

Юлия Кафтанова

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ



Часть 3

Моделирование аномальных
и экстраординарных природных
и техногенных процессов

- Почему ползут камни в Долине Смерти
- Ударные волны, модель цунами в океане
- Вихри в атмосфере, смерчи и торнадо
- Модель колебаний натянутой струны

Юлия Кафтанова

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Часть 3

Моделирование
аномальных и экстраординарных
природных и техногенных
процессов



ЧП Издательство «Новое слово»
Харьков
2009

УДК 531.0
ББК 22.311
К-305

Кафтанова Ю. В.

К-305 Специальные функции математической физики. Научно-популярное издание. — Х.: ЧП Издательство «Новое слово», 2009. — 596 с.

ISBN 978-966-2046-62-5

Издание рассматривает метод рекуррентных отношений для специальных функций математической физики и особенности использования специальных функций для моделирования различных природных и техногенных процессов.

Часть 1 рассматривает цилиндрические функции Бесселя и Неймана. Часть 2 изучает поведение сферических функций и ортогональных полиномов. Приводятся авторские программы вычислений, написанные на языке JavaScript.

В части 3 изучается применение специальных функций для математического моделирования природных катаклизмов — цунами, землетрясений, торнадо, смерчей и для исследования поведения движущихся камней в Долине Смерти, США. Также строится математическая модель звучания и управления электрогитары с использованием современного аппарата специальных функций математической физики.

Рассчитано не только на специалистов-математиков, но и на широкий круг подготовленных читателей.

УДК 531.0
ББК 22.311

© Кафтанова Ю.В., 1992-2009
© ЧП Издательство «Новое слово», 2009

ISBN 978-966-2046-62-5

Оглавление

Введение	4
Глава 1. «Живые камни» в Долине Смерти, США	
§ 1. Долина Смерти — природный феномен	6
§ 2. Геологические понятия сбросовых структур и рифтовых долин (грабенов)	11
§ 3. Математическая модель, описывающая природу самопроизвольного движения камней по дну сухого озера в Долине Смерти, США	19
Глава 2. Свободно распространяемые ударные волны в сплошных средах	
§ 1. Цунами — страшная разрушительная аномалия	39
§ 2. Математическая модель, описывающая поведение цунами	44
§ 3. Модель поведения приповерхностных сейсмических волн — явление землетрясения	64
§ 4. Модель формирования волн цунами	76
§ 5. Модель распространения волн цунами	107
§ 6. Ударные волны в атмосфере Земли	133
Глава 3. Вихревые ударные волны в атмосфере	
§ 1. Торнадо и смерчи — вихревые природные аномалии	140
§ 2. Модель формирования и поведения торнадо	147
§ 3. Поведение вихрей, смерчей и торнадо	162
Глава 4. Управляемые колебания натянутых струн *	
§ 1. Поведение натянутой струны современных музыкальных инструментов	182
§ 2. Формирование звука современной электрогитары	193
Заключение	254

**Написано нормальным языком
для нематематиков**

*) Глава 4 приводится в полном варианте для музыкантов и меломанов

Введение

В мировой сети интернет регулярно звучат просьбы широкого круга посетителей веб-сайтов и форумов, обращенные к ученым-специалистам, дать те или иные корректные пояснения различным интересным и загадочным явлениями природы.

Один из наиболее распространенных методов — выдвижение тех или иных предположений и гипотез (точек зрения на процесс или явление) с последующей их проверкой на практике. Многие гипотезы, к сожалению, не выдерживают проверку практическими исследованиями и не находят реальных научных подтверждений.

Второй метод демонстрирует более строгий научный подход — это построение корректных и адекватных математических моделей различных физических природных и техногенных процессов и явлений на основе уже имеющихся фактов и результатов практических исследований.

Для описания тех или иных физических явлений в науке, и, в частности, в математической физике, используется понятие математической модели. Для ее построения необходимо глубокое и качественное изучение предмета с целью описания его при помощи стандартного математического аппарата, который также не стоит на месте и постоянно совершенствуется.

В частности, автор данного издания продолжила развитие теоретического фундаментального аппарата специальных функций математической физики, которые позволяют корректно моделировать реальные неидеальные физические процессы с высокой степенью точности — предлагаемый метод рекуррентных отношений был подробно описан в 1 и 2 частях настоящего издания.

Для корректного и правильного применения аппарата математического моделирования требуется, чтобы ученый был не только специалистом в области высшей математики и математической физики, но и досконально изучил описываемое явление с точки зрения смежных дисциплин. Например, если исследуется и моделируется некое загадочное явление из области геологии, математик должен детально и подробно изучить все разделы геологии,

в которых затрагивается и описывается данное явление, и проконсультироваться со специалистами из данной отрасли современной науки — с геологами (теоретиками и практиками). Часто на это могут уйти многие годы работы.

При построении математических моделей исходят не из гипотетических предположений и авторитетных мнений отдельных лиц, а из имеющихся в распоряжении ученых различных специальностей подтвержденных фактов и результатов практических исследований, которые затем анализирует специалист по прикладной математике и математической физике.

Математику не обязательно лично выезжать на место и изучать моделируемое явление — он может воспользоваться результатами наблюдений и прикладных исследований различных людей — как специалистов-физиков, геологов, экономистов и пр., так и простых наблюдателей, которые были непосредственными очевидцами и свидетелями моделируемых явлений.

Математик должен использовать все имеющиеся в его распоряжении описания, фотографии и видеоматериалы очевидцев моделируемых явлений.

Сегодня такие качественные материалы стало возможно получить не только из библиотек, архивов, специальной литературы и учебников, но и из СМИ и мировой сети Интернет. Многие очевидцы детально фотографируют, снимают и описывают любопытные явления, публикуют свои практические наблюдения, фото и видео и вызывают к ученым-теоретикам с просьбами дать корректное пояснение этим загадкам. Автор решила откликнуться на эти запросы и построить математические модели некоторых явлений, которые хорошо описаны, но до сих пор не были корректно смоделированы, и дать **доступное и понятное описание**.

Материал носит научно-популярный характер и рассчитан как на специалистов, так и на грамотных любителей, которые имеют базовое образование и при чтении могут пропускать сложные выкладки и формулы — для них приводится подробное текстовое описание упрощенным и понятным языком в очень схематичном и доступном изложении. Для специалистов гуманитарных специальностей материал данной книги может представлять значительные трудности и сложности.

Глава I

«Живые камни» в Долине Смерти, США

§ 1. Долина Смерти — природный феномен

Вот что пишут об этом интересном феномене в популярных блогах и форумах Интернета.

«Нечто сверхъестественное творится в Долине Смерти штата Калифорния, США. Огромные валуны сами собой ползут по дну сухого озера. К ним никто не прикасается, а они ползут и ползут. Никто не видел, как они движутся.

И все ж они упорно ползут, будто живые, изредка переворачиваясь с боку на бок, оставляя за собой следы, тянущиеся на десятки метров. Что надо этим камням? Куда они ползут? Зачем?

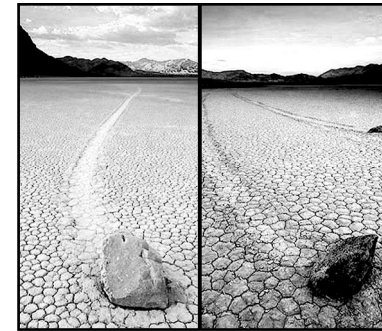
В Долине Смерти в штате Калифорния есть озеро Рейстрэк-Плайя (Racetrack Playa). Глинистое дно Рейстрэк-Плайя почти все время сухое, и ничего на нем не растет. Оно покрыто почти равномерным узором из трещин, образующих неправильные шестиугольные ячейки. Но там есть еще кое-что, намного более интересное.

На дне валяются камни — увесистые глыбы массой до тридцати килограммов. Но на самом деле они там не лежат неподвижно: временами они сами движутся, оставляя за собой на земле неглубокие (не больше пары сантиметров), но очень длинные (до нескольких десятков метров) борозды.

Пока, правда, само движение этих камней еще никто не видел и не заснял на носитель. Но в том, что камни перемещаются по дну озера, сомнений нет — длинные борозды тянутся практически от каждого из них.

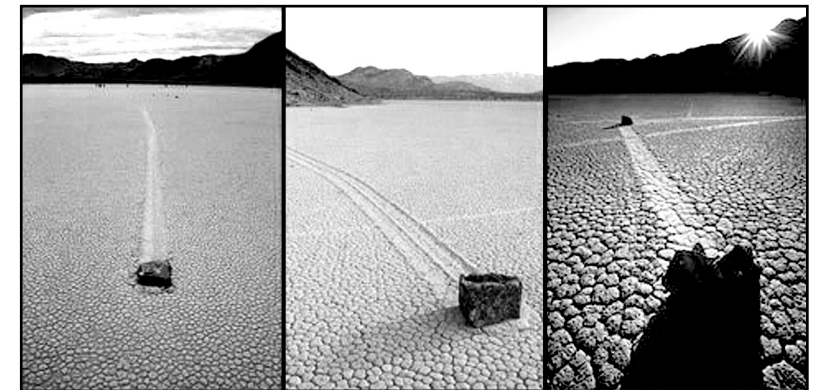
Это не дело рук людей или иных конечностей каких-нибудь других животных. Никого за таким странным развлечением не заставляли (по крайней мере, до сих пор), ибо никому эти обломки не нужны — ни людям, ни уж тем более зверям. Много неясного, очень много...

Эх, жаль, что камни не умеют говорить ... »



Как только не называли эти камни — едущие, ползущие, плывущие, движущиеся, скользящие, танцующие... Без «Rolling Stones»^{*} тут, конечно же, никак не обошлось...

Помимо различных версий, были высказаны соображения, что на перемещение этих камней могли оказывать влияние землетрясения. Однако эту догадку отвергли, так как сейсмическая активность усиливается в том районе крайне редко, к тому же она очень слаба для того, чтобы визуально демонстрировать такое воздействие. Более детальное изучение вопроса сейсмической активности не нашло своего продолжения в XX веке. Поэтому ученые остановились на теории ветров, хотя она не давала объяснений реально наблюдаемым феноменам.



На фото. Лихие виражи, застывшие в глине, и таинственные камни посреди сухого озера. Некоторые камни, находящиеся рядом, движутся параллельно, а другие разъезжаются в разные стороны. Учеными было выяснено, что движение во многом зависит от того, в какой части озера Рейстрэк-Плайя они находятся.

^{*}) «Rolling Stones» — популярная в середине XX века поп-группа, представляющая музыкальное направление рок-н-ролл (классика жанра), название которой в переводе означает «Перекати-поле» или «Катающиеся камни».

Фотографии взяты с интернет-сайтов www.goldcoastgalleries.com, www.pdphoto.org, www.obychnogo.net, фотографии Jon Sullivan, Martin Quinn, Russ Finley, Angelo Cavalli и других используются исключительно в научных целях для изучения и моделирования феномена движущихся камней по дну сухого озера в Долине Смерти, США.

А вот что пишет автор Элеонора Мандалян в Русском Базаре #8 (618), 21-27 февраля, 2008 года на интернет-сайте www.russian-bazaar.com (приводим фрагменты).

«Долина Смерти — земля легенд и нераскрытых тайн. Death Valley — Национальный парк Калифорнии, расположенный между пустыней Мохаве и Большим Бассейном, к югу-востоку от горного хребта Сьерра-Невада, часах в трех езды от Лос-Анджелеса.

Это узкая длинная равнина в межгорной впадине, зажатая сплошной стеной отвесных скал: с запада — хребтом Параминт со вздыбленным почти на 3,5 км в небо пиком Телескоп, с востока — Черными горами. С перевала Dante's View, воздетого на 2-километровую высоту, в седловине Черных гор можно лицезреть всю Долину Смерти.

Такое нелестное и в общем-то незаслуженное название-клеймо Долина получила в 1849 году от рассерженной и утомленной путницы, слишком долго пребывавшей в раскаленных солнцем скалах и потерявшей надежду когда-нибудь из них выбраться.

Она была членом очередной партии золотоискателей, направлявшихся за шальным счастьем с восточного побережья континента на западное, когда золотая горячка сотрясала всю Калифорнию. Испугавшись заснеженных перевалов, люди решили пойти напрямик — через пустыню и, попав в ловушку непроходимых скал, заблудились.

Но самая загадочная, интригующая своей необъяснимостью достопримечательность Долины Смерти — это, вне сомнения, ее пересыхающее озеро Racetrack Playa.

Нечто вроде “Пересыхающего озера-ипподрома”. Ипподрома, гонки на котором устраивают не лошади и не люди, а самодвижущиеся булыжники. И это не аллегория, не художественный образ, а реально существующий природный феномен, известный всему миру, проверенный и подтвержденный учеными. Нечто сверхъестественное, не поддающееся логике, происходит на дне сухого озера.

Туристы сюда добираются крайне редко. В первую очередь потому, что Racetrack Playa находится далеко от всяких путей сообщений даже в Долине Смерти.

На глинистой сухой и безжизненной равнине, покрытой узором из трещин, образующих неправильной формы шестиугольники, разбросаны сотни самых обыкновенных с виду валунов, размером от футбольного мяча до полутонны. Они скатываются с доломитового холма, что с юга обрамляет Рейстрэк-Плайя, и с других прилегающих склонов некогда извергавшихся вулканов.

Почти все эти камни, оказавшись на дне сухого озера, начинают неведомым образом менять свое положение, самопроизвольно перемещаться — поодиночке и группами, оставляя позади себя четко различимый след-борозду, как от проползшей по песку змеи.

Очень однородные по своим геометрическим параметрам борозды тянутся за ними на десятки метров, что свидетельствует о постоянстве и равномерности прилагаемой к ним неведомой силы. Отсутствие рядом со следом камней каких-либо иных следов (что неоднократно подтверждалось даже опытными криминалистами) позволяет однозначно утверждать, что они движутся без посторонней помощи (имеется в виду — без людей или животных) ...»



А вот интересная групповая фотография движущихся камней — и к ней подпись: «Эй! Чур, не подрезать!»

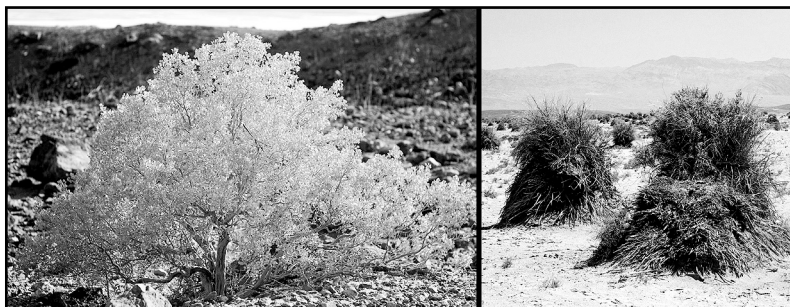
Долина расположена на 86 метров ниже уровня моря и продолжает постоянно опускаться вниз. Она окружена плотным кольцом гор, что и обуславливает своеобразный климат, сухой и невероятно жаркий.

Средняя температура воздуха зимой с ноября по март составляет от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+25^{\circ}\text{C}$, а летом с мая по сентябрь — от $+37^{\circ}\text{C}$ до $+46^{\circ}\text{C}$. Рекорд температуры, отмеченный здесь, составляет $+56.6^{\circ}\text{C}$, а температура песка летом доходит до $+93^{\circ}\text{C}$ (можно даже жарить яичницу).

В континентальной части США калифорнийская Долина Смерти является самым большим объектом Системы Национальных Парков США: ее площадь составляет 1,3 млн. га. Зловещая репутация «гиблого места» и возможность ощутить превосходство Природы над человеком ежегодно привлекают в Национальный Парк «Долина Смерти» более одного миллиона туристов со всего мира.

Парк находится в 230 км от Лас-Вегаса, но большинство предпочитает не посещать это климатически очень тяжелое и жаркое место. Идти через Долину Смерти летом означает верную смерть, поэтому для туристов долина открыта ограниченное число месяцев в году.

Самое низкорасположенное место в Северной Америке — соляное озеро Badwater, соляной бассейн, который летом пересыхает и оставляет после себя толстый слой соли, в котором умудряются выживать некоторые растения.



Вот такое интересное и зловещее место есть в Соединенных Штатах. Хотя феномен движущихся камней описывается не только в Долине Смерти — на сегодня она является самым известным и наиболее посещаемым природным феноменом среди прочих аналогов.

§ 2. Геологические понятия сбросовых структур и рифтовых долин (грабенов)



Перед тем, как давать научные пояснения тем или иным природным феноменам, нужно понять, чем является Долина Смерти в США с точки зрения геологических условий и какие горообразовательные процессы идут в данном регионе.

В учебниках по геологии и даже в школьных учебниках и пособиях Долина Смерти представлена как классический пример геологических сбросовых структур — это так называемая рифтовая долина, которая образовалась в результате разлома в земной коре с последующим проседанием ее центральной части.

Геологические преобразования в Долине Смерти продолжают и по сей день, поскольку все западное побережье обоих материков Америки до сих пор сохраняет свою активность — Черные горы быстро растут, а низина, находящаяся в основном под озером Badwater, опускается. Это самая низкая точка на всем Северо-Американском континенте, находящаяся на 86 метров ниже уровня океана, и вторая — на всем Западном полушарии (первое место принадлежит Гран-Бахо-де-Сан-Хулиан в Аргентине).

В настоящий момент указанные горообразовательные процессы в Долине Смерти не сопровождаются вулканической деятельностью, которой обычно уделяется большое внимание в современной геологии. Нет природных катаклизмов вроде извержений вулканов и излияний потоков лавы. Процессы, идущие в Долине смерти, носят название сбросов.

Сбросы являются так называемыми разрывными геологическими структурами. Эти структуры образуются в тех случаях, когда при подвижках литосферных плит в земной коре горные породы разбиваются крупными трещинами на

гигантские блоки, которые затем перемещаются вдоль трещин относительно друг друга вертикально и горизонтально.

Разрывные структуры могут возникнуть как при интенсивном сдвливании, так и при сильном растягивании и раздвижке пород, под воздействием таких физических деформирующих сил, как сжатие и растяжение. Растяжение, приводящее к разрыву пород, проявляется обычно чаще, при этом возникают разрывные структуры, называемые нормальными сбросами.

Энергию для формирования сбросовых горообразовательных структур природа черпает в энергии непрерывного движения литосферных плит и континентов. В частности, Североамериканский континент движется с востока на запад по направлению к Азии со скоростью около 12-15 см в год под действием глобальной энергии вращения Земли. То есть данный процесс носит глобальный характер, хотя он может иметь и локальные проявления, в том числе в виде разрывов земной коры, и в частности — сбросов.

При сбросе один из блоков соскальзывает с другого вниз и происходит некоторое расширение земной коры в месте ее разрыва. В том случае, когда разрывы пород образуются под воздействием сжатия, один из возникших блоков взгромождается на другой и возникают взбросы (обратные сбросы) или надвиги. При этом в месте разрыва происходит некоторое сокращение земной коры.

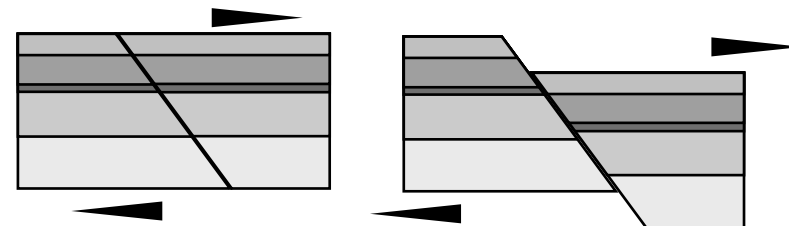
В обоих случаях главным является вертикальное перемещение блоков пород, в отличие от разрывных структур, называемых сдвигами, в которых преобладает горизонтальное перемещение.

Разрывные структуры можно также различать по соотношению их с направлениями простирания и падения пород, в которых они образовались. По величине угла наклона разрывов сбросы, взбросы и сдвиги относятся к крутопадающим, а надвиги и надвиговые покровы к пологопадающим разрывным структурам.

Крупные разрывные структуры, тянущиеся на сотни километров, в большинстве случаев представляют собой не одну линию нарушения сплошности пород, а целую зону нескольких почти параллельных разрывов. Они нередко не проявляются на поверхности в виде четко выраженных обнажений — уступов и обрывов, а носят скрытый характер.

Являясь ослабленными зонами, в которых породы легче поддаются разрушению, они могут быть заняты озерами, оврагами, руслами рек и заполнены выветрелым обломочным материалом (камнями, песком и т.п.).

В подобных случаях для выявления зон разрывных нарушений необходимо тщательно проанализировать и сопоставить состав и условия залегания пород по обеим сторонам долины или оврага.



Нормальные сбросы часто группируются в две параллельные системы разрывов с плоскостями, наклоненными навстречу друг другу, между которыми ступенчато опущены большие блоки пород.

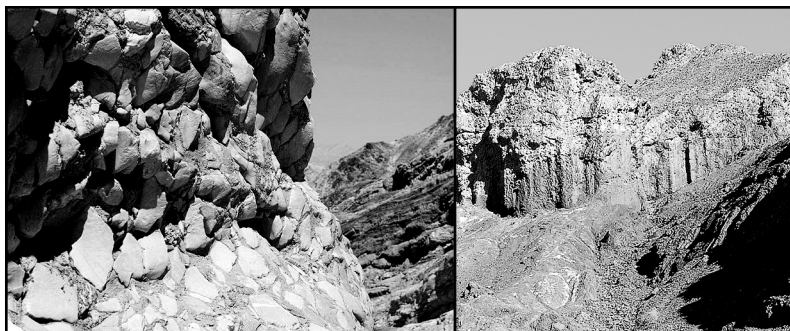
Такие разрывные структуры называются грабенами, или рифтовыми долинами, представляющими собой узкие вытянутые понижения рельефа, в которых обычно развиваются крупные озерно-речные системы.

Одним из канонических примеров рифтовых долин является Долина Смерти, которая образовалась в результате разрыва массива горных пород с их последующим проседанием в районе озера Badwater.

Вдоль плоскостей разрывов часто прослеживаются зоны дробления (шириной от нескольких сантиметров до нескольких метров), заполненные так называемой тектонической брекчией — массой угловатых обломков пород, сцементированных тонким глинистым материалом, которые образуются за счет трения блоков друг о друга.

При отсутствии тектонической брекчии породы в плоскости разрыва могут быть сильно притерты и отполированы или изборождены царапинами. Такие плоскости разрывов называются зеркалами скольжения.

В Долине Смерти на сделанных туристами и размещенных в Интернете фотографиях можно наблюдать оба этих типа плоскостей разрывов.



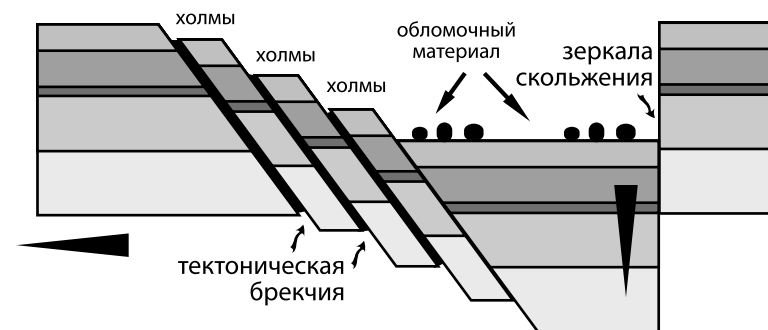
На фотографии слева — обнажение тектонической брекчии в виде фрагментов раздробленных пород, плотно сцементированных друг с другом. Обломки представляют собой раздробленные породы на стыках движения массивов горных пород, которые терлись друг об друга и частично раздробились в местах разрывов. Мозаичный каньон получил свое название из-за строения стенок — они действительно местами выглядят будто бы выложенные мозаикой.

Справа на фото показаны отчетливые зеркала скольжения и крупные вертикальные царапины, образовавшиеся при сбросовом движении массивов горных пород друг относительно друга.

При сбросовых процессах деформирующие силы прикладываются к хрупким породам, которые не могут образовывать складки и сминаться, как например скатерть на столе. В результате породы трескаются и дробятся, как это отчетливо показано на фото.

Брекчии формируются из угловатых обломков и обычно образуются вблизи областей интенсивного физического разрушения (выветривания) горных пород. Большинство брекчий состоит из щебенки, которая накапливается на склонах гор. Брекчии также могут образовываться при движении блоков горных пород вдоль плоскостей разрывов, когда по обеим его сторонам происходит растрескивание и дробление горных пород, а затем раздробленный материал снова цементируется без какого-либо переноса.

Камни, которые скапливаются на дне озера Racetrack Playa, являются продуктом разрушения пород, слагающих окрестные горы, они образовались при разрушении гор и скапливании обломков у подножия на дне сухого озера.



