., Dypvik, H.** Tsunami generation and propagation from the Mjølfnir asteroid impact // *Meteoritics & Planetary Science*. 2007. V. 42. No. 9. P. 1473 – 1493.
94. **Shuvalov, V., Trubetskaya, I.A.** Numerical Modeling of the Formation of the Eltanin Submarine Impact Structure // *Solar System Research*. 2007. V. 41. No. 1. P. 56 – 64.
95. **Weiss, R., Wunemann, K., Bahlburg, H.** Numerical modelling 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.
96. **Shuvalov, V.V., Trubetskaya, I.A.** Numerical Modeling of Marine Target Impacts // *Solar System Research*. 2002. V. 36. No. 5. P. 417 – 430.
97. **Shuvalov, V.V., Dypvik, H., Kalleeson, E., Setsa, R., Riis, F.** Modeling the 2.7 km in Diameter, Shallow Marine Ritland Impact Structure // *Earth Moon Planets*. 2012. V. 108. P. 175 – 188.
98. **Ward, S.N., Asphaug, E.** Asteroid Impact Tsunami: A Probabilistic Hazard Assessment // *Icarus*. 2000. V. 145. №1. P. 64–78.
99. **Bobrowsky, P.T., Rickman, H.** Comet/Asteroid Impacts and Human Society. An Interdisciplinary Approach, Springer, 2007. – 546 p.
100. **Букреев, В.И.** 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.
101. **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.
102. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в индийском океане / А.И. Зайцев, А.А. Куркин, Б.В. Левин [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
103. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев, Д.П. Ковалев, А.А. Куркин [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.

104. Куркин, А.А. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, Б.Х. Чой, Д.С. Ли // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 163–172.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

A.S. Kozelkov

EFFECTS, ACCOMPANYING ENTERING OF ASTEROID IN THE WATER MEDIUM

FSUE «RFNC – VNIIEF»

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: In this paper the existing models describing the motion of an asteroid in the atmosphere, water and lithosphere are discussed.

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

Results: A brief overview of the asteroid-meteorite threat to Earth is presented. Formulas to assess the parameters of the tsunami waves caused by an asteroid entering the water are given.

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.