На рисунке приведена схема одного из возможных вариантов формирования сбросовой структуры — рифтовой долины (грабена) в Калифорнии.

В некоторых случаях проседание центральной части сопровождается поднятием окружающих впадину горных структур. Проседание в центре может быть вызвано начальным поднятием (воздыманием) крупных куполовидных антиклинальных структур (складок земной коры) с последующим оттоком магмы от их центральной части, разрывами и проседанием горных пород в центре.

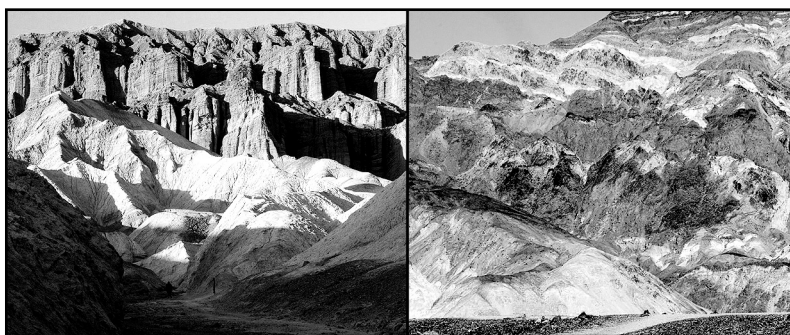
Одна из современных теорий гласит, что процессы горообразования могут быть связаны не только с вращением Земли, дрейфами материков и движениями литосферных плит, но и с циркуляциями магмы под земной корой. В тех местах, где горячая магма поднимается от раскаленного центра Земли восходящими потоками, возникает поднятие земной коры (антиклиналь), а там, где охлажденная магма опускается вниз — прогиб (синклиналь).

Изгибание горных пород в складки (антиклинали) часто приводит к тому, что они начинают растрескиваться точно так же, как это происходит с жесткой резинкой при ее сгибании пополам. Если этот процесс дополнительно сопровождается растягиванием земной коры, есть вероятность формирования рифтовой долины.

Все описанные процессы сопровождаются практически постоянной сейсмической активностью. При проседании и сдвигах блоки горных пород трутся друг об друга и вызывают постоянные сейсмические колебания (вибрации). Эти процессы постоянно регистрируются в Долине Смерти и вокруг нее, хотя эти колебания достаточно слабые.

Если описываемые процессы идут не слишком активно, сейсмическая активность также остается невысокой — люди могут просто не замечать постоянные вибрации и колебания поверхности земли, сопровождающие непрерывные поднятия и опускания массивов горных пород.

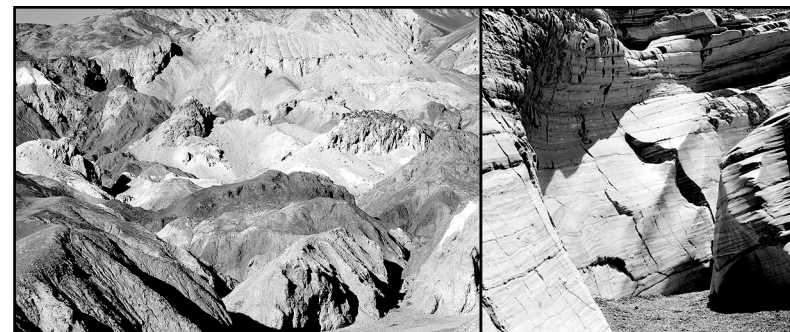
Эти небольшие колебания постоянно регистрируют только специальные приборы — сейсмографы, и только в небольших (в масштабах планеты Земля) окрестностях горообразовательных процессов. Они могут быть зафиксированы, например, в Калифорнии, но не могут быть зарегистрированы в Украине или в России.



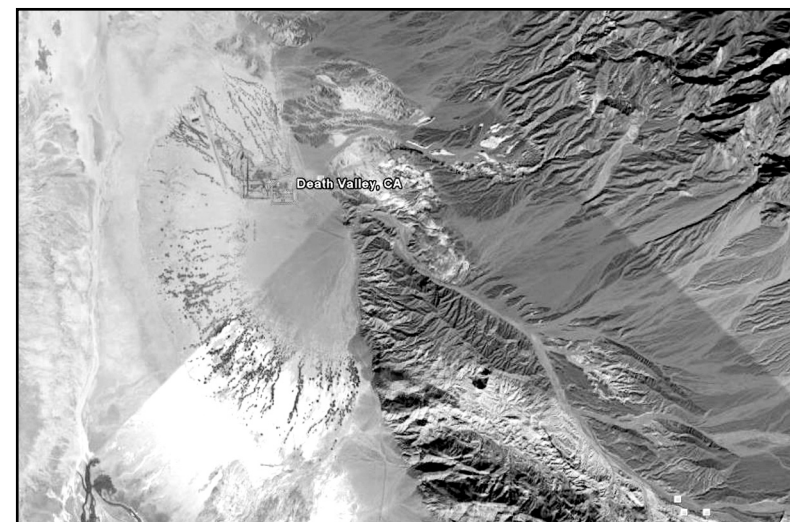
На фотографиях приведены характерные ступенчатые структуры, образованные сбросами, автор Ивашкова Юлия, по материалам интернет-сайта www.world.lib.ru.

В Долине Смерти и ее ближайших окрестностях сейсмографы регистрируют постоянную слабую сейсмическую активность, которая не прекращается ни днем, ни ночью. Ученые также регистрируют факты постоянного опускания центральной части рифтовой долины вниз — горные породы трутся друг об друга, рифтовая долина проваливается все глубже и глубже, формируя характерные ступенчатые холмы и обломочные породы (камни) на дне.

Поскольку поверхностные горные породы Долины Смерти состоят преимущественно из осадочных пород и песка, что хорошо видно на фотографиях, ученые выдвинули гипотезу о том, что на месте Долины Смерти много миллионов лет назад было соленое море. Затем горообразовательные процессы подняли и отрезали эту часть суши от соленого мирового океана.



То, что расплавленный магматический материал много миллионов лет назад проник близко к поверхности Земли, говорят потухшие вулканы и молодые горы, окружающие Долину. Затем на вытянутом вдоль участке мог произойти отток раскаленной магмы. Вулканы постепенно потухли, а центральная часть будущей рифтовой долины откололась и начала постепенно проседать вниз.



На фотографии из космоса показана Долина Смерти вместе с прилегающими к ней участками гор. Достаточно отчетливо видны участки, на которых осуществляется проседание и опускание земной коры.

Участок сдвигающимися камнями находится в узкой части Долины и зажат со всех сторон горами.

Ученые могут попытаться предсказать отдаленное будущее Долины Смерти. Через большой промежуток времени (надеюсь, намного превышающий жизнь человека) либо магма повторно поднимется к поверхности земли, либо рифтовая долина провалится достаточно глубоко — так, что образовавшиеся в результате сбросов разрывы достигнут слоев жидкой раскаленной магмы.

В этом случае магма может начать подниматься вверх и проникать в земную кору по плоскостям сбросов, причем считается, что магматические расплавы прокладывают себе путь прорывом и замещением горных пород в наиболее слабых местах земной коры — по разрывам.

Прорывы магмы в земной коре называются интрузиями. В данном случае они могут иметь плоскую плитообразную форму, по мощности не превышающую нескольких метров, но простирающуюся на многие километры. Вертикальные магматические прорывы (интрузии) называются дайками. Эти дайки могут еще сильнее расширить и увеличить площадь участка земной коры, буквально распирая его.

Интрузии образуются и застывают в глубине земной коры. Магматический материал не изливается на поверхность, а задерживается и медленно застывает внутри земной коры. Более того, магма даже может никогда и не прорваться на поверхность и не излиться вулканами.

Если же магма прорывается на поверхность земли, она образует вулканы и лавовые потоки (эффузии). Для Долины Смерти возможны оба эти варианта развития геологических событий в будущем.

Но есть то, что можно сказать уверенно — в Долине Смерти идут геологические процессы, сопровождаемые постоянной слабой сейсмической активностью и опусканием центральной части Долины Смерти все глубже и глубже.



§ 3. Математическая модель, описывающая природу самопроизвольного движения камней по дну сухого озера в Долине Смерти, США

Движущиеся камни в Долине Смерти — редкое и уникальное природное явление, которое является следствием целого комплекса специфических природных факторов. Никакой фактор в отдельности не позволяет корректно построить математическую модель данного явления, поэтому речь должна идти только о целом комплексе физических условий и предпосылок.

Есть физические предпосылки, которые позволяют камням двигаться по дну сухого озера под действием определенных внешних воздействий.

Исследователи уже смогли выделить ряд факторов, которые содействуют перемещениям глыб. Главный фактор — очень ровное дно сухого озера и достаточно скользкая основа под камнем — смешанная с водой глина.

В пользу этого довода свидетельствует форма следа. Дорожки, которые оставляют за собой камни, имеют четкую форму с ровными краями. Это значит, вначале почва была мягкой, а потом она застыла. Но скользкая основа — это только необходимое, но не достаточное условие подвижности. Без максимального уменьшения силы трения движение камней было бы невозможным в принципе.

В дождливый сезон в углублении озера с глинистым дном скапливается вода, а большие ее объемы сливаются со склонов окрестных гор. Это становится причиной того, что твердая глинистая почва размокает, и коэффициент трения камней о землю резко снижается. В результате под действием некоторой силы может сдвинуться с места и проехать некоторое расстояние даже один из самых крупных камней, весящий порядка 350 килограммов.

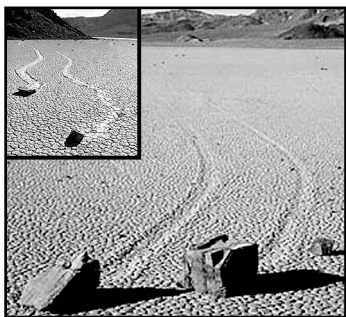
Практика не дала подтверждения тому, что эти камни могут двигаться под действием силы ветра, силы заметных человеку землетрясений, от толчков людей или животных, в следствии электромагнитных взаимодействий или причин мистического характера.

Природа с большой неохотой раскрывает человеку свои загадки и делится с нами своими секретами. Знаменитое сухое озеро находится не просто в труднодоступной с точки зрения климатических условий Долине Смерти.

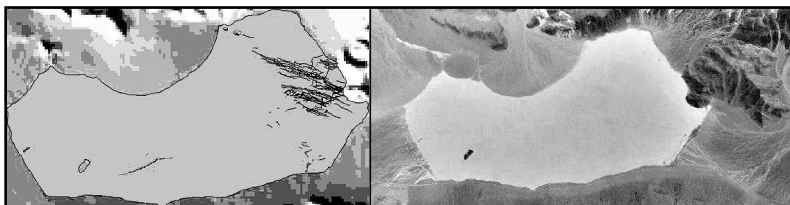
Даже в таком зловещем (со слов очевидцев) месте, как Death Valley, небольшое сухое озеро с двигающимися камнями — одно из наиболее сложных мест, куда может попасть далеко не каждый турист или исследователь. Поэтому так бесценны для науки великолепные фотографии камней, сделанные очевидцами.



Вот так выглядит это знаменитое на весь мир сухое озеро с двигающимися камнями.



Некоторое время назад исследователям удалось зарегистрировать траектории передвижения камней при помощи приборов слежения GPS с последующей компьютерной обработкой и анализом полученных результатов.



Приводим изображение полученных на компьютере фазовых траекторий движения камней по дну сухого озера и фотосъемку озера с прилегающим рельефом.

Перед тем, как описать возможную причину и модель поведения двигающихся по дну озера камней, предлагаю провести небольшой простой опыт в домашних условиях.

Положите на стол мобильный телефон в режиме вибрации (по возможности отключив звук) и позвоните на этот телефон, не поднимая трубку. Поведение телефона будет весьма предсказуемым — он завибрирует и начнет медленно передвигаться (ползти) по поверхности стола, если она достаточно гладкая и скользкая. Чем сильнее вибрация, тем интенсивнее движение телефона.

Аналогично, если к обыкновенному столу прикрутить не самый совершенный электромотор, который вибрирует в процессе работы, и включить его, стол также начнет вибрировать в резонансе.

Если поверхность стола достаточно гладкая, предметы начнут медленно передвигаться по его поверхности в различных, трудно предсказуемых направлениях. Даже если поверхность слегка наклонная, то и в этом случае некоторые предметы могут начать медленно подниматься вверх под воздействием принудительной вибрации поверхности стола, которую может быть не видно глазом, но легко почувствовать, приложив к столу руку.

Расположенные рядом предметы будут передвигаться в сходных направлениях. Чем дальше находятся предметы друг от друга, тем сильнее будут отличаться траектории их передвижений по поверхности стола.

А теперь рассмотрим те физические условия, которые реально существуют в рифтовой Долине Смерти. Как указывалось в предыдущем параграфе, в силу специфических геофизических условий Долина Смерти испытывает непрерывные сейсмические воздействия слабого характера — вибрации, регистрируемые сейсмографами. Иными словами — мелкая и незаметная человеку дрожь земли, порождаемая сбросами и сдвигами блоков горных пород друг относительно друга.

В математической физике точно доказано и описано при помощи соответствующих уравнений в частных производных, что вибрации (колебания) являются одним из эффективных способов передачи энергии в некоторой среде от одного или нескольких источников на большие или малые расстояния.

Энергия передается дискретными порциями (фазами), причем количество фаз соответствует числу физически зарегистрированных или теоретически описанных колебаний, а переданная энергия пропорциональна силе (амплитуде и частоте) колебаний.

Чем сильнее амплитуда, тем мощнее колебания и тем большую энергию они в себе несут. Но даже очень слабые колебания (по меркам рассматриваемой системы) могут способствовать передаче энергии и таким образом направленно передвигать предметы по гладкой и ровной поверхности.

Во время каждой фазы слабого колебания материальное тело испытывает микро-толчок в направлении от источника, телу передается небольшая порция кинетической энергии, которая и заставляет его совершить очень малый такт продвижения вперед от источника. Если же толчок колебания сильный — тогда рывок материального тела можно увидеть невооруженным глазом (так, например, подпрыгивают и двигаются предметы на сильно вибрирующем столе).

При передаче импульса энергии во время одного такта вибрации размещенное на поверхности материальное тело слегка подпрыгивает. Уменьшается площадь контакта тела с поверхностью, уменьшается сила тяжести — а значит, на микроскопически малые доли секунды резко уменьшается и сила трения. Именно в этот момент под воздействием переданного от источника импульса тело совершает некоторое поступательное движение вперед.

Постоянные микро-толчки и вибрации вследствие постоянной легкой сейсмической активности должны испытывать камни на дне знаменитого сухого озера. Дно озера гладкое, ровное и позволяет камням скользить по нему с минимальным трением, а напитанная водой глина точно фиксирует следы передвижения. Фазовые траектории передвижения камней можно увидеть воочию — это оставленные ими полосы на глинистой поверхности сухого озера, похожие на следы движения змей.

Движение камней не видно — но камни движутся. Это значит, что каждый такт продвижения камня очень мал, и его технически сложно зарегистрировать. Но таких микро-передвижений совершается очень большое количество, поскольку фазовые траектории хорошо заметны.

По человеческим меркам,двигающиеся по дну сухого озера камни имеют различные размеры и массу — есть и большие, и более мелкие камни, которые ведут себя на удивление сходным образом.

Но человек, его масса и размеры — не мерило в данной геологической системе. Речь идет об огромной (по сравнению с человеком) гео-тектонической системе рифтовой долины, которая испытывает непрерывные слабые тектонические колебания, распространяющиеся от различных хаотичных точечных или линейных источников на достаточно большие расстояния.

Это объясняет с одной стороны достаточно упорядоченное общее, с другой стороны — хаотичное (стохастическое) движение отдельных камней по дну озера.

Все время трутся друг об друга, разрушаются, скользят и совершают постоянные поддвижки огромные блоки горных пород, по сравнению с которыми загадочные камни в озере — сущие пылинки. В данной глобальной геологической системе размерами и массой отдельных камней можно пренебречь и рассматривать их только в качестве однотипных материальных точек, которые движутся с малым трением под действием тектонической вибрации по ровной гладкой поверхности.

Таким образом, мы приходим к достаточно типичной математической модели, хорошо изученной в математической физике и рассмотренной в части I данного издания — задаче о колебаниях натянутой, закрепленной по краям круглой мембраны и точечной функции источника колебаний (краевая задача Коши для уравнения Лапласа).

Модель представляет собой гипотетическую закрепленную на краях натянутую мембрану, которая совершает очень малые колебания под действием функций различных источников, хаотично проявляющихся с течением времени, по поверхности которой под действием этих колебаний без трения движутся материальные точки.

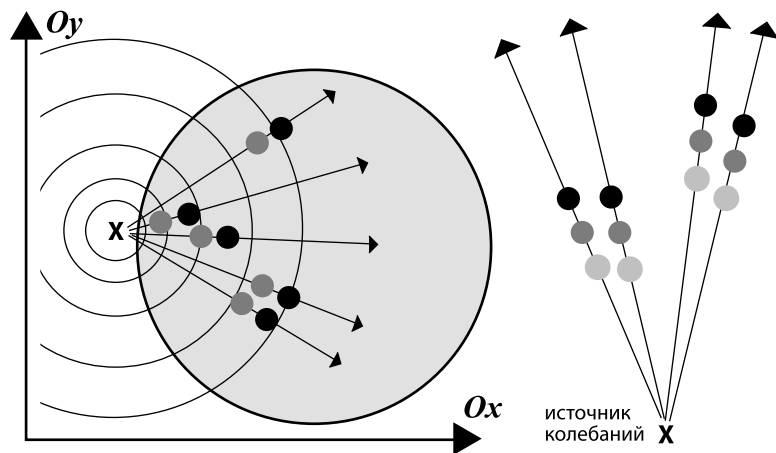
Функции источника колебаний могут быть описаны как набор точечных дискретных функций.

Отличием является то, что источник колебаний мембраны может находиться и за границей математической модели — колебания от тектонических процессов поступают в

систему извне, но могут находиться и внутри рассматриваемой нами системы. Мы имеем цилиндрическую систему координат и уравнение Лапласа, решение которого может быть описано при помощи специальных функций математической физики — цилиндрических функций Бесселя и их асимптотического поведения, а в случае чрезвычайно сильного и мощного землетрясения со значительными подвижками и разломами — при помощи функций Неймана с особенностями.

На границе рассматриваемой системы колебания не гасятся, а продолжают свободно распространяться далее, так как граница носит очень условный характер и отсутствует на физическом уровне (тектонические колебания распространяются в земной коре свободно и беспрепятственно как на сухом озере, так и за его пределами).

Рассмотрим идеальную модель движения набора материальных точек по вибрирующей мембране с точечной функцией источника за границей системы. Колебания в однородной среде распространяются равномерно во все стороны и будут иметь следующий вид:



Очевидно, что если камни движутся под действием только одного источника микро-колебаний, траектории их поступательного движения будут выглядеть таким образом, как это показано на схеме — перпендикулярно волновым фронтам распространения колебаний, расходящихся от источника (по нормали к фронту волны). Мысленное продолжение траектории движения камня в обратном направлении укажет направление источника колебаний.

На фотографиях, сделанных различными очевидцами в Долине Смерти и приведенные в данной главе, можно увидеть, что расположенные близко друг от друга камни имеют достаточно прямолинейные практически параллельные фазовые траектории, которые могут слегка расходиться веером по мере их удаления от точечного источника тектонической вибрации.

На практике же таких источников колебаний может быть несколько, поскольку тектоническая активность в данном регионе высокая. Камни могут начать двигаться под действием одного источника колебаний, а затем активизируется другой точечный источник колебаний, расположенный в другом месте.

В результате камень меняет направление своего движения, и его фазовая траектория претерпевает в этом месте видимый на фотографиях изгиб.

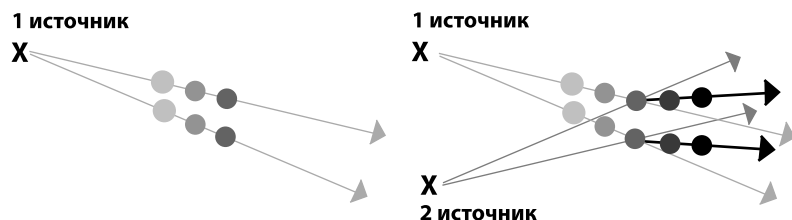


Если на камень воздействуют колебания нескольких расположенных в различных местах источников, то колебания от этих источников складываются — в зависимости от места положения и мощности каждого отдельного источника. В этом случае камень будет двигаться перпендикулярно фронту общей результирующей колебательной волны, сформированной от нескольких источников.

Два расположенных по прямой линии друг напротив друга источника колебаний будут взаимно гаситься. Расположенный рядом с первым второй источник колебаний почти не искажает начальную траекторию движения камня.

Зная месторасположение, количество и мощности источников тектонических вибраций, можно достаточно точно рассчитать направление фазовой траектории движения камней по дну сухого озера.

В то же время обратная задача неразрешима — по внешнему виду фазовой траектории движения одного камня нельзя сказать, сколько источников колебаний ее сформировали, каковы были направление и мощность каждого источника.



Пусть два расположенных рядом камня движутся прямолинейно под действием тектонических вибраций, исходящих из 1 точечного источника, как это показано на схеме. Затем активизируется расположенный недалеко 2 точечный источник вибраций приблизительно такой же мощности, как и 1 источник.

Вследствие этого произойдет сложение колебаний двух источников, и траектория движения каждого камня изменится согласно закону сложения векторов. Результирующая фазовая траектория и новое направление движения камней показано на схеме жирной стрелкой.

На практике за счет реальной инертности камней, ничтожно малой силы воздействия, наличия массы и силы трения камней фазовая траектория будет иметь более плавный и скругленный, а не угловатый изгиб траектории движения. То есть камень будет реагировать с незначительным запаздыванием на изменение воздействия.

На дне сухого озера в Долине Смерти находятся около 200 камней, каждый из которых в определенные временные отрезки описывает свою фазовую траекторию. На каждый из этих камней в определенный временной отрезок воздействует результирующий вектор колебаний от различных фиксированных источников тектонических вибраций, вызывающий их поступательное движение.

До тех пор, пока количество источников не изменяется, система не претерпевает фазовый переход, камни движутся прямолинейно и равномерно каждый по своему результирующему вектору в соответствии с приложенным к нему вектором силы.

Как только какой-либо из источников тектонических вибраций угаснет (исчезает) либо появляется новый источник тектонических вибраций, камни изменят направление своего движения, и их фазовые траектории изогнутся.

Фазовая траектория движения камней в этот критический момент времени (фазовый переход) будет претерпевать видимый изгиб, как показано на схеме. При изменении числа источников произойдет фазовое изменение состояния системы в целом — так называемый фазовый переход, и математическую модель движения нужно будет пересчитывать заново с новыми параметрами.

Данную систему целесообразно рассматривать с точки зрения набирающей популярность теории катастроф, изучающей фазовые переходы системы и поведение системы в стабильном состоянии и при фазовом переходе. В стабильном состоянии при неизменном числе источников все камни движутся прямолинейно и равномерно по результирующим векторам сил, если число источников и их мощность остается неизменными.

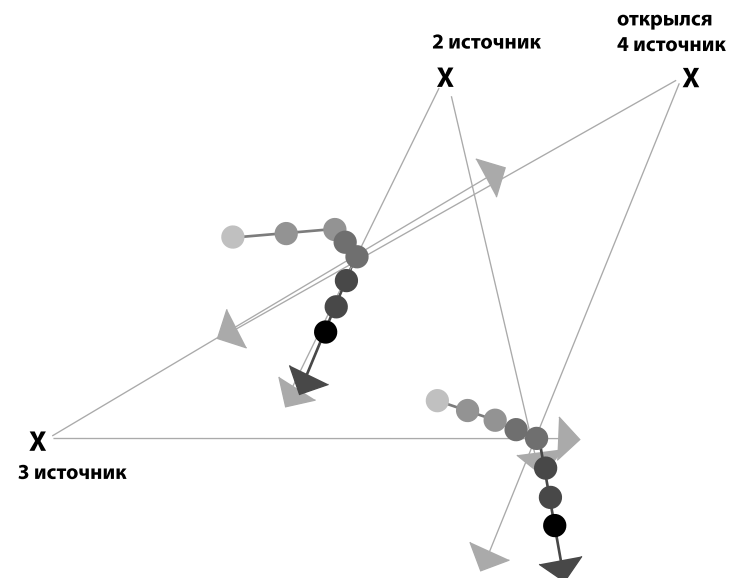
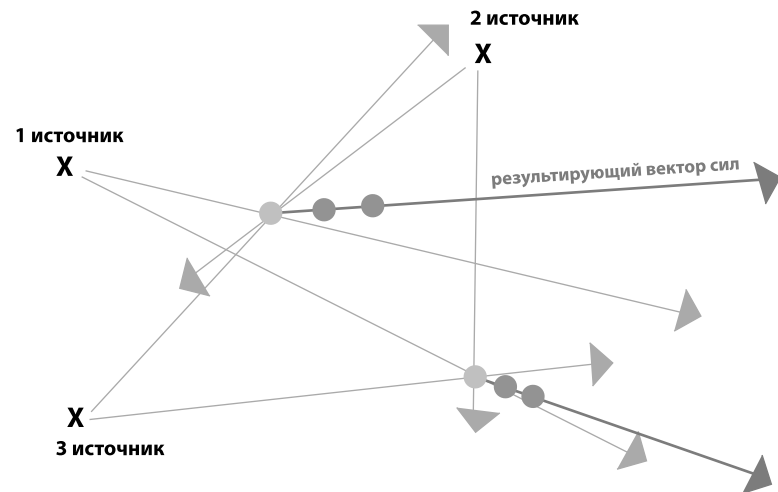
Изменение числа источников энергии нужно рассматривать как фазовый переход системы в качественно иное состояние, при котором траектории движения камней могут изменяться, как изменяются и значения действующих на камни результирующих векторов сил. Такой фазовый переход трактуется как катастрофа, переводящая систему в другое фазовое состояние с точки зрения распределения сил и энергий. При этом потребуется провести заново перерасчет всей системы с новыми показателями векторов сил и новыми начальными положениями камней.

Таким образом, результирующее движение камней в Долине Смерти нужно рассматривать как набор стабильных фазовых состояний системы, претерпевающих регулярные фазовые переходы, изменяющие состояние системы каждый раз при изменении числа и мощности внешних источников тектонических энергий и вибраций.

Если в качестве функции состояния принять результирующий вектор сил, приложенный к конкретному камню, то скачек функции состояния произойдет при изменении вектора сил, связанном с изменением числа и распределения источников тектонических энергий и вибраций.

Именно поэтапное изменение фазовых состояний системы и является причиной столь причудливых и на первый взгляд непредсказуемых движений около 200 камней на дне сухого озера в Долине Смерти, при которых прямые линии сменяются лихими зигзагами и поворотами.

При рассмотрении результирующих вибраций реальной поверхности дна сухого озера мы сталкиваемся с источниками реальных, а не идеальных тектонических колебаний. В нашей упрощенной математической модели каждый источник вибраций имеет в течении некоторого отрезка времени неизменную мощность, он внезапно (скачкообразно) проявляется и затем после некоторого периода стабильности так же внезапно исчезает.

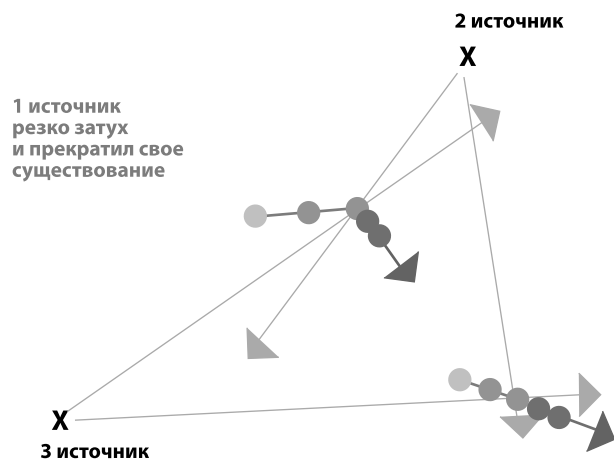


На схемах приведена визуальная векторная модель воздействия сил в течение малых отрезков времени, между которыми были совершены два фазовых перехода и два изменения состояния системы — вначале затух 1 источник, а затем открылся 4 источник тектонических вибраций.

На практике такое случается не часто. Обычно источник тектонических колебаний набирает мощность в течение определенного времени, затем имеет периоды некоторой стабильности, после чего он постепенно затухает.

Если период роста активности и затухания настолько длительный, что камень успевает совершить некоторое видимое движение, его фазовая траектория в этот момент будет иметь более плавный и пологий поворот, чем при скачкообразном изменении силы воздействия. Чем более плавный и пологий поворот имеет фазовая траектория камня, тем более плавным и медленным было изменение мощности тектонических вибраций источника.

Это положение верно только в том случае, если перед резким или плавным изменением мощности источника на камень действовал одинаковый вектор силы. Только в этом случае можно сравнивать скорость изменения фазовой траектории и ее крутизну при повороте движения камня.



Приведенные схемы не могут носить характер строгих научных выкладок, поскольку все расчеты должны выполняться точно, с использованием компьютерных технологий по достаточно корректным формулам и данным.

Но схемы очень наглядно показывают, каким образом происходит вращение одних камней и более плавное изменение траектории движения других камней под действием окружающих их со всех сторон изменяющихся источников тектонических энергий и вибраций.

Автор не обладает точными математическими данными для проведения строгих математических расчетов фазовых траекторий движения камней, но наглядные схемы можно составить и по гипотетическим данным.

Приведем упрощенную формулу для математического моделирования и более корректных расчетов, чем приведенные выше наглядные схемы движения камней по дну сухого озера под воздействием тектонических энергий для каждого отдельно взятого стабильного состояния системы между критическими фазовыми переходами.

Будем предполагать, что дно ровное, масса камней не оказывает существенного воздействия на траекторию их движения, источники вибраций не изменяются количественно и качественно в течение некоторого небольшого отрезка времени, во время которого камни перемещаются.

Будем предполагать также, что на протяжении всей изучаемой поверхности дна сухого озера мощность тектонических вибраций меняется не существенно, то есть на фазовую траекторию движения камней не оказывает существенное влияние степень удаленности камня от того или иного источника тектонических вибраций.

Отметим, что каждый камень движется под действием суммарного импульса сил, полученных от различных источников путем их векторного сложения.

Будем предполагать, что камни не сталкиваются друг с другом, хотя на практике такой вариант тоже возможен — столкновение камней означает катастрофу, изменение фазового состояния и момент фазового перехода системы в новое состояние, даже если функции источников остаются при этом неизменными. Пересечение же самих по себе фазовых траекторий без непосредственного столкновения камней не означает ничего.

Рассмотрению подлежат такие источники тектонических вибраций, которые оказывают существенное воздействие на движущиеся камни. Если источник может привести в движение хотя бы один камень, его необходимо рассматривать. В противном случае слишком слабыми источниками колебаний просто пренебрегают.

Таким образом, в период стабильного состояния системы между фазовыми переходами на все расположенные на дне озера камни действует ограниченное число стабильных источников существенных тектонических вибраций. Сами же камни в это время движутся прямолинейно и равномерно под влиянием этих неподвижных источников энергий.

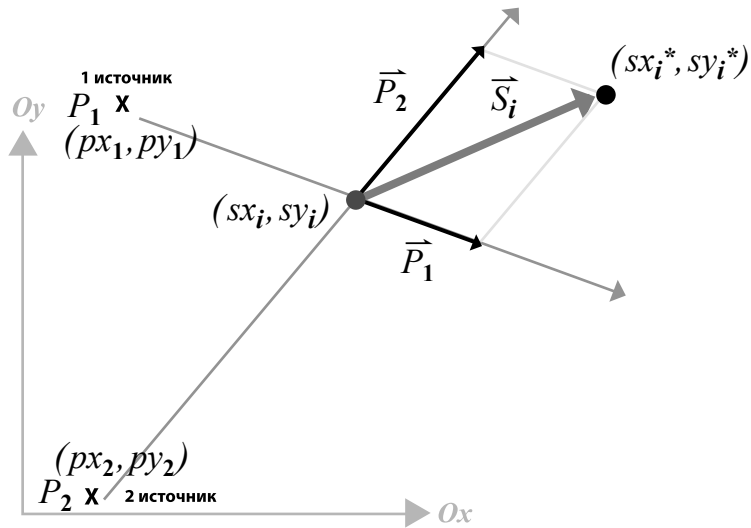
Будем измерять мощность того или иного источника энергии в удобной с практической точки зрения эталонной величине — расстоянии P_k , на которое данный источник сдвигает некий эталонный камень в течение одной единицы времени. Фактически, речь идет о скорости. Всего таких источников в рассматриваемый момент действует n . Чем мощнее источник, тем сильнее он сдвигает камень — и тем выше возбуждаемая им скорость передвижения камня.

Мы получили некую величину P_k для каждого из n источников, которую можно использовать для векторных преобразований. Все величины сдвигов по фазовой траектории отсчитываются от координат источника (px_k, py_k) .

Обозначим местоположение каждого камня в системе в момент начала расчетов в координатах (sx_i, sy_i) , причем в системе рассматривается движение m камней. Каждый камень движется независимо от других камней только под воздействием суммарных сил источников энергий.

Автор не владеет информацией о влиянии площади контакта с дном сухого озера и массы камня на скорость его передвижения и предлагает воспользоваться гипотетическим понятием эталонного камня, который выберут исследователи и примут его показатели за условную единицу.

В качестве эталонного можно рассмотреть наиболее типичный и распространенный тип камня, движущегося по дну сухого озера. Для остальных камней можно использовать поправочные коэффициенты a_j . Можно предположить, что наиболее тяжелый камень имеет более высокие показатели фактической силы трения, и коэффициент будет больше единицы, как и на более сухом дне.



$\vec{S}_i$ — результирующий вектор скорости передвижения камня, который действует на эталонный камень за время ΔT и сдвигает его на некоторое суммарное расстояние S_i .

Воспользуемся правилом сложения векторов $\vec{P}_k$, каждый из которых направлен от источника в сторону изучаемого камня и имеет модуль P_k .

Для удобства введем следующее обозначение:

$$L_k^i = \sqrt{(sx_i - px_k)^2 + (sy_i - py_k)^2}$$

Тогда значение вектора скорости, действующего на камень от одного конкретного источника, можно записать по формуле в координатах как:

$$\vec{P}_k = \frac{P_k}{L_k^i} (sx_i - px_k, sy_i - py_k)$$

Таким образом, результирующий вектор будет представлен суммой всех векторов скоростей, действующий на данный конкретный камень:

$$\vec{S}_i = \sum_{k=1}^n \vec{P}_k \quad \text{— результирующий вектор скорости}$$

Соответственно, новые координаты положения камня через отрезок времени ΔT можно рассчитать, исходя из полученной векторной формулы:

$$\begin{cases} sx_i^* = sx_i + \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{L_k^i} (sx_i - px_k) \Delta T \\ sy_i^* = sy_i + \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{L_k^i} (sy_i - py_k) \Delta T \end{cases}$$

Таким образом, мы рассчитали новые координаты камня, на который действует сила нескольких источников энергии. В зависимости от значений полученной величины новых координат каждый камень будет совершать индивидуальный сдвиг и иметь свою независимую фазовую траекторию движения по дну сухого озера, хотя источники, действующие на все камни, одинаковые.

Если камень существенно отличается от эталонного (движется по более сухому дну, слишком плоский и т. п. причины), полученные в результате вычислений величины нужно разделить на поправочный коэффициент a_i .

Если величина сдвига для некоторого камня по модулю оказывается ничтожно мала, это означает, что на данный камень действует нулевой суммарный вектор энергий и скорости, в результате чего сила воздействия различных источников взаимно погашается. Поэтому этот камень может оставаться неподвижным и находиться в покоем состоянии, в то время как другие камни будут совершать различные движения.

В зависимости от того, по какой геометрии вокруг конкретного камня размещены источники тектонических вибраций, сила их векторного воздействия на данный камень будет отличаться.

Если источники энергии воздействуют в некотором узком секторе и фактически в одном направлении, энергии от таких источников практически не гасят друг друга, а скорости складываются почти без потерь. В этом случае камень продвинется на значительное расстояние и оставит за собой длинный и ровный след фазовой траектории. Такие протяженные и ровные следы можно наблюдать на приведенных фотографиях.

Если же источники раскиданы по всему периметру вокруг камня, энергия некоторых из них будет взаимно гаситься. В этом случае камень продвинется на более короткое расстояние или даже может оставаться неподвижным в случае полного взаимного гашения векторов скоростей.

На следующем временном такте вычисления нужно повторить, исходя из полученных на предыдущем этапе значений. Для реальных практических вычислений удобно использовать предложенную дискретную модель расчетов. Ее можно реализовать программно на компьютере с последующей визуализацией полученных данных.

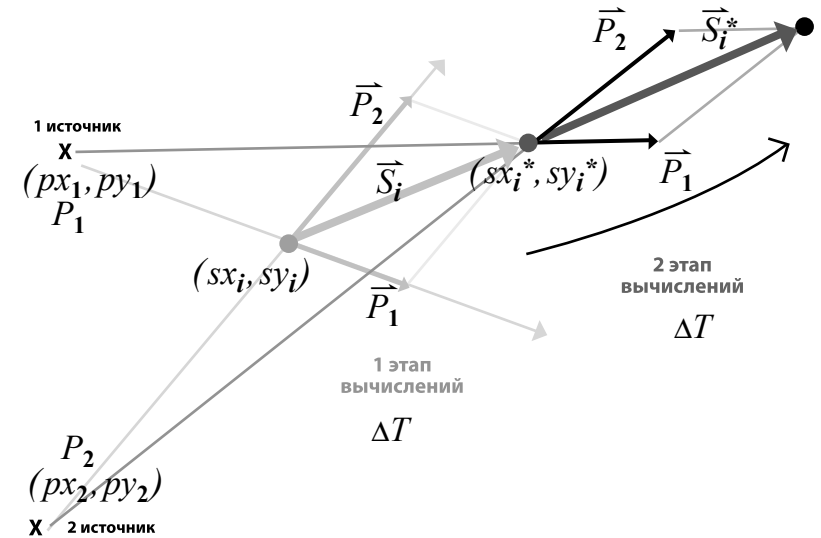
Временной такт нужно выбирать, исходя из соображений разумности и целесообразности. Время ΔT должно быть достаточно большим для того, чтобы камни успели совершить заметное передвижение вдоль фазовых траекторий. Нужно также исходить из физических реалий — все колебания, оказывающие существенное влияние на передвижение камней, имеют некоторую продолжительность по времени и не могут оказать воздействия за слишком короткий отрезок времени.

При этом время ΔT должно быть не очень большим, чтобы в течение этого отрезка можно было предположить, что камни движутся прямолинейно и равномерно и заметно не отклоняются от прямой траектории.

Все источники, которые действуют на протяжении слишком малого временного отрезка по сравнению с выбранным ΔT , нужно исключить из рассмотрения как несущественные, поскольку за время их действия камень не может быть передвинут на некоторое расстояние.

Из этого также следует, что слабые и даже умеренные землетрясения, которые не сопровождаются катаклизмами в виде разломов и разрывов поверхности земной коры, не могут оказать существенного влияния на движение камней ввиду слишком малого времени воздействия на камни.

Краткосрочные землетрясения и тем более отдельные толчки, зафиксированные сейсмографами, должны быть исключены из рассмотрения по указанным выше причинам. Кстати, эти теоретические выводы полностью совпадают с результатами практических наблюдений и идеально согласуются с ними, что подтверждает корректность модели.



На схеме приведены два поэтапных вычисления векторной модели движения камней в течение одного фазового цикла под действием двух источников.

Легко заметить и доказать, что чем удаленнее находится источник колебаний, тем меньшие отклонения претерпевают вектора скорости на каждом этапе вычислений. Если источник удален достаточно далеко, что отклонениями можно пренебречь, можно считать, что под действием этого источника камень не будет отклоняться от начальной прямой траектории на протяжении всего фазового цикла.

Если на камень в данном фазовом цикле действуют только значительно удаленные источники, он все время будет двигаться прямолинейно и равномерно, вычерчивая ровную и прямую фазовую траекторию на дне озера.

Близко расположенный источник энергии будет иметь изменяющиеся направления вектора скорости на каждом этапе вычислений при сохранении модуля. Под действием близкого источника камень может незначительно отклоняться от первоначального направления на каждом этапе продвижения. Его фазовая траектория будет плавно изгибаться весьма характерным образом, показанным на схеме. Подобные фазовые траектории движения камней, имеющих форму плавных и пологих дуг, также можно наблюдать на фотографиях, сделанных очевидцами.

Фазовая траектория под действием близких источников энергии начинает отклоняться и плавно загибаться в сторону этого источника. Чем ближе источник и чем он мощнее, тем сильнее отклонение траектории от прямой.

В практических моделях энергия (а значит и генерируемая скорость) от источника $P_k(t)$ на протяжении всего фазового цикла может изменяться и представляться не константой, а некоторой заданной функцией по времени.

В этом случае нужно корректировать временной отрезок ΔT и выбирать его таким образом, чтобы никакая из функций источников на нем не менялась слишком быстро. На каждом j временном отрезке ΔT значение каждой функции источника можно принять за константу.

Таким образом, результирующий вектор будет представлен суммой всех векторов скоростей, действующий на данный конкретный камень на j отрезке времени:

$$\vec{S}_i = \sum_{k=1}^n \vec{P}_k(t_j) \quad \text{— результирующий вектор скорости}$$

$$\vec{P}_k(t_j) = \frac{P_k(t_j)}{L_k^i} (sx_i - px_k, sy_i - py_k)$$

Соответственно, новые координаты положения камня через отрезок времени ΔT можно рассчитать, исходя из полученной векторной формулы:

$$\begin{cases} sx_i^* = sx_i + \sum_{k=1}^n \frac{P_k(t_j)}{L_k^i} (sx_i - px_k) \Delta T \\ sy_i^* = sy_i + \sum_{k=1}^n \frac{P_k(t_j)}{L_k^i} (sy_i - py_k) \Delta T \end{cases}$$

Безусловно, приведенная автором векторная модель является упрощенной, но она позволяет на хорошем уровне моделировать поведение медленно передвигающихся камней по дну сухого озера в Долине Смерти под воздействием некоторого числа ограниченных внешних источников тектонической энергии.

С точки зрения физики модель позволяет наглядно и корректно объяснить наблюдаемые природные феномены.

Если необходимо строить идеально-точные математические модели динамических систем, изменяющихся быстро и существенно на малых отрезках времени, нужно выписывать уравнение Лапласа в цилиндрических координатах, использовать метод разделения переменных и возможно асимптотическое разложение для цилиндрических функций Бесселя с целью поиска корней, удаленных от начала координат, изучать схему суммирования волновых колебаний и скоростей, и строить к ним точные градиенты.

Все это может представлять такие трудности, которые не оправдываются на практике, а при реальных расчетах вызовут лавинообразное накопление погрешностей вычислений по сравнению с приведенной векторной моделью. Поэтому для реальной физической модели можно обойтись приведенной упрощенной векторной моделью поведения системы, которая достаточно точна, проста и наглядна.

Хочется отметить, что приведенная автором дискретная векторная модель позволяет рассчитывать и моделировать не только движущиеся по дну сухого озера камни в Долине Смерти, но и любые движения материальных объектов под действием слабых и продолжительных по времени источников энергии, которая передается через процесс вибрации и колебаний поверхности или среды. Размерность задачи ничем не ограничена — количество пространственных координат может быть произвольным, в том числе и для объемных и многомерных пространственных ситуаций.



На территории бывшего Советского Союза также есть своя достопримечательность и загадка — это знаменитый исторический Синь-Камень на Плещеевом озере в России.

Представители официальной науки признали факт передвижения этого камня по дну. Синь-Камень (он синего цвета) активно перемещается с течением времени по довольно обширной площади.

Плещеево озеро — это моренное озеро, расположенное на юго-западе Ярославской области России неподалеку от села Городище под Переяславлем-Залесским, имеет площадь 50,8 км, глубину до 25 м и округлую форму. Замерзает озеро в ноябре месяце, вскрывается ото льда в апреле, питание имеет преимущественно снеговое.

В отличие от Долины Смерти, автор лично посетила это интересное с точки зрения истории и физических аномалий место России, говорила с учеными и очевидцами.

Уже более 2000 лет Синь-Камень является объектом религиозного поклонения славян: он лежал на священном холме бога Ярилы и почитался сердцем бога Солнца.

На холме бога Ярилы христиане возвели церковь. Но она сгорела. Соорудили на этом месте дворец князя Александра Невского. И этот дворец разрушился. Христиане, канонизировавшие Александра Невского, построили на этом месте монастырь — и он тоже превратился в прах.

Разгневанный таким поведением камня местный дьякон отец Ануфрий самолично вырыл рядом с камнем глубокую яму и похоронил Синь-Камень. Однако уже через 15-20 лет камень выбрался наверх к Ярилу-Солнцу.

В 1788 году христиане решили заложить Синь-Камень в фундамент церкви или утопить. Погрузили на сани и повезли по льду Плещеева озера, но двенадцатитонный камень ушел под лед, на пятиметровую глубину. А через год рыбаки заметили, что Синь-Камень, медленно перемещаясь по дну, направляясь на старое место. И через пятьдесят с лишним лет он выбрался на берег к подножию Ярилиной горы, где так и остался, уже не став подниматься вверх.

Сегодня Синь-Камень уходит под землю. Такой вывод сделали исследователи на основании последних замеров 1998-2002 и 2004 годов. Информация о Синь-Камне представлена по материалам сети Интернет.

Глава II

Свободно распространяемые ударные волны в сплошных средах

§ 1. Цунами — страшная разрушительная аномалия

Одно из сложных для математического моделирования явлений — цунами. На сегодня уже разработан качественный аппарат общей теории волн, поэтому на компьютере стали возможны визуально-корректные и точные расчеты и отрисовки волновых процессов, в частности — любых волн на поверхности океана и прибрежных волн.

В популярных фильмах-катастрофах цунами визуально моделируют как очень большую и даже гигантскую волну, которая поднимается вверх и сметает все на своем пути. Прообразом этой модели послужили прибрежные волны на тропических побережьях, но это производит огромное впечатление на экране и притупляет чувство опасности при приближении реального цунами.

Однако цунами — это не волна в привычном понимании. Цунами не поддается описанию классических волновых законов и процессов, хотя и моделируется в том числе с использованием классических волновых уравнений.

Цунами — это реализованная в природе особенность волновых процессов, так называемая водная океаническая ударная волна, которая не имеет ничего общего с обычными (пусть даже очень сильными) штормовыми волнами.

«Иной раз, когда стены и крыши уже падали в пыли и пламени, посреди крика и тишины, когда все казалось уже навсегда успокоенным в смерти, выходила из Моря, как последний ужас, Великая Волна, гигантская рука моря, которая, грозно надвигаясь, подымалась вверх, как башня мести, смывая жизнь во всю ширину своего пути».

Так Пабло Неруда описывает в своем очерке «Скитаясь по Вальпараисо» одну из величайших катастроф XX века, произошедшую во время землетрясения 22 мая 1960 года в Чили.

Сведения о встречах человека с волнами-убийцами уходят своими корнями в глубокую древность.

При археологических раскопках поселка Ра-Шамра в Сирии были обнаружены глиняные таблички XV века до н. э. (то есть времени взрыва вулкана Санторин в Восточном Средиземноморье) с клинописным рассказом о том, как «неожиданной волной невиданной высоты» была уничтожена столица государства Угарит.

В Центральной и Южной Японии сохранились записи о цунами с VII века, в Центральной и Южной Америке и на Филиппинах — со времени завоевания этих территорий испанцами (с XVI века), в Индонезии — после прихода сюда голландцев (с XVII века).

Из других районов океана (побережье США, Гавайские острова, Новая Гвинея, Новая Зеландия, Канада) сведения о цунами стали поступать с середины XIX века.

Очевидец цунами 1952 года, разрушившего город Северо-Курильск на острове Парамушир, сообщал: «Через 40 мин. после прекращения землетрясения послышался грохот со стороны океана и на город обрушился водяной вал, двигавшийся с большой скоростью...

Через 15–20 мин. на город (Северо-Курильск) снова надвинулась водяная стена, достигавшая 10-метровой высоты. Она практически смыла все на своем пути, оставляя от строений в лучшем случае бетонные фундаменты.

Из земли были вывернуты и разбросаны по сторонам старые доты, в порту опрокинут экскаватор, а находившиеся там катера заброшены на сотни метров на берег.

Отразившись от окружающих город сопок, волна стала скатываться в низину, где ранее находился центр города. Здесь образовался огромный водоворот, в котором с большой скоростью вращались всевозможные обломки строений и мелкие суда.

Через несколько минут после этой наиболее сильной волны на опустошенное побережье нахлынула сравнительно слабая третья волна...»

Цунами относится к таким страшным и грозным природным явлениям, изучать которые прикладные математики предпочитают на максимально удаленном и безопасном для себя расстоянии — и автор не исключение.

До наступления эры научно-технической революции записи о цунами составлялись исключительно со слов или воспоминаний выживших очевидцев. Сегодня цунами можно сфотографировать или записать на видео.

Если человек находился слишком близко к берегу, он мог погибнуть или покалечиться, но видеозапись и фотографии, сделанные регистрирующими приборами, сегодня технически восстанавливают.

Некоторые репортеры-аматоры успевают отбежать на безопасное расстояние и сохраняют себе жизнь, при этом запечатлев страшные моменты на видео. Все сделанные репортажи о цунами являются бесценными для науки.

Поэтому мы можем воочию увидеть этот страшный момент прихода цунами, просматривая фото- и видеозаписи и не находясь в это время на роковом берегу океана.

Жертвы цунами выглядят ужасающе — складывается ощущение, что по домам, людям и машинам прошел ковш гигантского экскаватора, смял и сломал все вокруг.



Приводим кадры видеозаписей очевидцев, которые демонстрируют приход цунами и его последствия.

И еще видео прихода цунами в город. Это похоже на извержение вулкана, когда лава медленно, но верно продвигается, сметая все на своем пути. Мы видим, как вода переворачивает автомобили, сметает зазевавшихся.



Любительская съемка тайландского бедствия, которую снял немецкий турист. День начинается как всегда. Турист просто стоит на берегу и снимает море. Тут он замечает несколько огромных белых волн на горизонте, которые стремительно и неотвратно приближаются к берегу.

По мере приближения цунами он видит, как гигантские волны крушат рыбацьи лодки и переворачивают большие корабли. Скапливаются люди, начинается паника. Последняя фраза туриста: «Что это такое?», после чего он убегает с берега с остальными туристами. Паника была настолько сильная, что он забыл даже выключить камеру.



На этом любительском видео хорошо виден аномальный отлив перед приходом цунами с последовавшими за ним мощными атаками ударных волн цунами на берег.

Видео демонстрирует, как волна цунами в Таиланде пробивает прибрежную стену, на которой находится оператор. Паника практически отсутствует, люди не могут понять, что это вообще такое. На первую волну они не реагируют, на вторую более мощную волну реагировать становится уже поздно.

2004 год закончился страшным бедствием. Земная кора содрогнулась, и на океанические воды был направлен мощнейший удар. Цунами, обрушившиеся на побережье со скоростью 700 км/час, унесли более 225 тыс. жизней, лишили средств к существованию миллионы людей.

Землетрясение, определяемое магнитудой 9, стало самым мощным из когда-либо происходивших в данном регионе. Подобное наблюдалось только в 1964 году на Аляске.

Подземный разлом произошел в 100 км от берега Суматры, на западной оконечности Бирманской плиты. Длинный тонкий пласт земной коры стал надвигаться на Индийскую плиту, перемещаясь со скоростью 14 мм в год. Бирманская плита продвинулась на запад и вверх по наклонной плоскости примерно на 15 м.

Достигнув отлогих берегов, цунами снизили скорость и, зайдя на мелководье, буквально накрыли ничего не подозревавших людей.

Сначала ими были снесены прибрежные города Суматры, затем, добравшись до Никобарских островов, они смыли все на своем пути. Уцелела лишь горстка людей, которые нашли спасение на вершинах деревьев.

Двинувшись в Андаманском море, смертоносные волны обрушились на отдыхающих в Таиланде. Волна, распространившаяся на запад, пересекла Индийский океан со скоростью реактивного самолета и разбилась у берегов Индии и Шри-Ланки. Шесть часов спустя гигантские волны добрались до берегов Африки, а затем продолжили свой путь вокруг земного шара, пока не рассеялись в океане.

Жителям острова Северный Сентинел удалось выжить. Как и во времена палеолита, здесь люди занимаются охотой и собирательством. Как только начались подземные толчки, они спаслись бегством на возвышенности. «Наши предки учили нас, — поясняет один из племени онге, — что когда трясется земля, море наступает на сушу. Они говорили, что нам надо бежать на холмы или садиться в лодку и плыть в открытое море».

У жителей Андаманских островов было менее часа. И пока люди просвещенного века рылись в телефонных книгах, пытаясь связаться со спасателями, люди каменного века собрали детей, корзинки, сети, луки, стрелы и тлеющие угольки и спаслись на холмах.

§ 2. Математическая модель, описывающая поведение цунами

Ученые всевозможных специальностей — теоретики и практики — стремятся дать различные пояснения природным и техногенным явлениям с точки зрения того научного аппарата, которым они владеют наиболее свободно.

Прикладная математика и математическая физика лежат на стыке многих дисциплин.

С одной стороны, они привлекают совершенный математический аппарат, современные интегральные и дифференциальные уравнения, численные методы и компьютерные технологии для максимально точного описания природных и техногенных процессов.

С другой стороны, прикладной математик как ученый должен досконально изучить не только свою, но и смежную дисциплину, к компетенции которой непосредственно относятся выстраиваемая математическая модель, ознакомиться с существующими гипотезами и не противоречить в своих выводах научным материалам и фактическим данным.

Задача математического моделирования цунами относится к категории чрезвычайно сложных заданий в силу ряда обстоятельств. Над загадками этого явления бьются многие ученые. Автор подошла к данной проблеме с позиции математической физики, волновых и колебательных процессов, специальных функций, теории свободно распространяющихся в сплошной среде ударных и иных волн.

В XX веке был разработан качественный физический аппарат, который описывает ударные волны, возникающие при полете сверхзвуковых самолетов, при истечении из сопла газа на субзвуковых и сверхвысоких скоростях и т. п. явлениях, возникших в связи с бурным развитием технологий. Были получены прекрасные фотографии ударных волн, например, в аэродинамической трубе.

Информация по ударным волнам описываемого типа не составляет никаких секретов, она широко публикуется в открытых источниках.

Все эти ударные волны несут, если так можно выразиться, вынужденный характер. Они существуют практически столько времени, сколько, например, летит сверхзвуковой самолет или истекает газ из сопла, после чего исчезают без глобальных последствий.

Такие ударные волны быстро исчезают после того, как источник прекратил их генерировать. Совершенно иначе ведут себя ударные волны, распространяемые свободно в сплошной среде от точечного и линейного источника.

Свободно распространяемые в среде ударные волны изучались в основном в связи со сверхмощными взрывами ядерного или водородного оружия (наземными, подземными, воздушными и подводными), анализом сейсмограмм сверхмощных взрывов и землетрясений и т. п. тематиками с ограниченным доступом. Автор не ставит своей целью раскрыть те или иные секреты, но намеревается использовать и развивать этот мощный математический аппарат для построения корректной модели поведения цунами.

Никто из ученых не будет оспаривать тот факт, что для формирования цунами требуется чрезвычайно мощный источник энергии. Воды океана поглощают чудовищную энергию источника, переносят ее на значительные расстояния, вызывая этим тотальные разрушения у берегов, морских островов и атоллов.

Одним из таких источников является энергия движений литосферных плит — энергия, высвобождаемая после землетрясений, которые происходят на дне океана. Наиболее страшные цунами были вызваны чрезвычайно мощными землетрясениями и заметными подвижками литосферных плит. Менее мощные цунами также могут быть вызваны сверхмощными взрывами и извержениями подводных вулканов и подобными существенными причинами.

В настоящем параграфе мы не будем вдаваться в детальные подробности изучения источников цунами. Мы будем просто использовать тот факт, что для формирования цунами потребуется энергия колоссальных масштабов, высвобождаемая в воды океана при том или ином аномальном процессе глобального характера.

Энергия свободно переносится на большие расстояния, пока не рассеется в океане или не будет использована на трение — разрушение дна, островов и береговой линии.

С момента образования до полного рассеивания энергия цунами проходит несколько качественных этапов формирования, поэтому данное явление может быть успешно рассмотрено и смоделировано с позиции современной теории катастроф и фазовых переходов.

Каждый фазовый переход в новое состояние должен рассматриваться отдельно и детально, **каждое новое фазовое состояние поведения цунами сопровождается построением собственной математической модели.**

Будем рассматривать модель цунами поэтапно, определяя необходимые и достаточные условия, при которых происходит формирование этой гигантской волны.

От правильного выбора системы координат при построении математической модели зависит степень успеха в решении задачи. Поскольку цунами проходит несколько фазовых переходов, для каждого фазового состояния мы будем строить свою модель и выбирать удобные для ее построения системы координат (в т. ч. движущиеся).

Источник, который формирует цунами, является не только достаточно мощным, но и действующим в течение малого отрезка времени (по сравнению со временем существования цунами). Можно утверждать, что источник в математической модели является точечным по времени и поэтому описывается дельта-функцией Дирака.

С точки зрения физических условий источник является либо точечным (эпицентр), либо линейно-протяженным на ограниченное расстояние. Для упрощения моделирования будем рассматривать точечный источник, описываемый дельта-функцией Дирака.

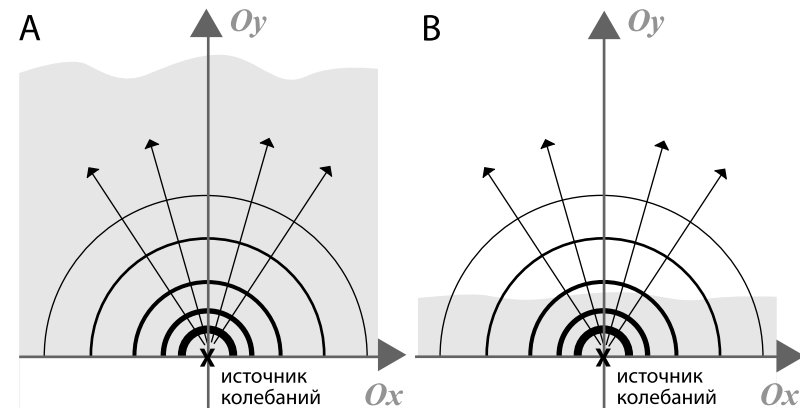
Таким образом, как с точки зрения времени, так и с точки зрения пространственных координат функция источника для цунами может быть описана и представлена как дельта-функция Дирака.

Установим, при каких условиях цунами не формируется. Из математической физики хорошо известно, что в пространстве активный точечный источник энергии формирует волны и колебания, описываемые каноническим уравнением Лапласа и краевой задачей Коши.

Решение уравнения Лапласа может быть представлено методом разделения переменных в сферических координатах

и выражается через специальные — сферические функции матфизики и через тригонометрические функции.

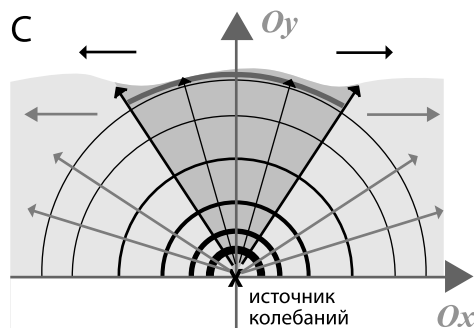
Волны в свободной однородной среде распространяются сферически и равномерно во всех направлениях, при этом мощность энергии на фронте волны постепенно угасает (пропорционально квадрату расстояния от источника). При этом общая энергия расширяющейся сферической волны, распространяющейся без трения, остается неизменной.



Рассмотрим два варианта распространения расходящихся сферических волн в среде. В случае «А» мы имеем некий источник, породивший волны, энергия которых не достигла поверхности или дошла до нее в ничтожно малых количествах, практически рассеявшись в сплошной среде.

Это может быть очень слабый источник, расположенный на малых глубинах — примеров много. Это также может быть достаточно мощный источник, который находится так глубоко, что расходящиеся от него волны не достигают поверхности. Например, даже волны сильного землетрясения на самом дне глубочайшей Марианской впадины вряд ли имеют шансы достичь поверхности океана.

В случае «В» противоположная ситуация — расходящиеся от источника волны не только достигают поверхности, но большая часть их энергии выплескивается за пределы океана. Почти вся энергия покидает океан и разрушает при этом непрерывную структуру поверхности. Такой процесс может вызвать сильное и мощное поверхностное волнение, описываемое каноническими волновыми уравнениями, но он не может сформировать классическое цунами.



Остается рассмотреть только случай «С», который и является моделью, описывающей начальный этап формирования волны цунами.

Представим, что расходящиеся от источника сферические волны успешно достигают поверхности океана.

При этом не происходит ни чрезмерно больших потерь энергии на рассеивание, ни выплескивания большого количества энергии на поверхность и за пределы океана.

В данной модели значительная часть энергии сферически расходящихся волн достигает поверхности океана — то есть границы сплошной среды, в которой эти волны ранее распространялись свободно и равномерно. Более того, энергия сферических волн не теряется на ощутимые поверхностные разрушения и локальные процессы.

На данном моменте нужно остановиться подробнее, так как именно он является первым фазовым переходом и критическим моментом физического формирования волны цунами, которая далее будет совершать свое разрушительное шествие по океану.

В соответствии с законом сохранения энергии, при достижении поверхности океана энергия сферических волн никуда не девается и не исчезает, а только переходит из одного состояния в другое. В данном случае, она аккумулируется в соответствии с приведенной схемой.

Поднимающаяся вверх составляющая сферических волн достигает поверхности океана, формирует очень пологий горб и соответственно тормозится, так как не может свободно продолжать свое движение далее.

На схеме указанная зона отмечена более темным цветом — она напоминает темный клин.

Последующие волны настигают первые волны и их схлопывают. Вместо гладких и непрерывных функций, описывающих последовательно идущие сферические волны,

у поверхности океана на пологом горбу возникает разрывная функция скачка — ударная волна. Ее производная — разрывная дельта-функция Дирака, терпящая бесконечный разрыв. На схеме «С» поверхность ударной волны обозначена жирной темно-серой кривой, которая находится около поверхности океана в закрашенном секторе.

Показанная на схеме ударная волна формирует очень пологий и невысокий холм на поверхности океана и оказалась носителем почти всей энергии, которая прошла через закрашенный на схеме клин. Более того, вся эта колоссальная энергия оказалась сконцентрирована в очень узкой приповерхностной зоне океана и описывается разрывной функцией состояния.

В частности, на приведенной автором гипотетической схеме момента формирования цунами приблизительно 30% всей энергии, выброшенной в океан и равномерно распространившейся от источника в виде сферических волн, было затрачено собственно на формирование ударной волны и холма цунами на поверхности океана.

На сегодня существуют самые разные гипотезы, описывающие поведение молекул воды и воздуха вблизи ударной волны. Автор оставляет этот вопрос физикам-теоретикам, экспериментаторам и ученым-океанологам, сконцентрировавшись исключительно на проблемах построения математической модели и описания поведения целевых функций этой модели.

Заметим, что при формировании ударной волны стартово она получает некоторую начальную скорость, которая несет в себе суммарную горизонтальную векторную составляющую скорости и энергии сферических волн источника. Ее направление указано черными стрелками над поверхностью океана.

Большая часть горизонтальной составляющей ушла на формирование фронта ударной волны, так как энергия расходящихся сферических волн не смогла покинуть границу сплошной среды — океан.

Осталось рассмотреть те части сферических волн, которые не участвовали в формировании ударной волны у поверхности океана. На приведенной схеме зона их распространения окрашена более светлым оттенком серого и несет примерно 60-70% энергии, выброшенной в океан.

Горизонтальная составляющая скорости движения этих волн имеет большие значения, чем у волн, участвовавших в формировании ударной волны. Волны в светлоокрашенной зоне имеют возможность распространяться в сплошной среде океана и в дальнейшем, не схлопываясь и не формируя ударную волну.

Часть энергии этих волн будет продолжать распространяться вдоль дна океана, однако по мере удаления от источника энергия постепенно начнет все больше и больше концентрироваться в приповерхностных слоях океана, формируя классическую большую волну.

Таким образом, в момент формирования ударной волны произойдет отрыв той части волн, которые еще не достигли поверхности океана, после чего процесс перераспределения энергии разделится на два фактически независимых процесса.

Часть энергии будет сконцентрирована и переноситься приповерхностной ударной волной — собственно, цунами, а оставшаяся энергия будет продолжать классически распространяться в сплошной среде по волновым законам.

Ударная волна получит меньшую стартовую скорость, классическая волна — большую, причем распространяться они начнут в одном направлении. Перед ударной волной будет двигаться классическая очень большая волна.

Внешне похожие на цунами большие и пологие, но не ударные волны могут быть сформированы другими природными катаклизмами. Например, сильные тропические тайфуны за счет мощного разрежения атмосферы в центре при прохождении над океаном иногда формируют огромный пологий водяной холм — в окрестности эпицентра они поднимают уровень воды в океане на 1-3 метра. Эти гигантские пологие волны перемещаются вместе с тайфуном, пока его сила не ослабеет. Она может намного превышать размеры и объем волн, формируемых цунами, вызывая страшные наводнения и разрушения.

Хотя формируемые тайфунами волны не являются ударными, это не говорит об их безобидности. Крупные тайфуны приподнимают и перемещают за собой колоссальные массы океанической воды, которая может обрушиться на побережье и вызвать страшные наводнения в прибрежных зонах, затопить плоские острова и берег.

Математическая модель подобных аномалий резко отличается от модели поведения цунами, так как она описывается каноническими волновыми уравнениями и не содержит разрывных функций. Систему координат нужно выбрать таким образом, чтобы она перемещалась вместе с центром тайфуна — и мы получим образ хорошо изученной стоячей волны в цилиндрических координатах, описываемой при помощи уравнения и функций Бесселя.

Вернемся к анализу цунами. Сразу за формированием ударной волны и пологого холма на поверхности океана следует второй фазовый переход, означающий начало движения волн цунами от источника до тех пор, пока эти волны не погаснут или не столкнутся с препятствием в форме береговой линии или островов.

Эти два фазовых перехода состояния следуют подряд практически один за другим. Формирование ударной волны происходит в такие ничтожно малые мгновения по сравнению со временем жизни цунами, что в математической модели ими можно пренебречь.

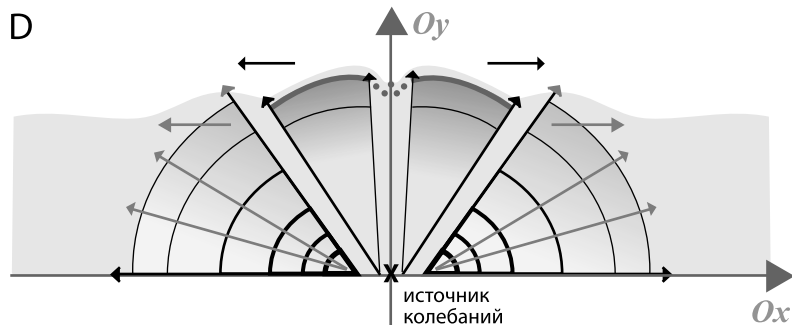
Но на практике данный процесс совершается в течение некоторого ненулевого времени, и между двумя описываемыми фазовыми переходами реально проходит малый — но все-таки ненулевой отрезок времени.

Именно поэтому два фазовых перехода нужно разделять и изучать отдельно, как изменение двух фазовых состояний системы. Именно этот аспект и является наиболее ответственным при формировании математической модели общего поведения цунами в океане.

Рассмотрим подробнее, что происходит во время второго фазового перехода, когда сформировавшиеся волны цунами начинают свое движение в океане.

Можно заметить, что в момент формирования ударной волны — во время первого фазового перехода — формируется единый пологий холм на поверхности океана, который и является носителем цельной приповерхностной ударной волны цунами.

Горизонтальная векторная составляющая его скорости сразу же заставляет двигаться объект одновременно в противоположных направлениях, что почти мгновенно вызывает его физический разрыв (в данной модели это происходит строго по центру).



Стоит отметить, что с точки зрения моделирования ударная волна ведет себя не так, как обычные жидкости или газы — **ударную волну как математическую модель необходимо рассматривать только в качестве гипотетической упругой поверхности или тонкой мембраны.**

Жидкости и газы в малой окрестности ударной волны ведут себя, как тонкие твердые (или почти твердые) и упругие тела, а не как привычные жидкости и газы.

На обложке книги приведена фотография ударной волны самолета при преодолении им сверхзвукового барьера — миниатюрные белые турбулентности и завихрения воздуха вдоль фронта ударной волны напоминают натянутую мембрану. Да и в отношении самолета фронт ударной волны ведет себя сходно — как очень жесткая и упругая мембрана, препятствующая полету и резко увеличивающая трение (сопротивление) на сверхзвуковых скоростях.

Отмеченные на схеме «D» сектора носят очень условный характер — они служат для понимания, какие элементы и участки сферических волн схемы «C» участвовали в формировании ударной волны и как рассматриваемые участки поведут себя через малый промежуток времени — в момент второго фазового перехода.

Направленные в противоположные стороны вектора скоростей разрывают цельную похожую на мембрану поверхность ударной волны, разделяя ее на приведенной схеме «D» на две расходящиеся части.

Ударная волна должна моделироваться как упругая тончайшая энергетическая мембрана. При ее локальном разрыве и разрушении высвобождается некоторый запас ранее

поглощенной этой ударной волной энергии — опять таки, строго в соответствии с законом сохранения энергии.

Если разрушаемая зона невелика, потери энергии при данном процессе будут незначительными. Если площадь ударной волны очень большая, то незначительное ее разрушение в локальной окрестности качественно не ослабит энергию и волны цунами, расходящиеся в противоположных друг от друга направлениях.

Если же окрестность разрыва будет близка к площади сформировавшейся ударной волны, ударная волна окажется разрушена — и цунами прекратит существование.

На приведенной схеме на разрыв и разделение расходящихся в разные стороны волн цунами было затрачено порядка 5% длины ударной волны.

Высвобожденная во время разрыва и второго фазового перехода энергия будет направлена на придание возмущения поверхности океана — то есть на классические хорошо изученные и описанные волновые процессы в цилиндрических координатах. Волны, несущие в себе заново освобожденную энергию, будут расходить в разные стороны, двигаться медленно и независимо от первых двух волн, несущих основной заряд энергии цунами.

Если берег, на который накатывает волна цунами, не слишком удален от эпицентра, оставшиеся в живых очевидцы через некоторое время после прихода цунами смогут наблюдать более слабую третью волну. Она придет как будто независимо от первых двух, с заметным запаздыванием — после удара основных волн.

Если же эпицентр цунами достаточно удален от берега или прикрыт другими объектами, очевидцы могут не заметить угасшей с расстоянием или просто не дошедшей до них третьей — заключительной волны цунами.

Вследствие второго фазового перехода первая и вторая волна цунами начинают неотвратимое движение вдоль поверхности океана, пока их энергия не будет рассеяна в океане или пока не будет израсходована на трение — то есть на разрушение объектов суши и дна.

Поскольку ударная энергия волн цунами сосредоточена в приповерхностном слое, в открытом океане цунами не представляет опасности для надводных кораблей.

Поэтому у кораблей и лодок есть возможность спастись во время цунами, если они успеют уйти на безопасное расстояние в открытое море от берега и рифов.

Волны цунами в открытом океане представляют собой очень пологие холмы, которые распространяются с высокой скоростью. Суда чаще всего не замечают проход под ними цунами. Практические наблюдения пока хорошо согласуются с приведенной в данном параграфе математической моделью.

Совершенно иначе волны цунами ведут себя в отношении подводных лодок в океане, для которых они могут представлять значительную опасность. Наиболее оптимальным вариантом спасения от цунами в открытом океане должно быть немедленное всплытие подводной лодки на поверхность, где ей ничего не будет угрожать. Подводная лодка может попытаться лечь на дно, в небольшую впадину или углубление, над которым ничего не нависает — в районе дна энергия движения подводных волн минимальна.

На незначительном удалении от эпицентра энергия первой волны распределена более равномерно в океанической толще, поэтому она представляет значительную угрозу в том числе и для подводных лодок, и для других объектов, расположенных под толщей воды.

Первая и вторая волна цунами недалеко от эпицентра могут двигаться независимо друг от друга и не успеть образовать парную систему-тандем, так как еще не произошло перераспределение и концентрация энергии в приповерхностном слое океана.

Безусловно, волны цунами возле эпицентра представляют значительную опасность. Идущая первой классическая, но очень большая волна способна легко перекатываться через плоские острова и рифы, смывая все, что надежно не закреплено, и продолжить движение вперед.

Но идущая следом за ней в независимом режиме вторая ударная волна не потеряла свою энергию. Она будет, как острым ножом, срезать невысокие атоллы и острова, стоящие на ее пути, вместе со всеми казалось бы прочными и незыблемыми деревьями и постройками.

Фактически, вторая ударная волна в независимом режиме представляет собой горизонтальный слегка выпуклый вверх энергетический нож, показанный на схеме «D».

Ее жертвы очень характерны — срезанные под корень деревья и дома, люди, будто попавшие под ковш экскаватора, измененный рельеф прибрежной полосы, срезанные у поверхности коралловые рифы, исчезнувшие фрагменты береговой полосы, как будто вырезанные из карты ножницами злого ребенка и т. п. очень характерные страшные разрушения вдоль побережья.

Если человек стал свидетелем такого цунами, находясь на побережье, у него практически нет шансов остаться в живых. Более того — скорее всего будут разрушены имеющиеся при нем приборы видео- и фотосъемки. Поэтому фотографии таких страшных катаклизмов были сделаны либо с самолета, либо из космоса, а репортажи очевидцев прихода цунами у эпицентра фактически отсутствуют.

Даже в наш просвещенный век информация о подобного рода сверхразрушительных цунами поступает в средства массовой информации с большим опозданием.



На фото — 23 июня 2004 года и 28 декабря 2004 года. Пострадавший от цунами 26 декабря 2004 г. участок побережья провинции Банда-Ачех, о. Суматра, Индонезия.

Пострадавший от цунами 26 декабря 2004 года участок побережья провинции Банда-Ачех, о. Суматра, Индонезия (снимок со спутника). Видно, что направленная волна цунами будто бы ножом срезала часть прибрежной полосы и почти все деревья, а также жилые и иные постройки. Часть побережья оказалась подтопленной.

Эпицентр мощнейшего землетрясения находился всего в нескольких километрах к северу от острова Симелуэ, лежащего у западного побережья о. Суматры и располагался на глубине 20 километров.

В первые же минуты разлом в земной коре распространился на 1200 километров в северном направлении вдоль Зондского грабена и через семь минут достиг Андаманских

островов. В некоторых местах разломившиеся участки коры сдвинулись друг относительно друга на целых 20 метров. По подсчетам ученых, энергия этого землетрясения равнялась суммарной энергии всех землетрясений, происходивших на нашей планете в 1976-1990 годах XX века.

Однако когда волны цунами некоторое время свободно распространяются вдоль поверхности океана, они претерпевают третий фазовый переход — процесс соединения двух волн в единую энергообменную систему-тандем — первой классической и второй ударной волны. К этому моменту волны цунами теряют часть своей разрушительной силы и становятся несколько менее опасными.

Если бы волны цунами распространялись в условиях идеальной жидкости без трения, как любят представлять этот процесс физики, две волны (классическая первая и ударная вторая) никогда не шли бы в паре одна за другой.

Но в реальных природных условиях сплошной среды существует понятие трения и рассеивания энергии, которые замедляют движение первой волны и вызывают потери ее внутренней энергии. Поэтому через некоторое время вторая ударная волна догонит классическую первую волну, и они продолжают движение совместно.

Движение таких волн описывается совершенно иной математической моделью, нежели модель момента формирования ударной волны и ее движение у эпицентра.

При приближении цунами этого типа у людей на берегу появляется шанс спастись. Такие цунами чаще всего регистрируют на фото и видео очевидцы — фотографии приведены в первом параграфе главы.

Рассмотрим, как движутся и перераспределяют энергию основные разрушительные волны цунами — первая классическая и следующая за ней вторая ударная волна.

Первая классическая волна цунами тормозится в океане с потерей энергии за счет трения в сплошной среде (воде океана). Ее нагоняет отставшая на некоторое время вторая ударная волна, которая не может двигаться быстрее первой, и они начинают совместное движение вперед с практически одинаковой скоростью.

Как аномальный объект, напоминающий упругую энергетическую мембрану, ударная волна не может поглотить первую волну или сложиться с ней по привычным волно-

вым законам. Вместо этого ударная волна должна постоянно поддерживать первую волну, подпитывать ее и передавать ей порцию своей энергии при торможении.

Данный процесс носит дискретный характер. Как только первая волна притормаживает, вторая — ударная волна — передает ей небольшую порцию (своеобразный квант) энергии и слегка ускоряет первую.

Классическая первая волна принимает энергию по волновым законам. В то же время ударная вторая волна отдает энергию исключительно дискретными порциями — скачками (наподобие отрывающихся от гибкой мембраны кусочков), так как ее целевая функция не является гладким и непрерывным математическим объектом. Ударная волна — разрывная функция скачка энергии.

Характерные колебания у поверхности океана перед проходом цунами регистрируют ученые-океанологи в зонах опасности цунами. Возбуждаемые этим процессом волны распространяются в приповерхностном слое океана быстрее, чем идут сами волны цунами на дозвуковых скоростях.

Если волнам цунами предоставить возможность двигаться беспрепятственно, можно наблюдать следующее явление. Энергия глубоких волн, распространяющихся как составная часть первой волны в среде в толще воды океана, будет достаточно быстро гаснуть, не получая энергетической подпитки от идущей следом второй приповерхностной ударной волны.

Энергетическую подпитку получают только поверхностные слои, причем энергия первой и второй волны постоянно стремится к взаимному выравниванию. Если первая волна получит избыток энергии — она увеличит скорость и уйдет вперед. После чего по мере потери энергии и торможения ее опять нагонит вторая волна и передаст ей следующую порцию своей энергии.

По мере продвижения холмы волн будут опускаться и укорачиваться. Как только общая энергия системы упадет ниже критического показателя, обе волны в течение короткого отрезка времени разрушатся, их остаточная энергия рассеется у поверхности океана в форме небольших поверхностных волн. Наступит последний фазовый переход — разрушение системы волн цунами как таковых.

Эти выводы очень хорошо согласуются с практическими наблюдениями — цунами имеет разное поведение непосредственно в районе и на удалении от эпицентра.

Рассмотрим подробнее, что происходит после третьего фазового перехода (если он физически произошел), при котором образуется своеобразная система-тандем, состоящая из двух волн, и сравним, как эти волны цунами воздействуют на прибрежную полосу.

Их отличия от волн цунами, движущихся независимо вблизи эпицентра, разительные. Во-первых, практически вся энергия тандема двух волн быстро сосредотачивается в приповерхностном слое. Энергия второй ударной волны уменьшается за счет постоянной подпитки идущей впереди первой волны.

Во-вторых, проход ослабленных цунами отличается визуально. Очевидцы на побережье наблюдают две волны — пологие, стремительно нарастающие и поднимающиеся. Первая поменьше, и следующая следом за ней вторая волна побольше. Это хорошо видно на видеоматериалах очевидцев и следует из их многочисленных словесных описаний.

В момент подхода цунами к берегу у людей появляется шанс спастись, взобравшись на высокие капитальные постройки или убежав как можно дальше от берега.

Первая волна менее страшна, она сильно накатывает на берег и отступает. Первая волна физически и с точки зрения математической модели напоминает очень сильную штормовую волну, чем вводит в заблуждение и дезориентирует находящихся на берегу людей.

Но за ней следует вторая — ударная волна. Она достаточно спокойно, быстро и гладко накатывает на берег и затем продвигается внутрь с неотвратимостью потока извергающейся лавы. Именно она ломает дома и машины, калечит и убивает тех, кто не успел вовремя убежать. Именно ее практически невозможно остановить.

В разрезе ударная волна напоминает слегка выпуклый пологий нож, который выдвигается из океана внутрь побережья и пытается срезать все, что находится на его пути. Многие сверхмощные штормовые волны по высоте превышают ударные волны цунами, но по энергии они несопоставимо слабее. Это хорошо согласуется с фото-, видеозаписями и рассказами очевидцев.

Если берег крутой или на нем есть высокие постройки — энергия второй волны еще и взметнется вверх, вздымаясь и пенясь, как мощные штормовые волны.

В первую очередь, цунами бьет и разрушает основания и подножия прибрежных строений, принимающих на себя всю ее разрушительную энергию. Удар такого цунами выдерживают капитальные строения на фундаменте высотой не менее двух-трех этажей.

В принципе, со значительным запаздыванием после того, как цунами схлынет, из океана может прийти третья волна, гораздо менее мощная, которая образовалась вследствие разрыва поверхности ударной волны при втором фазовом переходе — это также часто отмечают очевидцы. Но ее в суматохе могут уже и не заметить.

В теории было принято выделять фазовый переход состояния цунами при проходе по пологому шельфу — но эта постановка вопроса не совсем корректна.

Система может изменять свою геометрию и скорость движения по шельфу, но продолжает описываться при помощи неизменной математической модели, функции состояния которой непрерывны и не претерпевают скачек. В то же время третий фазовый переход может произойти как в момент движения цунами по океаническому шельфу, так и в открытом океане (последнее регистрируется реже).

Скорость движения волн цунами по мере уменьшения глубины падает, а высота волн соответственно растет. Все изменения происходят плавно и постепенно, так как основная энергия цунами после третьего фазового перехода сосредоточена в малом приповерхностном слое.

Даже при контакте с пологим берегом ударная волна цунами продолжает непрерывное движение и плавное наступление на берег так, как будто берега под ней не существует. Если берег пологий, ударная волна цунами может продвинуться очень далеко вглубь суши.

Последним фазовым переходом в модели цунами является полная потеря энергии ударной волны и момент ее отступления в море, где бы он не происходил — у крутого скального обрыва над океаном или далеко от линии прибой на пологом берегу внутри побережья и суши.

Таким образом, мы описали все фазовые переходы, которые претерпевает цунами с момента начала своего формирования до полной потери энергии ударной волны, которая является основным разрушительным элементом системы волн цунами в целом.

Многих интересует проблема — возможно ли на каком-то этапе погасить волну цунами, чтобы не дать ей распространиться вдоль поверхности океана и разрушить побережье. Вернемся к построенной нами общей математической модели цунами.

Волновые процессы подчиняются строгим и хорошо изученным закономерностям. Волны являются одним из способов передачи энергии на расстояния. Известно, что встретившиеся в противофазе волны одинаковой частоты и амплитуды взаимно полностью гасятся. Направленные друг навстречу другу волны могут взаимно ослабить и потерять таким образом часть своей энергии.

Пока что чисто теоретически существует возможность направить от поверхности океана непосредственно над эпицентром цунами встречный поток волн и энергий, сопоставимый по мощности с той частью сферических волн эпицентра цунами, который формирует ударную волну. Источник гашения должен располагаться ниже поверхности океана и распространять свои колебания в воде. Его наиболее эффективное положение на схеме «С» — на вертикальной оси Oy строго над эпицентром цунами.

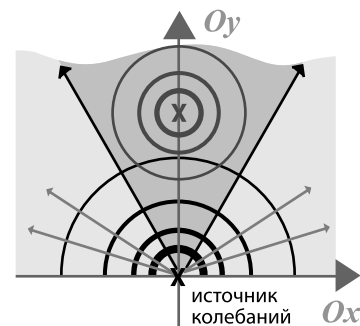
Таким образом, волны от двух источников встретятся в толще океанических вод и погасят друг друга. Сферические волны эпицентра цунами в критическом секторе, который окрашен темным цветом, будут разрушены, они не смогут достичь поверхности океана и сформировать приповерхностную ударную волну цунами.

На практике задача сегодня является невыполнимой. Во-первых, невозможно предсказать точное место расположения и мощность будущего эпицентра цунами.

Во-вторых, эпицентр цунами и источник гашения волн должны сработать практически одновременно или с ничтожно малым запаздыванием. Такое можно воспроизвести в лабораторных условиях, но не на поверхности Земли.

В-третьих, мощность встречного заряда должна быть очень велика — в рассмотренном примере на схеме «С» она составляет порядка 30% энергии, выброшенной эпицентром цунами в толщу океанических вод.

Но есть надежда, что сформулированная математическая модель поможет бороться с цунами в будущем.



Приводим наглядную схему описываемого процесса.

Возникшие в толще вод океана волны, расходящиеся от эпицентра цунами, нужно разрушить и погасить еще до того момента, пока они не достигли поверхности океана и не произошел фазовый переход, который мгновенно формирует ударную волну цунами.

После формирования ударной волны начинают действовать концептуально законы математической физики, не поддающиеся описанию только классических волновых и колебательных процессов.

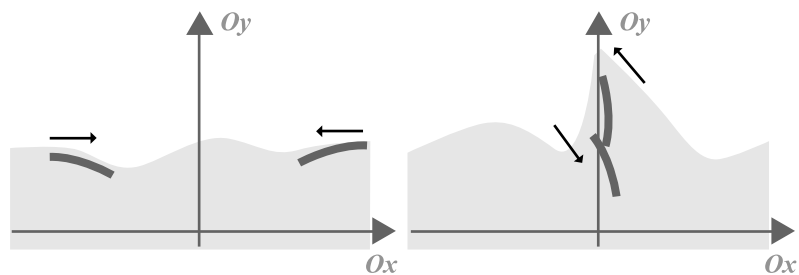
Возникает естественный вопрос: а что будет, если навстречу одной приповерхностной ударной волне (в частности, цунами), которая сформировалась и движется вдоль поверхности океана, направить вторую похожую ударную волну? Что произойдет в момент их встречи?

На первый взгляд кажется, что ситуация абсурдная и в природе практически не встречается. Но это не так. Давайте разберемся подробнее.

Помимо цунами, которые проявляют себя как разрушительные глобальные катаклизмы, по этому же принципу у поверхности океана формируются локальные мини-цунами. Это ударные волны, сформированные вследствие взрывов и извержений подземных вулканов, слабой сейсмической активности и поддвижек на дне океана, крупных обвалов и других процессов, сопровождающихся выделением свободной энергии в толщу океана.

Они формируются локально и затем свободно распространяются в приповерхностном слое морей и океанов. Они могут сформироваться даже в реке, озере или небольшом водоеме в лаборатории — просто будут очень слабыми.

Такие слабые ударные волны и мини-цунами могут свободно блуждать у поверхности океана и быть практически незаметными для наблюдателей. На них не оказывает существенное влияние незначительное поверхностное ветровое волнение и подобные волновые процессы.



Приведем один из возможных сценариев развития событий. В океане друг навстречу другу движутся две примерно равные по мощности небольшие приповерхностные ударные волны. Сами по себе они очень пологие и не вызывают заметных отклонений и колебаний на поверхности моря. Они сходятся друг с другом и сталкиваются. Ударные волны ведут себя при этом не как волновые объекты из жидкости, а как некие твердые и упругие энергетические мембраны, увлекающие за собой в движение окрестную воду.

Поэтому результат их столкновения можно наблюдать в форме внезапно, без каких-либо видимых причин возникающих и стремительно растущих волн, не подверженных влиянию ветра или других подобных внешних факторов — вертикальных ударных волн.

Такие волны живут своей жизнью, как будто сами по себе, и несут внутри заряд энергии двух ударных волн, столкнувшихся друг с другом и вставших практически вертикально вдоль ее гребня, как показано на схеме. И это — только один из множества всевозможных сценариев.

Эти волны часто описываются в литературе и носят название «волны-убийцы». Термин «волна-убийца» и его аналоги в других языках (англ. «rogue wave» — волна-разбойник, «freak-wave» — волна-придурок, отморозок; фр. «onde scelerate» — волна-злодейка, «galejade» — дурная шутка, розыгрыш) дают хорошее представление о существенных чертах природного явления, передают чувство ужаса и обреченности при встрече с этой волной в океане. Волны могут появляться при малых ветрах и относительно слабом волнении и ведут себя аномально и парадоксально. Они не связаны напрямую с цунами как таковыми, но имеют сходное разрушительное поведение.

Важное обстоятельство, которое позволяет выделить феномен волн-убийц как отдельное научное и практическое явление и, таким образом, отделить их от других явлений, связанных с волнами большой амплитуды (например, сильными штормовыми) — появление «волн-убийц» из «ниоткуда» буквально «на ровном месте» «без причин».

При их математическом моделировании в первую очередь следует помнить закон сохранения энергии — энергия ниоткуда не появляется и нигде не исчезает, а только переходит из одной формы в другую.

Столкновение двух небольших приповерхностных почти горизонтальных ударных волн, фазовый переход, новое фазовое состояние — и вот перед вами «волна-убийца». Еще одна воплощенная в реальности водная ударная волна, только стоящая вертикально или под большим углом в поверхности океана, отчетливо видимая, хорошо регистрируемая приборами и весьма смертоносная.

При лобовом столкновении и образовании такой волны импульсы двух встречных горизонтальных ударных волн сложатся. Новая волна продолжит движение в том направлении, в котором двигалась наиболее мощная ударная волна, которая несла в себе наибольший заряд энергии. Это строго соответствует закону сохранения энергии.

Также существуют факторы, которые заставляют подняться вертикально даже одну блуждающую горизонтальную ударную волну — например, такая ситуация может сложиться при столкновении двух океанических течений в узком проливе.

«Волны-убийцы» выделяются на радиолокационных снимках по аномально высокой яркости изображения, по которому при особых методах обработки может быть восстановлен профиль этой ударной волны.



На фото.

Гигантская волна (высотой около 20 м) в проливе Дрейка. Фотосъемка с борта НИС «Академик Иоффе».

Фото А.В. Григорьева
ИО РАН.

§ 3. Модель поведения приповерхностных сейсмических волн — явление землетрясения

Перед тем, как начать рассматривать и моделировать конкретные волновые процессы, связанные с цунами, рассмотрим еще одно явление, математическая модель которого на практике оказалась очень близка к математической модели цунами. Речь идет о распространении приповерхностных сейсмических ударных волн во время землетрясений и других подобных катаклизмов (подземные взрывы ядерного оружия и т. п. сверхмощные источники).

В теории существует достаточно развитый аппарат, описывающий движение глобальных сейсмических волн внутри земного шара. В соответствии с анализом сейсмограмм, полученных в разных зонах земного шара, можно восстановить источник сейсмической активности, показатели его мощности и даже сделать достоверные предположения о его природе.

Таким образом уже давно проводится контроль в том числе за проведением ядерных испытаний во всем мире без шпионажа или непосредственного участия наблюдателей.

Научное описание процессов, которые происходят над очагом у поверхности, исследователи либо не приводят, либо описывают только ощущения очевидцев, их фотографии и видеоматериалы.

При описании землетрясений большинство ученых обходит вниманием математическую модель того, что же происходит в районе поверхности земной коры над источником подземных толчков, и почему одна активность внутри земной коры вызывает разрушения на поверхности, а другая — нет, и регистрируется только сейсмографами. Ведь далеко не каждые толчки сопровождаются разрушительными поверхностными явлениями — землетрясениями, так же как статистически только одно из ста землетрясений в океане формирует заметное на берегу цунами.

С точки зрения математики, до сих пор не существовало точного описания, что такое поверхностное землетрясение и какие именно функции его корректно описывают.

Корректная математическая модель до сих пор не была построена. Автор постарается заполнить этот досадный пробел с точки зрения математической физики и теории свободно распространяемых приповерхностных ударных волн, опираясь на выводы, полученные ранее для цунами.

Из геологии известно, что земная кора представляет собой очень тонкий поверхностный слой твердых горных пород, под которым находится раскаленная жидкая магма. Земная кора состоит из гигантских блоков — литосферных плит, которые находятся в состоянии непрерывного движения и формирования. Толщина земной коры на континентах может достигать до 20-65 км, в то время как под океанами она заметно тоньше и составляет всего около 5-10 км.

В литосферных плитах происходят постоянные горообразовательные процессы, сопровождающиеся вибрациями и колебаниями разной степени интенсивности. Мы не будем здесь подробно излагать возможные причины происходящих колебаний и сейсмической активности в земной коре. Остановимся только на том, что некоторые колебания вызывают разрушительные землетрясения на поверхности Земли, причиняющие значительный вред людям, и опишем эти процессы с точки зрения математики.

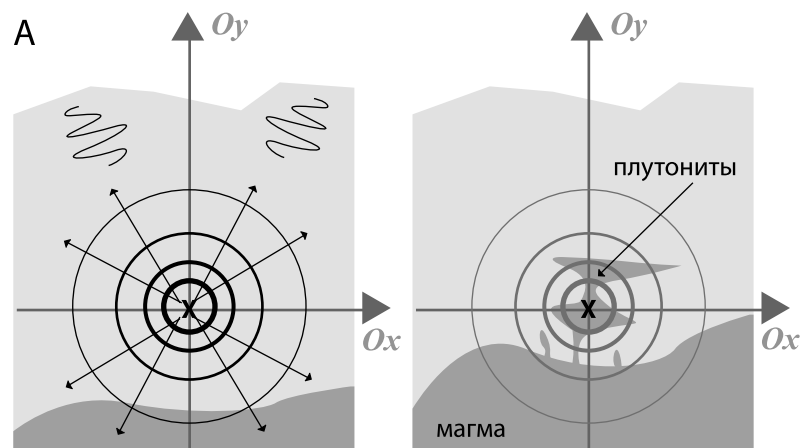
Известно, что даже твердые породы могут проявлять некоторую локальную пластичность и имеют способность передавать колебания и вибрации на достаточно большое расстояние. Передавая колебания как таковые, твердые породы земной коры передают соответствующую этим колебаниям энергию. Колебания распространяются в земной коре свободно во всех направлениях, как это происходит по законам физики в сплошных средах.

Рассмотрим поэтапно несколько вариантов расположения источника землетрясения по отношению к поверхности земной коры — по аналогии с цунами.

В первом случае в расходящиеся во всех направлениях от источника сферические сейсмические волны (колебания) теряют свою энергию внутри земной коры и рассеиваются при подходе к поверхности. Это может произойти либо в том случае, если источник слишком слабый и не может генерировать более мощные и амплитудные колебания, либо если источник мощный, но он размещается очень глубоко под толщами горных пород, и его энергия расходуется на горообразовательные процессы.

Подобные колебания могут способствовать внутренней деформации горных пород либо их метаморфизму глубоко от поверхности земной коры. В этом случае люди непосредственно не ощущают на себе действие сейсмической активности.

Энергия этих источников может служить причинами любопытных природных аномалий — например, таких, как движущиеся по дну сухого озера камни в Долине Смерти, США, описанные в 1 главе. Или загадочные передвижения знаменитого Синь-Камня по дну Плещеева озера в России (предположительно, в горсте).



Если источник сейсмических колебаний находится очень глубоко под землей вблизи раскаленной магмы, он может вызвать локальное растрескивание и ослабление горных пород вблизи сейсмического очага с последующим прорывом (интрузией) в эту зону земной коры раскаленной магмы и формированием плутонитов.

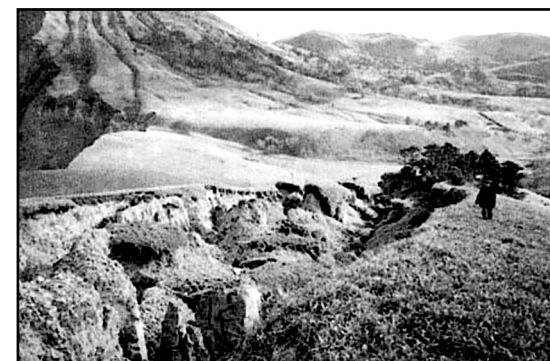
Поэтому очаг этой сейсмической активности может способствовать образованию в недрах земной коры так называемых плутонических горных пород — гранитов, лабрадоритов, диоритов, габбро и перидотитов глубоко.

Хотя такой сценарий развития событий вовсе не обязателен — при отсутствии доходящих до магмы трещин энергия сейсмических колебаний может быть направлена на вялотекущие процессы метаморфизма горных пород, непрерывно проходящих в земной коре.

Если эпицентр сейсмической активности находится слишком близко к поверхности земной коры, значительная часть его энергии будет израсходована на физические разрушения этой поверхности.

Такое явление очень часто сопровождается теми или иными нарушениями целостности поверхности земной коры. На поверхности земли могут образовываться заметные трещины и разрывы, блоки горных пород будут скользить и сдвигаться друг относительно друга по ослабленным зонам и высвобождать при этом гигантскую энергию в своей локальной окрестности.

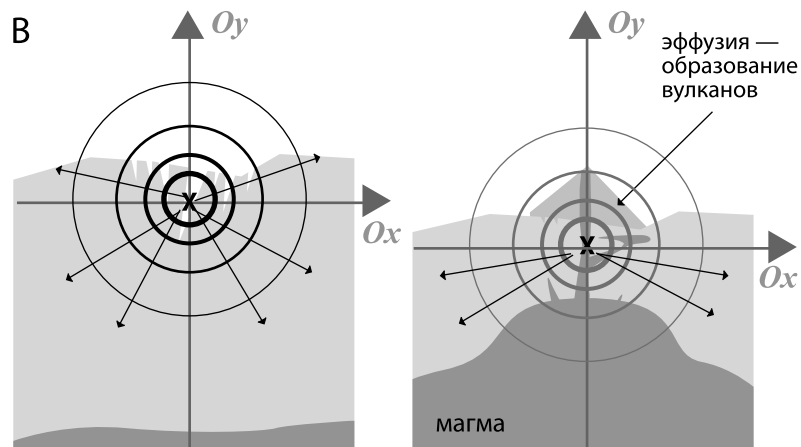
В таком случае большая часть сейсмической активности и разрушений находятся в относительно небольшой локальной окрестности, непосредственно прилегающей к очагу землетрясения (источнику). На поверхности земли большая часть энергии израсходуется на разрушение земной коры, образование трещин и разломов.



Линейный 300-метровый разлом, образовавшийся в результате землетрясения 4 октября 1994 года на острове Шикотан. Фото по материалам книги «Землетрясения и цунами».

Если же очаг находится близко ко дну океана, то часть энергии этой сейсмической активности будет локально поглощена водами океана — такое землетрясение может положить начало волне цунами. Поскольку выброс энергии производится в очень узкой локальной окрестности очага землетрясения, по меркам океана такой источник может рассматриваться как точечный или линейный.

В газовую среду (атмосферу) непосредственная энергия из очага землетрясения не передается. Это происходит из-за слишком большой разнородности и физического различия структуры, строения и поведения твердых и газообразных сплошных сред.



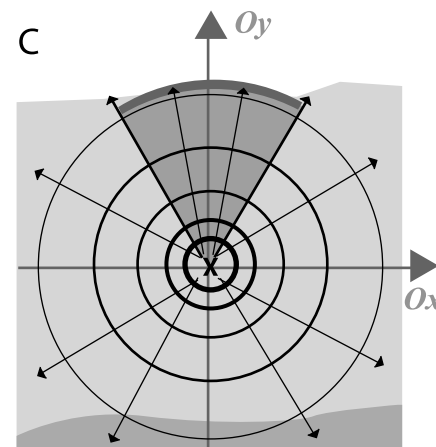
Если очаг землетрясения находится близко от поверхности, а слой твердых горных пород в окрестности эпицентра достаточно тонкий, очаг жидкой магмы находится близко к поверхности земли (либо это локальное истончение самой коры, либо это так называемый батолит).

В следствии существенных разрушений и трещин земной поверхности локальная зона вокруг эпицентра будет значительно ослаблена. Поскольку участок земной коры в этом месте тонкий, в образовавшиеся трещины может прорваться раскаленная жидкая магма и через ослабленные зоны выйти на поверхность земли.

Такой процесс называется эффузией. Он сопровождается образованием вулканов, извержениями лавы на поверхность и вулканической активностью. Лава может изливаться не только через основное жерло вулкана, но и распространяться вдоль вертикальных и горизонтальных трещин в земной коре, образуя силлы и дайки.

И, наконец, остается рассмотреть третий вариант развития событий, при котором наблюдаются ощутимые приповерхностные землетрясения, волны которых распространяются вдоль поверхности Земли на значительные расстояния от очага и эпицентра.

В зоне проекции очага (в эпицентре) землетрясения поверхность земли ведет себя аномально — ходит волнами (как вода) наподобие упругой колеблющейся мембраны.



Изучаемый очаг землетрясения находится достаточно далеко от поверхности земли. Распространяющиеся от него во все стороны сферические волны доходят до поверхности земли, оставаясь при этом еще весьма мощными и заметными.

На схеме участок таких волн закрашен темным цветом и представляет собой в разрезе клин.

Достигшие поверхности земли волны распространяются упруго в среде и не вызывают значительных разрушений земной поверхности в виде трещин и разломов.

Энергия очага землетрясения поступает на поверхность — в эпицентр — некоторым клином, который закрашен на схеме темным цветом и аккумулируется у поверхности сходным образом с тем, как это происходит при первом фазовом переходе образования волн цунами в океане.

Дойдя до поверхности земли, закрашенная составляющая упругих сейсмических волн не может продолжить свое свободное распространение и не может отразиться от поверхности по законам оптики.

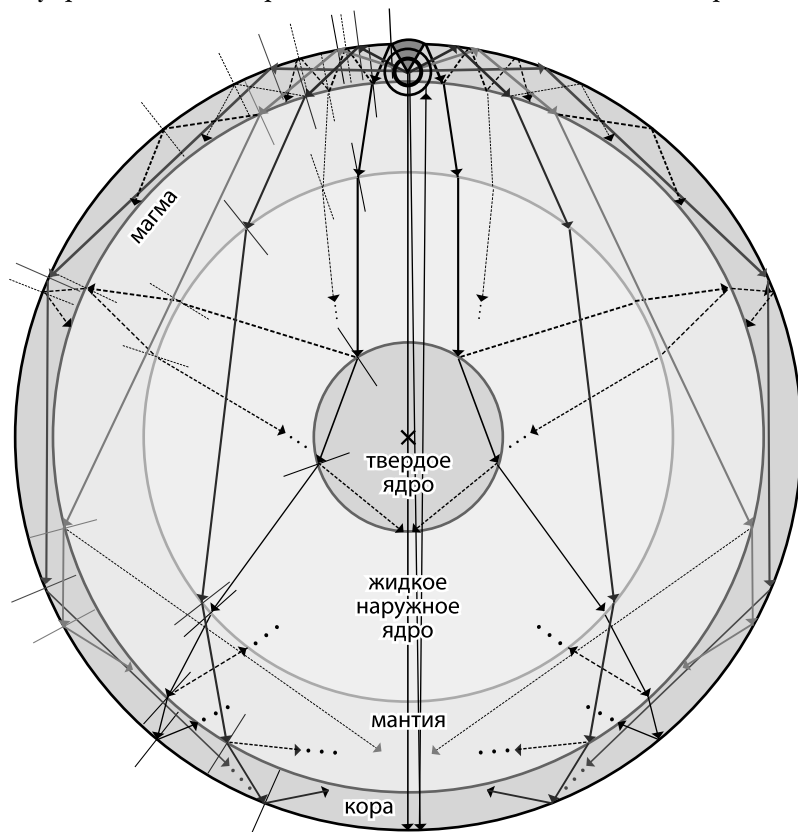
В результате последующие сейсмические волны догоняют первые и они мгновенно схлопываются, формируя куполообразную приповерхностную ударную волну — разрывную функцию скачка энергии. Происходит первый фазовый переход — начало поверхностного землетрясения.

Образовавшаяся приповерхностная ударная волна изначально имеет плоскую куполообразную форму — на схеме она обозначена темно-серой дугой.

В нашем схематическом примере на ее образование было затрачено около 15% энергии источника землетрясения. В эпицентре землетрясения у поверхности Земли оказался сконцентрированным 15%-ный потенциал всей высвобожденной внутри земной коры энергии, причем он не был немедленно растратчен на разломы и подвижки горных пород у поверхности.

Поведение сейсмических волн вне закрашенного клина хорошо изучено и может удовлетворительно моделироваться с использованием законов оптики — а именно, того, что при прохождении границы разнородных сред луч преломляется и меняет направление движения, и то, что угол падения луча на границу равен углу отражения.

Луч — это нормаль к фронту волны (ее градиент). Автор приводит очень упрощенную, но наглядную и понятную схему распространения типичных сейсмических волн внутри земного шара без дополнительных комментариев.



Слева на половине схемы дополнительно показаны направления нормалей к плоскостям вложенных шаров, дающие представление о том, как данная схема строилась. На правой половине представлены только визуальные траектории выборочных градиентов к фронтам сейсмических волн.

Земной шар напоминает огромную плавильную печь космического масштаба. В ее центре находится твердое внутреннее раскаленное ядро из тяжелых элементов (металлов) под гигантским давлением. Наружное жидкое ядро состоит предположительно из тех же металлов, только в жидком — расплавленном состоянии (чем меньше давление, тем ниже температура плавления). Мантия напоминает шлаки в плавильной печи, которые в полужидком состоянии плавают на поверхности металла. Это — расплавленные горные породы. Внутри планеты идут реакции ядерного распада, подогревающие ее изнутри.

Земная кора — это тонкая и твердая корка остывших на поверхности шлаков — твердых горных пород, которые охлаждаются благодаря окружающему холодному космосу. Земная кора — наиболее тонкий из слоев Земли. Если уменьшить Землю до размера теннисного мяча, то земная кора окажется сопоставима с наклеенной на нем бумагой. Поэтому при изучении глобальных сейсмических волн на противоположной стороне земного шара толщины земной коры частично пренебрегают.

В то же время недалеко от района очага землетрясения рассматривают только волны, распространяющиеся в земной коре локально, так как глобальные сейсмические волны в этом районе себя фактически не проявляют (в крайнем случае, можно получить легкое эхо с противоположного конца Земли). Это хорошо видно на схеме, где пропорции были заведомо нарушены — земная кора сильно утолщена.

Таким образом, мы показали, что глобально распространяющиеся и рассеивающиеся сейсмические волны не оказывают существенного влияния на поведение локальной системы в локальной окрестности эпицентра землетрясения. Волны, которые не участвовали в формировании сейсмической куполообразной ударной волны, также рассеиваются в удалении от эпицентра и не оказывают существенного влияния на события непосредственно в эпицентре.

Поэтому мы должны рассматривать события в локальной окрестности эпицентра землетрясения, выделенной на схемах как более темный куполовидный сектор, независимо от других сейсмических волн, распространяющихся глобально, и хорошо изученных и описанных в литературе.

В приведенном нами примере приблизительно 85% энергии очага землетрясения глобально рассеялось внутри земной коры и всего объема Земного шара.

Вернемся к рассмотрению поведения сформировавшейся в зоне эпицентра у поверхности земной коры ударной волны. Строго говоря, эпицентром землетрясения (с точки зрения фазовых состояний) нужно называть только ту локальную окрестность над очагом землетрясения в земной коре, в которой непосредственно сформировалась горизонтальная куполовидная приповерхностная ударная волна.

В отличие от модели цунами в океане, на земле впереди ударной волны обычная волна не формируется. Это связано с тем, что скорость распространения волн в твердой среде в горных породах намного превышает скорость распространения волн в жидкости.

Поэтому в земной коре сейсмические волны успевают очень быстро разбежаться и покинуть окрестности эпицентра, не оказывая на него существенного влияния (по сравнению с влиянием ударной волны).

В то же время математические модели поведения функций приповерхностной ударной волны как в случае цунами (поверхность жидкой среды), так и в случае землетрясения (поверхность твердой среды) очень схожи и практически идентичны. Различаются их физические проявления.

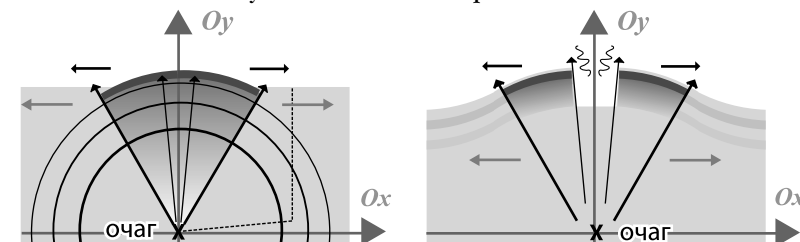
После первого фазового перехода — формирования ударной волны — следует некоторый очень короткий интервал времени (так как твердая среда более инерционна и медленнее реагирует на изменения состояния по сравнению с жидкой средой), в течение которого ударная волна остается практически неподвижной, продолжая принимать в себя энергию, излучаемую очагом землетрясения внутри земной коры. Для сравнения: у цунами описываемый временной интервал может быть практически нулевым (ничтожно малым) или чрезвычайно коротким.

Этот момент вспучивания и застывания земли положим холмом в XX веке можно было наблюдать на тех полигонах, где проводились подземные испытания ядерного оружия, причем заряды закладывались очень мощные, а глубина их залегания была большой (т. н. сверхглубокие).

С другой стороны, выжившие в эпицентре крупных землетрясений люди-очевидцы описывали, что перед началом подземных толчков и мега-разрушений земля как будто бы делала тяжкий вздох — она слегка приподнималась и замирала на мгновения. После чего начинался ад ...

С математической точки зрения, происходит второй фазовый переход, при котором ударная волна, разрывающаяся в противоположных направлениях горизонтальными составляющими векторов скорости и энергии, разрушается в том месте, где вертикальная составляющая ее скорости равна нулю или близка к нулю, а горизонтальная составляющая скорости максимальная.

На приведенной схеме это происходит по центру. После чего фрагменты ударных волн радиально расходятся в разные стороны, увлекая за собой землю и вынуждая ее колебаться, как будто она — поверхность океана.



По сравнению с океаном и жидкой средой, в которой претерпевает второй фазовый переход и разрыв ударная волна цунами, твердая среда не является настолько пластичной и гибкой, чтобы безболезненно перенести разрыв. На поверхности земли этот фазовый переход протекает иначе. Зона разрыва ударной волны в приповерхностной твердой среде сопровождается образованием очень характерных локальных проседаний и мощнейших разрушений в эпицентре, локальными высокочастотными колебаниями и т. п. процессами.

В частности, над очагами описываемых взрывов на полигонах образовывались не просто воронки, провалы или трещины (как во время приповерхностных сильных взрывов) — а весьма характерные и специфические котлованы, напоминающие вырытые экскаватором мини-карьеры с достаточно крутыми стенками, относительно ровным дном и некоторой осыпью породы вдоль стенок.

Вся колоссальная высвобожденная энергия (на схеме это 1-3% от энергии взрыва) оставалась в малой окрестности зоны разрушения и была там полностью и почти мгновенно израсходована. При сверхмощном глубинном взрыве на гладком и ровном полигоне зона разрушения ударной волны была идеально очерчена и прорисована на поверхности в форме четких границ описываемого котлована.

Внешние границы и дно такого техногенного котлована идеально совпадали с границами и дном, описываемом моделью зонального разрушения волны.

После разрушения центра приповерхностная ударная волна расходится по равнине, вовлекая в волновой процесс поверхность земли, как расходится в тихой заводи круги по воде от брошенного камня, пока волны наконец не затухали. Их поверхностное поведение идеально описывается уравнением Лапласа в частных производных и цилиндрическими функциями Бесселя. Разрыв в эпицентре может быть представлен через функции Неймана.

Концептуальное отличие точечного подземного взрыва сверхвысокой мощности от практически любого землетрясения состоит в том, что общее поведение системы при взрыве намного ближе к поведению идеальной математической модели и дает не загрязненные посторонними шумами и отклонениями почти идеальные данные.

Сверхмощный глубинный взрыв как источник энергии почти идеально моделируется точечной дельта-функцией Дирака по времени и по физическому расположению, а результаты можно пронаблюдать в хороших равнинных или иных удобных для исследователя условиях.

В то же время импульсы от очага землетрясения продолжают в течение некоторого времени, и реальное воплощение идеальной математической модели искажается.

Во время землетрясения, вызванного геологическими факторами, функция источника не моделируется точно идеальной дельта-функцией. Очаг генерирует целую серию различных колебаний в определенный ограниченный временной интервал. Да и поверхность земли редко бывает идеально-равной. Поэтому второй фазовый переход у такого землетрясения также не является идеальным.

Приповерхностная ударная волна может изначально сформироваться в том числе из отдельных фрагментов (например, в горах) или претерпевать при разрушениях множественные разрывы, локальные нарушения целостности, высвобождать отдельные блуждающие по эпицентру фрагменты и вести себя сложным образом.

Безусловно, на некотором удалении от эпицентра поведение расходящихся в стороны поверхностных волн очень близко к идеальному поведению расходящихся по

воде волн. Это поведение хорошо изучено и корректно моделируется аппаратом современной математической физики. Но в зоне эпицентра, где формируется ударная волна, можно говорить только о вероятности того или иного сценария развития событий.

Нужно построить и описать график поверхностной ударной волны в реальных условиях, максимально приближенных к моделируемым — с разумной точностью воспроизвести рельеф местности и глубину залегания очага.

Затем на поверхности сформированной ударной волны (или целого комплекса ударных волн, если рельеф местности разрывной — например, плато и т. п.) найти и рассчитать зоны, в которых горизонтальная составляющая кривизны и энергии ударной волны будет максимальной. Именно в этих зонах поверхность ударной волны наиболее подвержена локальному разрыву и разрушению.

В этих точках градиент к поверхности ударной волны будет лежать на прямой, которая соединяет эту точку и центр Земли (нормаль к идеальной поверхности Земного шара). Чем меньше будет отклонение градиента от этой прямой, тем больше вероятность того, что в данной точке ударная волна эпицентра будет локально разрушена.

В таких окрестностях будут происходить разрывы и разрушения целостности ударной волны и сконцентрируются зоны максимальных поверхностных разрушений.

Можно с уверенностью указать, что зоны разрушений приповерхностной ударной волны по закону сохранения энергии должны совпадать с очагами наибольших физических разрушений на поверхности земли.

Безлюдные и малонаселенные районы тоже нужно обязательно принимать во внимание и изучать не только зоны разрушений населенных пунктов и зданий, но и дорог, коммуникаций, природного рельефа, русел рек, озер, лесов, неожиданные оползни, лавины и камнепады и другие возможные физические проявления выбросов энергии.

На момент написания главы автор книги не имела на руках достаточно статистических данных по моделям эпицентров реальных геологических землетрясений, чтобы глубже и подробнее исследовать примеры конкретного разрушения целостности приповерхностной ударной волны в зоне эпицентров природных землетрясений.

§ 4. Модель формирования волн цунами

Современная математическая физика более 200 лет располагает развитым аппаратом, позволяющим корректно и с высокой степенью точности моделировать процессы, связанные с волнами и вибрациями.

Отдельные ученые и практики время от времени (по мере исследования различных задач) вносят свой вклад в развитие теоретических или прикладных аспектов математической физики и специальных функций.

В случаях поверхностного распространения волн различной природы в цилиндре для математического моделирования используется волновое уравнение, дифференциальный оператор Лапласа и выбирается удобная система координат — а именно, цилиндрические координаты.

Такое уравнение Лапласа в частных производных методом разделения переменных приводится к классическому уравнению Бесселя — линейному однородному дифференциальному уравнению второго порядка, подробно изученному в 1 части настоящего издания, и уравнению Штурма-Лиувилля с нулевым собственным значением, решение которого в этом случае представимо через тригонометрические функции.

Решение краевой задачи для дифференциального уравнения Бесселя представимо посредством использования ограниченных на всей числовой оси функций Бесселя и имеющих в нуле неустранимую особенность (резкое стремление к бесконечности) функций Неймана. Сегодня функции Бесселя и Неймана являются одними из базовых математических объектов для корректного моделирования реальных волновых процессов в цилиндре.

До настоящего времени никто из специалистов в области математической физики, которые занимаются разработкой теоретического аппарата, не пытались построить модель цунами. По крайней мере, в литературе по математической физике не была найдена даже развернутая постановка этого вопроса и задачи.

За свою жизнь любые специалисты в области математики строят в лучшем случае одну или несколько разверну-

тых корректных математических моделей в очень узкой отрасли своей специализации или просто интересов.

Подавляющее большинство специалистов и инженеров предпочитают использовать готовые и построенные кем-то до них модели и алгоритмы расчетов, не занимаясь сугубо теоретическими изысканиями и построением принципиально новых физико-математических схем.

Кроме того, наблюдается некоторое внутреннее противоречие. Специалисты в различных научных отраслях, и особенно исследователи или ученые-практики — как, например, геологи, океанографы, сейсмологи, метеорологи и др. — не владеют необходимыми теоретическими нюансами построения математических моделей в терминологии и аппарате прикладной математической физики.

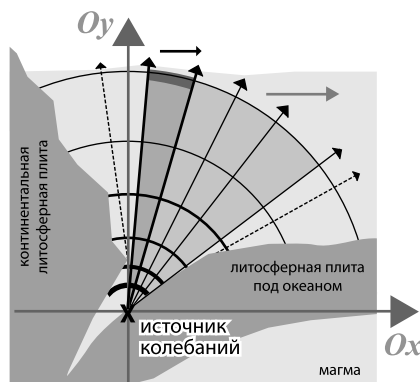
А специалист в области прикладной математики и математической физики, соответственно, должен потратить много времени и усилий для освоения целевых вопросов ряда смежных дисциплин, иметь доступ к специальной и практической информации, к результатам исследований, которые не всегда общедоступны (по многим причинам).

Начнем с моделирования начального поведения системы волн цунами при различных очагах и эпицентрах. Ранее мы рассматривали идеальный случай, в котором эпицентр землетрясения располагается на ровном и гладком дне океана, а в самой окрестности ничто не препятствовало круговому формированию ударной волны у поверхности.

Потенциальные источники цунами могут размещаться как в толще океанической воды (техногенные причины), так и в наклонных впадинах, сформированных в результате поддвижки одной литосферной плиты под другую (часто встречающиеся геологические условия).

В результате движений литосферных плит под действием энергии вращения Земли и движения тепловых конвекционных потоков в верхних слоях магмы одни плиты уходят под другие, погружаются в магму и постепенно плаваются. На их границе образуется длинная и узкая впадина, и такая граница называется деструктивной.

Впадины на дне океанов носят название желобов (например, самый глубокий Марианский желоб и др.). Это сейсмически очень активные участки земной коры, внутри которых могут производиться регулярные выбросы мощнейшей сейсмической энергии.



Не очень глубоко в желобах формируются очаги, которые благодаря особенностям рельефа дают относительно узко направленное излучение энергии в океан — в клиновидном секторе, закрашенном на схеме в темные тона.

Около 70%-80% выброшенной в океан энергии оказывается сконцентрировано в узком секторе.

На схеме видно, что ударная волна с момента ее формирования может свободно двигаться в открытый океан, не разрываясь на части и локально не разрушаясь. На материк удар такого цунами направлен не будет. Благодаря структуре придонного рельефа цунами не носит поверхностный круговой характер расходящихся волн, а будет двигаться постепенно расширяющейся полосой.

Если желоб и дно имеют скачкообразную структуру, тогда от протяженного вдоль желоба источника может сформироваться несколько ударных волн, разделенных разрывами, после чего каждая ударная волна будет распространяться независимо от других.

Предположим, что сформированная вдоль желоба одна протяженная волна имеет длину фронта L .

Обозначим Q часть энергии, которая была выброшена в закрашенный сектор от всей энергии очага E . Процент выброшенной в сектор энергии составит $Q / E \times 100\%$.

Общий размер угла всего сектора, в котором сформируется цунами, составляет α радиан. На формирование ударной волны в указанном секторе израсходуется энергия во вложенном — меньшем секторе, составляющем β радиан.

Угол наклона продуктивного (с точки зрения формирования цунами) сектора к оси Ox составляет γ радиан.

Для пересчета x градусов в y радиан используйте простое линейное отношение:

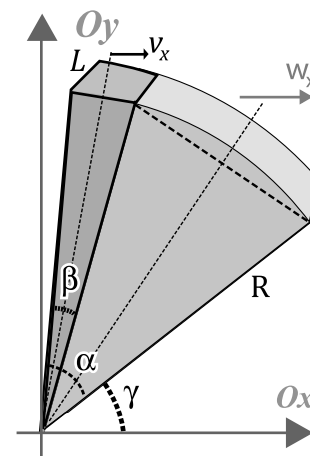
$$y \text{ радиан} = 2 \pi x \text{ градусов} / 360$$

Энергию U , которая будет израсходована на создание приповерхностной ударной волны цунами и прилегающего к ней снизу сектора, можно оценить выражением:

$$U = \beta Q / \alpha \quad \text{— энергия сектора ударной волны.}$$

Энергия W первой классической волны составит:

$$W = Q - U = (\alpha - \beta) Q / \alpha$$



Энергия от источника распространяется круговыми равномерными волнами. Круговой сектор, формируемый ударной волной, для удобства вычислений можно принять за треугольник. Поскольку суммарная энергия может быть разложена по двум осям координат как векторная величина, оценим ее горизонтальную составляющую U_x как усредненную величину:

$$U_x \cong U \cos(\gamma + \alpha - \beta/2)$$

$$U_x \cong Q \cos(\gamma + \alpha - \beta/2) \beta / \alpha$$

Можно предположить, что, в соответствии с логикой модели, горизонтальная составляющая внутренней энергии этого сектора во время второго фазового перехода перейдет в кинетическую энергию и сформирует начальную скорость v_x движения ударной волны вдоль поверхности.

$$U_x = m v_x^2 / 2 = L S_{\text{сектора}} v_x^2 / 2$$

где аналогом массы выступает объем сектора, выраженный через площадь $S_{\text{сектора}}$ и длину фронта ударной волны L , которая сформировалась вдоль очага длиной L в протяженном желобе (плотность воды принимаем за 1).

$$\text{Поэтому } U_x = L \beta R^2 v_x^2 / 4$$

$$U_x = U \cos(\gamma + \alpha - \beta/2) = L \beta R^2 v_x^2 / 4$$

$$\text{Отсюда } v_x = \frac{2}{R} \sqrt{U \frac{\cos(\gamma + \alpha - \beta/2)}{L \beta}}$$

$$\text{Или } v_x = \frac{2}{R} \sqrt{Q \frac{\cos(\gamma + \alpha - \beta/2)}{L\alpha}}$$

Очевидно, что вертикальная составляющая внутренней энергии перейдет во внутреннюю энергию ударной волны Q_U с прилегающей окрестностью, а также в остаточную энергию возмущений внутри рассматриваемого клина.

$$Q_U = Uy = U - Ux = U(1 - \cos(\gamma + \alpha - \beta/2))$$

Отношение израсходованной на придание начальной скорости фронту ударной волны энергии, и энергии, переданной сектору ударной волны, составит

$$Ux / U = \cos(\gamma + \alpha - \beta/2)$$

Отношение энергии, которая была затрачена на придание начальной скорости фронту ударной волны к общей энергии, переданной от источника всему рассматриваемому сектору цунами, составит

$$Ux / Q = \beta \cos(\gamma + \alpha - \beta/2) / \alpha$$

Можно предположить, что сектор, отвечающий за формирование первой (не ударной) волны цунами во время второго фазового перехода перераспределит энергию аналогично. Горизонтальная составляющая вектора энергии этого сектора составит

$$Wx \cong W \cos(\gamma - \beta + \alpha/2)$$

$$Wx \cong Q \cos(\gamma - \beta + \alpha/2) (\alpha - \beta) / \alpha$$

Кинетическая энергия позволяет отыскать горизонтальную скорость W_x движения фронта первой волны:

$$Wx = m^* w_x^2 / 2 = LS_{\text{сектора}}^* w_x^2 / 2$$

$$\text{Поэтому } Wx = L\alpha R^2 w_x^2 / 4$$

$$Wx = W \cos(\gamma - \beta + \alpha/2) = L\alpha R^2 w_x^2 / 4$$

$$\text{Отсюда } w_x = \frac{2}{R} \sqrt{W \frac{\cos(\gamma - \beta + \alpha/2)}{L\alpha}}$$

$$\text{Или } w_x = \frac{2}{R} \sqrt{Q \frac{(\alpha - \beta) \cos(\gamma - \beta + \alpha/2)}{L\alpha^2}}$$

Очевидно, что вертикальная составляющая внутренней энергии перейдет во внутреннюю энергию Q_W волны:

$$Q_W = Wy = W - Wx = W(1 - \cos(\gamma - \beta + \alpha/2))$$

Отношение израсходованной на придание начальной скорости энергии к энергии этого сектора будет

$$Wx / W = \cos(\gamma - \beta + \alpha/2)$$

Отношение энергии, которая была затрачена на придание скорости фронту волны к общей энергии будет

$$Wx / Q = \cos(\gamma - \beta + \alpha/2) (\alpha - \beta) / \alpha$$

Из полученных формул можно вывести критерий отношения начальных скоростей для первой большой и второй следующей за ней ударной волны. Введем величину

$$\Omega = (v_x / w_x)^2$$

$$\text{Отсюда } \Omega = \frac{\alpha}{(\alpha - \beta)} \frac{\cos(\gamma + \alpha - \beta/2)}{\cos(\gamma - \beta + \alpha/2)}$$

Очевидно, что если величина введенного критерия Ω меньше единицы, ударная волна цунами в начальный момент получит меньшую скорость, чем первая волна, и скорости волн в начале будут соотноситься как:

$$v_x = \Omega^{1/2} w_x \quad \text{— взаимосвязь начальных скоростей.}$$

Если $\Omega < 1$, то соответственно $v_x < w_x$ и наоборот.

Причем приведенный критерий для Ω выполняется для любой системы измерений углов — как в радианах, так и в более привычных многим людям градусах.

Рассмотрим пример: $\alpha = 50^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 30^\circ$.

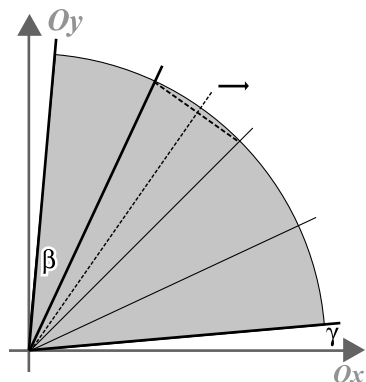
Тогда $\Omega \cong 0,564$ и соответственно $v_x \cong 0,75 w_x$

В примере вторая ударная волна получит меньшую начальную скорость, чем первая обычная волна.

Рассмотрим пример: $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $\gamma = 60^\circ$, когда углы, формирующие каждую из двух волн, одинаковы.

Тогда $\Omega \cong 1,0352$ и соответственно $V_x \cong 1,017 W_x$, то есть две начальные скорости практически совпадут.

Поскольку для вывода формул, связывающих скорости волн и их энергии, мы предполагали, что круговой сектор для упрощения вычислений может моделироваться треугольником, приведенные формулы справедливы только при малых значениях углов α и β и большом значении γ .



Если какой-либо из углов достаточно большой, сектор нужно разбить на несколько отдельных секторов и вычислить суммарные и средние арифметические величины.

Оценивать изучаемые величины при помощи численных и приближенных вычислений на практике может быть проще, чем строить аналитические модели. Особенно при высоких начальных погрешностях оценок углов и величин.

После того, как произошел второй фазовый переход, паре волн системы цунами у поверхности океана придаются некоторые начальные скорости и величины аккумулированной внутренней энергии. С этого момента волны начинают свободное движение от эпицентра и источника цунами.

Физика движения системы волн цунами в воде и расходящихся приповерхностных ударных волн землетрясения в земной коре значительно отличается друг от друга, хотя с точки зрения математической физики оба этих процесса у поверхности моделируются одними и теми же волновыми уравнениями в цилиндрических координатах.

Это связано с концептуальными различиями реализации физических механизмов передачи колебаний в жидких и твердых средах. Вода пластична и, в отличие от твердых горных пород, способна упруго реагировать на возмущения, формируя при этом турбулентные потоки, а не растрескиваясь или деформируясь.

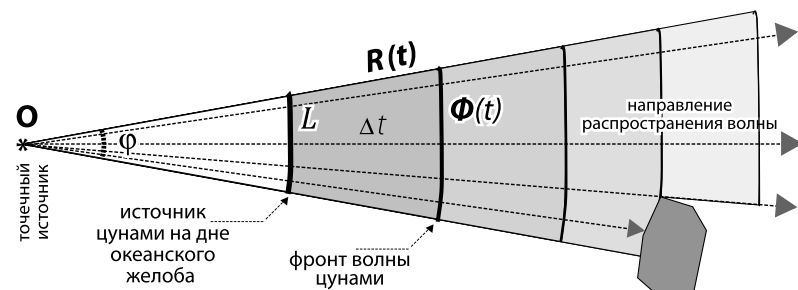
С момента начала движения волн цунами до момента начала полного гашения их внутренней энергии с точки зрения фазовых переходов система может быть смоделирована отдельной математической моделью с удобной для исследователя системой координат.

Выберем систему координат, которая будет двигаться синхронно вместе с волной. Ось Ox совпадет с направлением градиента к фронту распространения волны. Поэтому волны в этой системе можно рассматривать как стоячие, тогда их поведение моделировать существенно удобнее.

В такой модели мы отдельно рассматриваем скорость движения системы координат с течением времени, и отдельно — изменение профиля стоячей волны с течением времени. Связывать скорость движения системы координат и изменение профиля волны будет значение кинетической энергии, функция рассеивания энергии волн при движении и закон сохранения энергии.

Если бы волна цунами в идеальной жидкости двигалась без трения и рассеивания энергии в бесконечно длинном коридоре с параллельными стенками, ее профиль все время оставался бы неизменным, а система координат двигалась бы прямолинейно и равномерно. Такая идеализированная модель, естественно, в принципе не может использоваться для описания поведения цунами.

На практике, если источник в желобе на дне океана сформировал одну или несколько волн, каждая такая волна цунами движется независимо друг от друга в секторе круга угла ϕ , сохраняя образ своего источника, ее длина $\Phi(t)$.



Расходящиеся сектора и их профили связаны друг с другом по принципу подобия, если профиль волны не будет нарушаться препятствиями в процессе ее движения.

Воспользовавшись теорией подобия и геометрическим понятием обобщенного конуса, можно утверждать, что даже в случае линейного источника ненулевой длины на некотором удалении от источника волны можно рассматривать как волны от точечного источника большей мощности, находящегося в вершине O гипотетического конуса.

Чем меньше угол Φ и больше длина источника L , тем дальше будет находиться центр гипотетического цунами от некоторого точечного источника O .

Поэтому распространение волн цунами на некотором удалении как от точечного, так и от линейного источника можно изучать одинаково — длина источника не влияет на математическую и физическую модель поведения волн цунами при их движении в океане. Это же относится и к приповерхностным ударным волнам землетрясения.

В реальной практике наблюдения за цунами и полученные фактические данные носят дискретный характер. Исследователям обычно известны показатели скорости движения ударной волны цунами и высота волн на некоторых временных отрезках в табличной форме. Поэтому автор будет строить дискретную оценочную модель.

Обозначим $\Phi(t)$ длину линии фронта ударной волны, в начальный момент совпадающей с длиной L источника:

$\Phi(0) = L$, которая при условии свободного и беспрепятственного распространения будет увеличиваться, повторяя профиль источника по закону подобия.

Для удобства будем рассматривать очень малые значения угла Φ и близкие к линейным или точечным источники цунами L , поэтому профиль $\Phi(t)$ можно оценивать как очень близкий к линейному отрезку прямой.

Рассмотрим, как влияют препятствия на пути распространения ударных волн цунами на их энергию и изменение конфигурации фронта ударной волны.

Будем использовать тот факт, что волны цунами не подчиняются классическим волновым законам, поскольку вторая волна цунами несет в себе приповерхностную ударную волну, ведущую себя как аномальный объект — как твердая, тонкая и упругая энергетическая мембрана. В выбранной нами системе координат она неподвижна.

Будем рассматривать поведение волн цунами в дискретной системе модели времени — в конечном наборе временных интервалов и временных точек:

$t_0, t_1, \dots, t_k, \dots$ — временные точки наблюдений.

причем $t_0 = 0$ и интервалы $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$

Введем в рассмотрение функцию $\Theta(t)$, которая будет описывать потери внутренней энергии системы волн цунами, связанные с рассеиванием энергии в океане при движении и трении (в том числе об дно, при встрече с объектами).

Потери энергии первой обычной и второй ударной волн обозначают функции $\Theta_w(t)$ и $\Theta_u(t)$, причем

$\Theta(0) = \Theta_w(0) = \Theta_u(0) = 0$ — начальный момент

$\Theta(t_k) = \Theta_w(t_k) + \Theta_u(t_k)$ — сложение потерь.

Энергия системы волн в момент времени с учетом ненулевой функции потерь может быть записана в форме:

$$Q(t_k) = (Q_w + Q_u) - (\Theta_w(t_k) + \Theta_u(t_k))$$

$$Q_w(t_k) = Q_w - \Theta_w(t_k) \quad \text{— первая волна}$$

$$Q_u(t_k) = Q_u - \Theta_u(t_k) \quad \text{— вторая волна.}$$

Мы рассматриваем систему с ненулевой энтропией, которая является исключительно возрастающей функцией.

Поэтому функции потерь энергии являются монотонно возрастающими, ограниченными, непрерывными или разрывными функциями, где каждый разрыв имеет форму конечного скачка, описывающего каждую встречу цунами с каждым существенным препятствием.

Соответственно, в каждый момент времени на некотором участке фронта волны длиной $\Delta\Phi(t_k)$ будет сконцентрирована внутренняя энергия системы $\Delta Q(t_k)$:

$$\Delta Q(t_k) = \Delta\Phi(t_k) (Q_w(t_k) + Q_u(t_k)) / \Phi(t_k)$$

$$\Delta Q_w(t_k) = \Delta\Phi(t_k) Q_w(t_k) / \Phi(t_k) \quad \text{— первая волна}$$

$$\Delta Q_u(t_k) = \Delta\Phi(t_k) Q_u(t_k) / \Phi(t_k) \quad \text{— вторая волна.}$$

Кинетическая энергия движения каждой волны также будет расходоваться на трение и постепенно рассеиваться. Введем функции $\Xi_w(t)$ и $\Xi_u(t)$, соответственно обозначающие потери кинетической энергии первой обычной и второй ударной волны.

$$\Xi_w(0) = \Xi_u(0) = 0 \quad \text{— начальный момент}$$

Кинетическая энергия в каждый момент времени соответственно будет составлять:

$$E_w(t_k) = E_w - \Xi_w(t_k) \quad \text{— первая волна}$$

$$E_u(t_k) = E_u - \Xi_u(t_k) \quad \text{— вторая волна.}$$

Отметим, что кинетическая энергия этих двух волн не может складываться, поскольку волны описываются разными законами и представляют собой различные объекты. Каждая волна в течение длительного временного интервала может двигаться сама по себе со своей скоростью, как это было описано ранее. Более того, до момента встречи с берегом или момента полного гашения внутренней энергии вторая ударная волна может даже не догнать первую.

Поскольку процесс идет с непрекращающимися потерями кинетической энергии, скорость каждой волны будет постепенно уменьшаться.

В открытом океане такие процессы идут очень медленно, а при повышении рельефа дна резко ускоряются, и скорость волн начинает тормозиться быстрее.

Так как изначально в модели цунами внутренняя и кинетическая энергия оказались отделенными друг от друга и были направлены на различные не влияющие друг на друга с точки зрения физики процессы, кинетическая энергия движения волны не оказывает существенного влияния на ее внутреннюю энергию, и наоборот.

Вертикальная векторная составляющая всей энергии источника перешла во внутреннюю энергию, а горизонтальная составляющая — в кинетическую, обеспечивая движение волн цунами по океану и перенос внутренней энергии каждой из них на огромные расстояния.

Так как вектора сил были перпендикулярны друг другу, они имеют нулевое скалярное произведение и в

момент разделения энергий во время второго фазового перехода перестают оказывать существенное влияние друг на друга (этим влиянием можно пренебречь).

Происходит это до того момента, пока одна волна не догонит другую и не образует парную систему волн (если такое вообще когда-либо произойдет).

Поэтому цунами переносят огромные энергии от источников на большие расстояния до тех пор, пока каждая из двух волн движется независимо друг от друга. Каждый вид энергии волны расходуется исключительно целевым образом без перехода одного вида энергии в другой.

На разрушения береговой линии в основном направляется внутренняя энергия волны цунами. Ее кинетическая энергия становится источником прибрежного волнения как такового и энергии продвижения цунами вглубь берега.

Поскольку фронт волны цунами распространяется клином (только за счет геометрии происходит уменьшение концентрации внутренней энергии на участке фиксированной длины), энергия данного участка уменьшается. Она также уменьшается за счет трения и рассеивания внутренней энергии. Чем дальше фронт цунами от источника, тем слабее будет его удар о препятствие фиксированной длины. Тем меньше внутренней энергии потеряется при встрече с таким объектом, и тем слабее будут разрушения в окрестности этой береговой линии.

Рассмотрим два малых объекта, имеющих одинаковую протяженность и форму береговой линии вдоль фронта цунами, но расположенных на различных расстояниях от источника цунами. Первый объект цунами достигает за время t_k , второй — за время t_m .

Запишем значения внутренней энергии, которая будет направлена на причинение разрушений береговой линии одинаковой длины ΔS в обоих случаях.

$$\Delta Q_u(t_k) = \Delta S (Q_u - \Theta_u(t_k)) / \Phi(t_k)$$

$$\Delta Q_u(t_m) = \Delta S (Q_u - \Theta_u(t_m)) / \Phi(t_m)$$

Причем время $t_k < t_m$, потери $\Theta_u(t_k) < \Theta_u(t_m)$

и длина фронта ударной волны $\Phi(t_k) \leq \Phi(t_m)$

Обозначим $R(t)$ расстояние фронта цунами от гипотетического или реального точечного источника O или от реального линейного источника. Тогда

$$\Phi(t_m) = \Phi(t_k) + 2 (R(t_m) - R(t_k)) \sin \varphi$$

Поэтому, чем дальше объект, тем слабее причиняемые разрушения на участках береговой линии фиксированной длины. Рассмотрим некоторые примеры.

Недалеко от эпицентра землетрясения цунами не только разрушает все, что находится на береговой линии, но разрушает саму береговую линию и даже целые участки коралловых рифов и плоских островов.

Если на пути волны цунами недалеко от эпицентра стоит небольшой выступающий над водой участок кораллового рифа (плоский остров), первая волна перехлестывается через него, а ударная волна как ножом подрезает и разрушает островок благодаря высочайшей концентрации колоссальной внутренней энергии на очень малых участках фронта.

Энергия, которая разрушает островок, скачком перейдет в функцию потерь $\Theta_U(t)$ и скачком уменьшает величину внутренней энергии ударной волны.

Если островок маленький и плоский, кинетическая энергия цунами при его прохождении почти не израсходуется, и на скорость движения цунами факт разрушения такого островка не окажет существенного влияния.

Если же волна цунами встретила крупный остров или часть континента, который частично перекрывает фронт ударной волны, цунами не сможет обогнуть такой объект. Там, где встретятся цунами и суша, произойдет полная потеря энергии волн цунами. Длина фронта ударной волны скачком уменьшится на длину захваченного участка суши.

Первая большая волна накатит на берег и будет вести себя, как и крупная океаническая или штормовая волна, рассеявшись впоследствии по законам движения океанских волн и не оказав никакого влияния на уцелевшую уходящую с высокой скоростью часть фронта цунами.

Кинетическая энергия движения второй — ударной волны — скачком перейдет в энергию штормовых волн на крутом берегу или израсходуется на дальнейшее

инерционное продвижение цунами вглубь суши при очень пологих берегах. Это поясняет феномен различного поведения цунами при различных типах уклона берега.



Чем круче и обрывистее берег — тем сильнее будет поверхностное волнение, которое может напоминать сильный шторм. Высокие волны будут пениться, вздыматься и биться о берег, а затем рассеются в океане по тем же законам, что и сильные штормовые волны. Кинетическая энергия движения первой и второй волн цунами вызовет классическое штормовое возмущение поверхности воды у обрывистого берега и слабое волнение у пологого.



Чем более полого, гладко и ровно спускается в море участок суши, тем слабее будет поверхностное волнение, но тем сильнее и глубже продвинется цунами вглубь суши.

Это обманчивое отсутствие штормовых волн приводит к тому, что люди реально не оценивают надвигающуюся опасность. Кинетическая энергия второй волны в момент приближения к берегу переходит в потенциальную и обеспечивает перенос на сушу огромной массы воды, вмещающей приповерхностную ударную волну (на фото слева ее фронт очерчивает дуга белых бурунов).

Почти вся внутренняя энергия цунами у берега будет практически полностью поглощена объектами суши в той или иной форме, так как она носит энергетически-направленный векторный и не волновой характер.

На крутом берегу, вдоль которого лежат твердые горные породы (например, граниты и базальты), способные принять на себя энергию ударной волны и упруго поглотить ее, достаточно высокий процент энергии цунами передается земной коре и поглощается в форме сейсмических волн. Такие всплески сейсмической активности регистрируются сейсмографами при сверхмощных ударах цунами о скалистые гранитные и базальтовые береговые образования.

На крутом берегу волна цунами резко и скачкообразно бьет в основания всех береговых построек, разрушая их у самого фундамента. Если основание и фундамент не очень крепкие, цунами может разрушить или сдвинуть строительную конструкцию снизу с последующим ее обрушением.

Если достаточно крутой или не очень пологий берег сложен хрупкими осадочными и органогенными породами, энергия цунами может частично или полностью разрушить его вплоть до катастрофических последствий.



Если берег очень пологий и ударная волна значительно проникла вглубь суши, она будет разрушать основания всего, что попадает на ее пути — подрезать деревья, сносить не закрепленные на фундаменте легкие строительные конструкции, а также калечить людей. Отягчающим для человека обстоятельством и злой насмешкой Природы является тот факт, что рост обычного человека в среднем равен высоте горба ударной волны цунами.

Поэтому у человека, стоящего на земле или плывущего у поверхности, шансы уцелеть ничтожны, даже если волна наступает на сушу не очень быстро. Людям нужно подняться вверх над приповерхностной ударной волной.



Приводим схемы эпицентра, данные о скоростях и траекториях передвижения фронтов цунами, которое произошло в 2004 году у берегов Суматры.

Видно, что они достаточно хорошо согласуются с общими теоретическими выкладками, приводимыми автором — волны цунами сформировались вдоль разломов и зон резких и значительных подвижек литосферных плит.

В результате землетрясения в океане образовалось гигантское цунами. Его высота в открытом океане составила 0,8 м, в прибрежной зоне — 15 м, а в зоне заплеска — 30 м. Скорость волны в открытом океане достигла 720 км/ч, снизившись по мере торможения в прибрежной зоне до 36 км/час. Через 15 минут после первого толчка волна достигла и смела северную оконечность Суматры.

Через полтора часа она обрушилась на побережье Таиланда, через два часа достигла Шри-Ланки и Индии, за восемь часов прошла Индийский океан, а за сутки — впервые в истории наблюдения волн цунами! — обогнула весь Земной шар и Мировой океан. Даже на тихоокеанском побережье Мексики ее высота составила 2,5 м. Рождественская волна 2004 года унесла жизни около 300 тыс. человек.

Скорость Индийской плиты,двигающейся в северо-восточном направлении и погружающейся под Бирманскую, составляет около 6,5 см/год. Причем напряжения накапливались долго — сотни лет не было мощной разрядки.

При типичном подводном землетрясении с поверхности контакта плит срывается только один блок. Но иногда, например при косом надвиге плит, отдельный блок задевает соседние блоки и по принципу домино развивается каскад аналогичных срывов вдоль кромки всей нависающей плиты. Именно по этой причине процесс разрыва поверхности между литосферными плитами 26 декабря 2004 года длился целых 8 минут, в отличие от обычной в среднем минуты.

Это привело к образованию целой серии приповерхностных ударных волн, которые несли в себе колоссальную кинетическую энергию и огромную энергию ударных волн. Цунами вызвало катастрофические последствия на всем пути своего следования, пока волны не затухли.

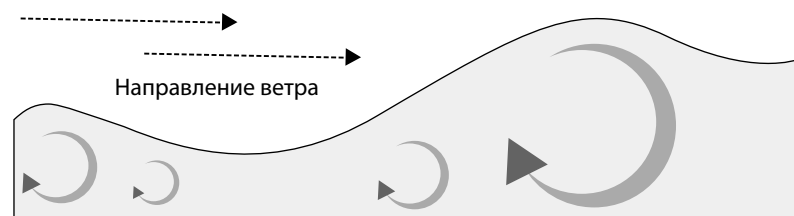
Рассмотрим модель поведения элементов жидкой среды внутри волн, которые формируют цунами. Обычно исследователи не вдаются в детальное математическое моделирование того, что происходит внутри волн цунами от поверхности до дна океана.

Что именно на молекулярном уровне происходит на фронте гидравлической или воздушной ударной волны, до сих пор однозначно не объяснено — существует несколько различных концепций поведения молекул жидкости и газа.

Прогресс XX и XXI века принес ученым-теоретикам неоценимые подарки от исследователей-практиков и очевидцев — он позволил технически сфотографировать, измерить и тщательно изучить по статистическим данным гидравлическую или воздушную ударную волну как таковую. Ударные волны в жидкости и газах имеют много общего.

Однако качественное моделирование потоков движений жидкости под волнами цунами, поясняющее феномен постепенной концентрации внутренней энергии всей волны в приповерхностном слое, до сих пор не было объяснено. Давайте рассмотрим этот вопрос в деталях.

Воспользуемся моделью поведения воды в приповерхностных волнах. Хотя вода не течет вслед за ветром, который их формирует и вызывает возмущения поверхности, она взлетает вверх в направлении ветра, образуя гребни, а затем падает вниз, делая круги в вертикальной плоскости.



Именно таким образом переносится внутренняя энергия в жидкой среде. Поэтому предмет на поверхности воды практически не движется, а поднимается вверх и вниз.

Только на очень идеалистичной математической модели вода совершает правильные кругообразные движения. Исследователи установили, что внутри цунами вода циркулирует по эллипсовидным траекториям, очень сильно сжатым по горизонтали по сравнению с обычными, даже мощными штормовыми волнами — траектории их фазовой циркуляции значительно уплощены по горизонтали.

Рассмотрим, как на начальном формируются фазовые траектории циркуляции воды в волнах цунами. Энергия почти мгновенно распространяется от источника и формирует две волны, одна из которых — ударная. Как продольный ветер передает энергию поверхностным волнам и вызывает круговую циркуляцию воды у поверхности, так и рассеивание направленных импульсов энергии от источника формирует круговые циркуляции воды по замкнутыми фазовым траекториям.

Чем мощнее импульсы, тем сильнее энергия циркуций и тем большего радиуса фазовые траектории описывает вода в момент передачи импульса энергии в толще воды.

Если бы энергия неограниченно распространялась в воде до момента полного рассеяния, радиус фазовых траекторий постепенной бы уменьшался, сохраняя свою круговую или очень близкую к окружности форму.

Но цунами имеет ограничение в виде поверхности океана, через которую энергия в атмосферу ни в какой форме не передается и не исчезает. Она концентрируется и перераспределяется у поверхности океана и вниз.



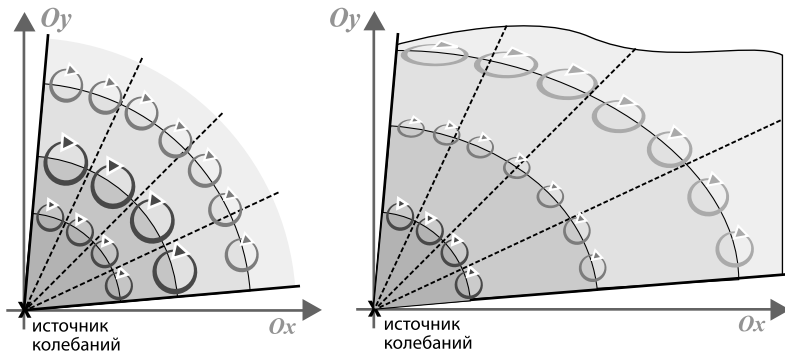
Если энергия источника очень мощная, в круговые движения глубинной воды могут быть вовлечены даже рыбы и другие обитатели подводных глубин.

Поэтому при особо мощных источниках расходящаяся энергия иногда поднимает к поверхности океана и затем переносит на большие расстояния странные монстровидные создания, позволяя ученым открывать

и описывать новые и неизвестные ранее виды глубинных обитателей океана, которые сегодня невозможно наблюдать иначе — технические средства не позволяют.

Мощность источника должна быть такой, чтобы донести вращаемую в потоках энергии подводную фауну до поверхности океана. Если циркуляция воды ослабнет раньше, все ранее поднятые животные потеряются по дороге.

После мощного цунами в декабре 2004 года на пляжи Таиланда, Шри-Ланки и Индии было выброшено огромное количество всевозможной живности, ранее человеком не виденной. На фото редкие виды рыб, выброшенные цунами в Индонезии. Представьте себе, какие мощные циркуляции воды подняли ее на поверхность и доставили на берег.



Вдоль фронтов распространяющихся от источника сферических волн изменяются показатели вертикальной и горизонтальной составляющей импульса силы (то есть градиента, направленного перпендикулярно к поверхности сферических волн).

Горизонтальная составляющая вектора импульса силы стремится сжать фазовые траектории горизонтально и прижать к поверхности, поэтому циркуляция воды у поверхности по вертикали будет минимальной.

Чем ближе фазовые траектории циркуляции воды к эпицентру на поверхности океана, тем сильнее будет сжата в этой области фазовая траектория, и наоборот.

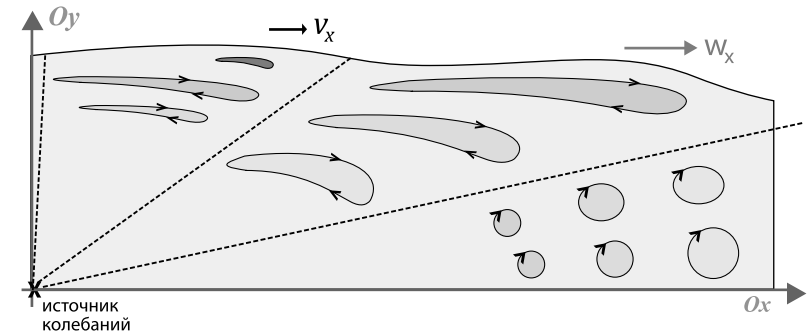
На схеме продольные горизонтальные составляющие фазовых траекторий у поверхности сильнее сжаты в области эпицентра, чем по краям у дна океана.

Это связано с наличием в меру упругого ограничения свободного распространения волн — поверхности океана.

Когда одни волны источника нагоняют другие у поверхности океана, они складываются и дополнительно сжимают уже образовавшиеся фазовые траектории циркуляции, поворачивая их в горизонтальную плоскость благодаря энергии, продолжающей поступать от источника цунами на дне океана. Формируется следующая система волн.

В центральном секторе образуется чрезвычайно тонкий слой, формирующий ударную волну цунами характерной формы. Циркуляция в более удаленном от эпицентра секторе сформирует первую волну цунами. Она подчиняется волновым законам, но фазовые траектории циркуляции будут значительно уплощенными, причем чем ближе к эпицентру, тем сильнее это сдавливание.

Остальная энергия, сконцентрированная в толще океана и циркуляция которой близка к окружности, будет постепенно рассеиваться при поступательном движении волны вперед.



Внимательно посмотрите на полученные результаты моделирования и схемы — фазовые траектории циркуляции воды внутри волн цунами вблизи эпицентра и на некотором расстоянии с высочайшей степенью точности напоминают профиль гигантского крыла самолета в разрезе.

Да и горизонтальная проекция цунами при осмотре из космоса напоминает размах крыльев гигантского мифического порождения гнева Земли и спокойствия Океана.

Поведение крыла в жидкости и газах было великолепно изучено и описано выдающимися учеными XX века и

успешно реализовано на практике. Полет самолета видели все. Посмотрите на движение (или полет ??) на поверхности озер, рек и морей судов на подводных крыльях — и Вы увидите реализацию возникающей в жидкости подъемной силы подводного крыла профиля особой формы.

При движении судно поднимается над поверхностью воды, а крылья находятся практически у самой поверхности воды. Когда скорость падает — судно опускается до привычного уровня ватерлинии.

Это значит, что под действием кинетической энергии в результате постоянного перемещения воды и фазовых траекторий циркуляции возникнет слабая подъемная сила, которая обеспечивает медленный и постепенный подъем этих фазовых траекторий к поверхности.

Возникающая подъемная сила очень медленно и плавно истощает энергию движения волн, причем далеко от берега функция таких незначительных потерь будет плавной и гладкой.

Значит, вся внутренняя энергия цунами постепенно будет концентрироваться у поверхности, даже если цунами движется в открытом океане над бездной.

Конечно, это движение не сравнимо с полетом современного сверхзвукового самолета, хотя при скоростях движения цунами... Цунами движется на весьма больших дозвуковых скоростях в океане и притормаживает на континентальном шельфе до более низких скоростей.

Ученые до сих пор не могли найти природного аналога полета, совершаемого только за счет подъемной силы профиля статического (не машущего) крыла определенной формы. Но Природа сделала свои изобретения до появления первобытного человека и уж тем более задолго до эры научно-технического прогресса. И она не устает постоянно демонстрировать их человечеству.

Аналог такого профиля статического крыла в природе, оказывается, существует — это фазовые траектории циркуляции жидкости внутри волн цунами. Топливо — это энергия волн, переданная цунами его источником.

Поэтому можно смело утверждать, что цунами в буквальном смысле летит на своих собственных адских крыльях у поверхности океана.

Первую волну можно образно сравнить с «самолетом-разведчиком», стартующим с трамплина. А вторую волну цунами — со смертоносным военным «истребителем» вертикального взлета, с идеальной гидродинамикой, несущем сверху поверхности крыльев гигантский «нож» — страшную, эргономичную гидравлическую ударную волну-«крыло».

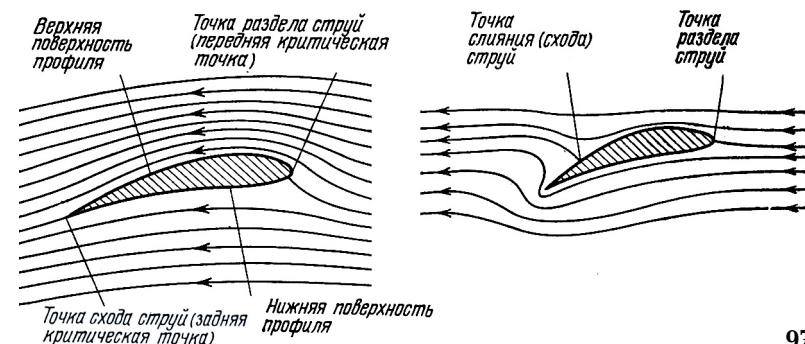
Достигая вертикального препятствия на пути движения, оба «самолета» как будто бы разбиваются вдребезги один за другим, высвобождая всю энергию мгновенно разрушенной ударной волны и всю кинетическую энергию.

Достигая же очень полого берега, «самолет-разведчик» слегка выезжает на берег и формирует небольшой трамплин, который превращает следующий за ним «истребитель», «заряженный» ударной волной, в плоскую, несущую острый нож «транспортную амфибию».

Она «выезжает» на сушу, движется по инерции и срезает объекты на своем пути до тех пор, пока потенциальная энергия не сравняется с весом воды или пока цунами не разобьется о вертикальные препятствия.

Как только вес выдвинутого на сушу объема воды сравняется с потенциальной энергией излившегося на сушу цунами, наступит равновесие состояний, цунами остановится и начнет постепенное отступление обратно в море, продолжая дальнейшее истощение внутренней энергии, пока она окончательно не рассеется.

Проследим за поведением математической модели волн цунами в более строгих терминах и понятиях. Приведем схемы и фотографии из классической хрестоматийной книги Г. Н. Абрамовича «Прикладная газовая динамика».



На схеме приведены два предельных случая обтекания профиля крыла потенциальным потоком несжимаемой жидкости.

На схеме слева показано обтекание с циркуляцией. С задней части крыла будут стекать вихревые циркуляционные потоки. Чтобы не было отрыва потока, в этой точке должна быть бесконечная скорость.

Уменьшение угла атаки приводит к перемещению точки разветвления струй вверх и вперед. Если при отрицательном углу атаки точка схода струй совпадает с задней кромкой, получается безотрывное течение. На схеме справа — обтекание крыла без циркуляции.

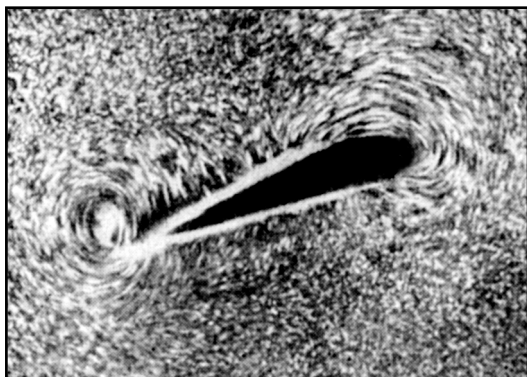
Общий случай обтекания крыла на практике получается наложением этих двух предельных случаев.

Очевидно, что при некотором значении циркуляции вокруг крыла задняя критическая точка в силу особенностей геометрии профиля совпадает с задней острой кромкой циркуляции. В этом единственном случае циркуляционное течение может быть реализовано безотрывным образом.

Если энергия не отрывается от крыла или ее отрыв ничтожно мал, она формирует подъемную силу. При безотрывном обтекании профиля вокруг него возникает циркуляция величины, при которой задняя острая кромка является точкой схода струй (постулат Чаплыгина-Жуковского).

В этом случае сила давления на крыло оказывается направленной перпендикулярно к скорости ламинарного (невозмущенного) набегающего потока.

Приведем фотографию начального вихря, который срывается с задней кромки крыла и вызывает возникновение циркуляции вокруг крыла, порождающей подъемную силу.

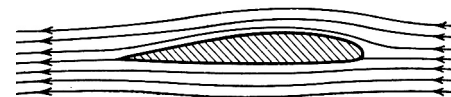


На фото видны как начальный вихрь сзади, так и циркуляционное течение около крыла.

При набегании потока на крыло возникает циркуляция, в результате наложения которой на набегающий поток скорости над крылом становится больше, а под крылом — меньше скорости набегающего потока. Давление над крылом понижается, а под крылом повышается, что приводит к появлению подъемной силы.

Безусловно, по сравнению с жестким профилем реального крыла самолета подъемная сила, возникающая у фазовых траекторий внутри цунами, чрезвычайно мала.

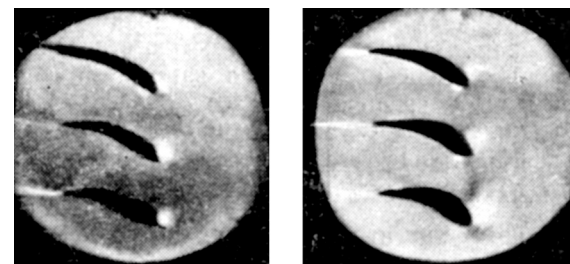
Но, поскольку эти профили не жесткие, в момент начала движения они приобретут наиболее оптимальный с точки зрения гидродинамики профиль.



Это произойдет потому, что при начале скоростного движения вся избыточная энергия воды, которая вызывает образование тормозящих вихрей, целевым образом перераспределится и стечет с задней и передней поверхности «крыла», сформировав в результате максимально приближенный к идеальному профиль фазовых траекторий.

В соответствии с постулатом Чаплыгина-Жуковского, такое состояние может быть достигнуто единственным образом — и оно фактически достигается в волне цунами.

Поэтому волны цунами имеют почти идеальную гидродинамику, не вызывают возмущений вне своей локальной окрестности и могут двигаться на гигантских скоростях продолжительное время — вплоть до полного огибания Земного шара при сверхмощном стартовом импульсе.

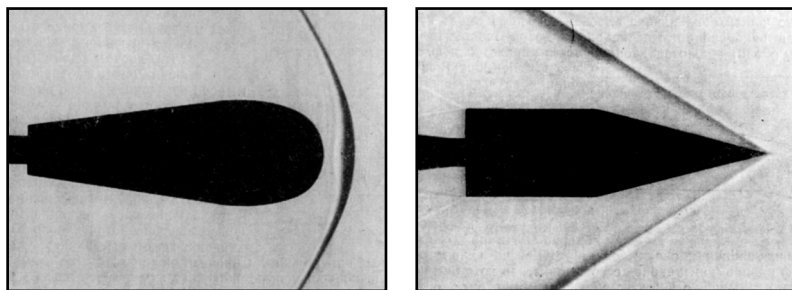


На фото сверху приведены снимки спектров обтекания лопастей диффузорной решетки при невысоких (дозвуковых) скоростях — на подобных лопастях изучалась динамика поведения жидкости и газа в исследовательских лабораториях.

Сверхзвуковой профиль должен иметь острую (клиновидную) переднюю кромку.

Если крыло движется на сверхзвуковых скоростях, перед ним формируется сопровождающая крыло и следующая перед ним ударная волна.

Она вызывает значительный рост и резкий скачок сопротивления при движении. Приводим теневые фотографии скачков уплотнения при обтекании различных по форме профилей на сверхзвуковых скоростях.



Рассмотрим, могут ли возникнуть такие условия, при которых движение волн цунами может осуществляться на сверхзвуковых или близких к ним дозвуковых скоростях.

Источник землетрясения генерирует серию колебаний в течение некоторого временного отрезка.

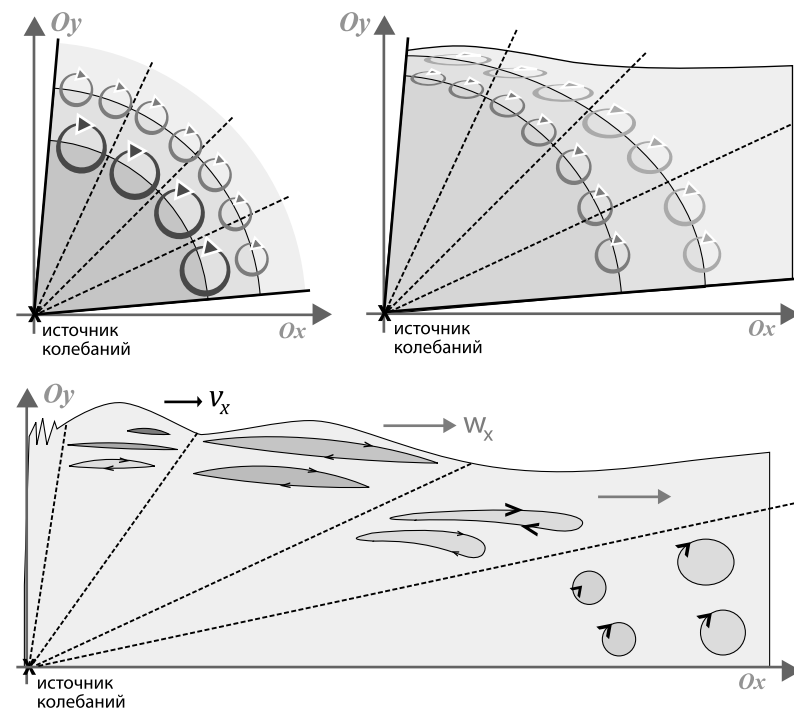
Эта серия колебаний соответственно формирует серию размещенных одна под другой фазовых траекторий циркуляции воды внутри волн цунами.

Чем продолжительнее время колебаний источника, тем глубже будут простираться фазовые возмущения. Сверхдлительные по времени и сверхмощные источники могут сформировать протяженную на глубину волну — от поверхности до дна самого океана. Циркуляция воды в таких волнах цунами будет вызывать перемешивание воды в горизонтальных локальных зонах.

Предположим, что внутри толщи вод океана или у самого дна возникает точечный мощный источник энергии. Он излучает и передает всю энергию в океан из чрезвычайно малой зоны за очень короткий отрезок времени и может быть представлен дельта-функцией Дирака.

Поэтому в толще океана не будет сформирована система протяженных в глубину циркуляций воды по фазовым траекториям. Эта система возникнет только в узком приповерхностном слое. Фазовые траектории в окрестности эпицентра могут оказаться настолько сжатыми от мгновенно высвобожденной энергии, что будут иметь клиновидную и заднюю, и переднюю кромку.

Источник точечной энергии должен находиться относительно недалеко от поверхности (по сравнению с глубиной океанического желоба), чтобы до поверхности мог дойти значительный заряд энергии, не рассеявшись и не перераспределившись, в узком секторе эпицентра.

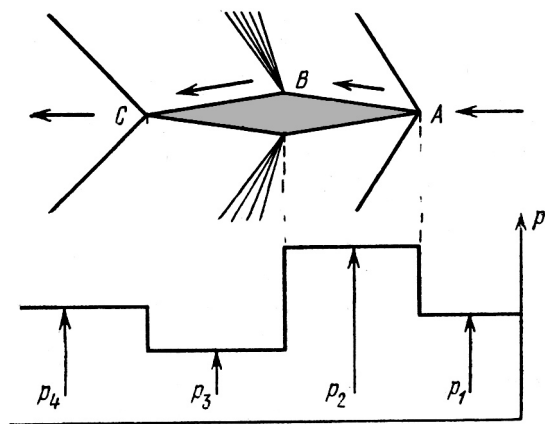
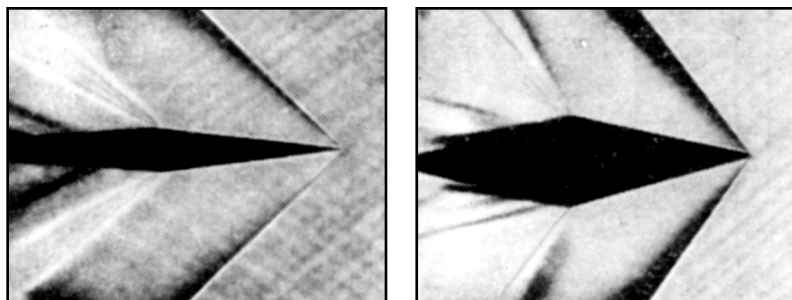


Это позволит таким цунами физически двигаться у поверхности на скоростях, близких к околосветовым.



Для сравнения приведем два профиля крыла сверхзвукового самолета — ромбовидный и чечевицеобразный.

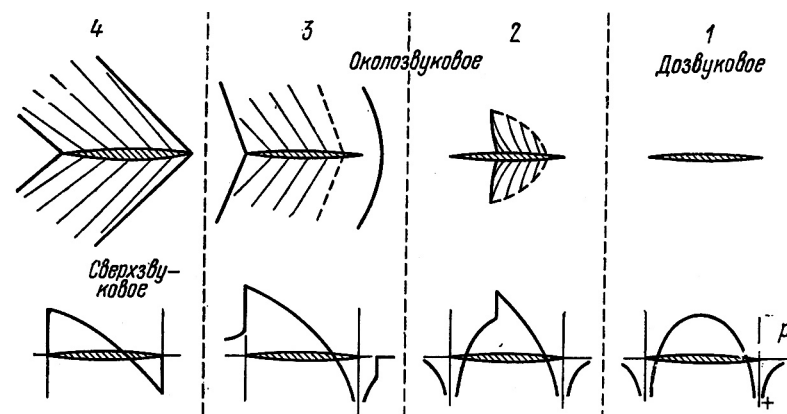
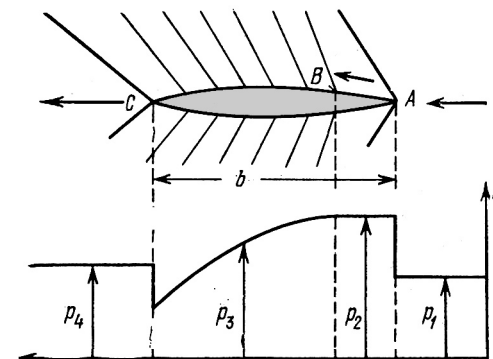
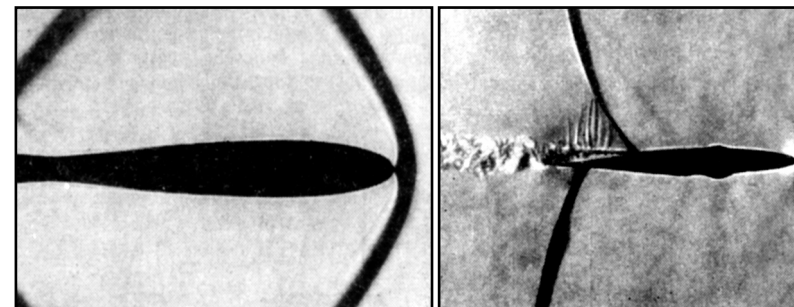
Наличие клинообразной передней кромки резко уменьшает сопротивление крыла при сверхзвуковых и близких к ним скоростях. Приводим схему и фотографии сверхзвукового обтекания ромбовидного профиля под нулевым углом атаки (лабораторное моделирование).



На схеме показаны косые скачки уплотнения и график распределения скачков давления p . Очевидно, что у верхнего и нижнего углов ромбовидного профиля крыла формируются косые ударные волны.

В океане существование такого невозможно — энергия, стекающая со всех подобных негладких элементов, будет мгновенно сорвана набегающими потоками, и профилю будет придана обтекаемая чечевицеобразная форма.

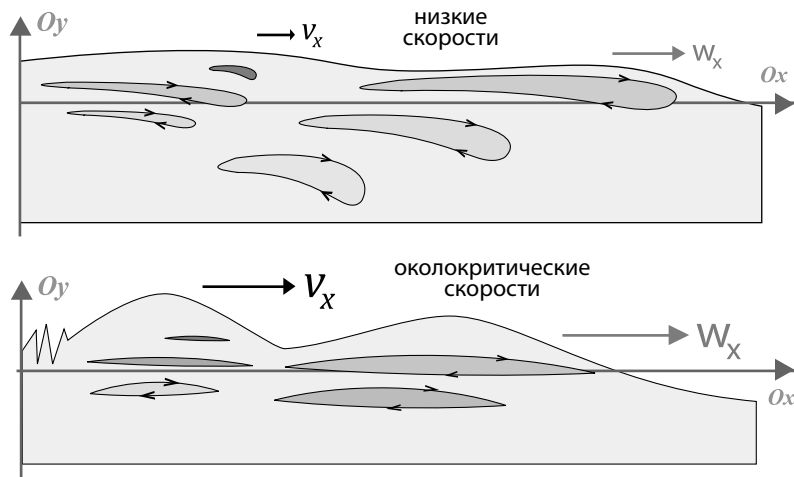
Приведем теневые фотографии обтекания чечевицеобразного профиля при околозвуковых скоростях с нулевым углом атаки и схему характерных режимов обтекания при дозвуковых, околозвуковых сверхкритических, сверхзвуковых докритических и сверхзвуковых скоростях.



В момент второго фазового перехода и начала движения волн цунами на критических дозвуковых скоростях произойдет следующее.

На поверхности будут сформированы волны, имеющие более крутой профиль (увеличится отношение высоты и длины волны по сравнению с обычным цунами) при том, что фазовые траектории движения воды внутри волн будут сдвинутыми по вертикали и почти горизонтальными.

В обычных волнах цунами внешний профиль волны более пологий, фазовые траектории имеют конфигурацию с закруглением угла атаки, большую амплитуду перемещения воды в вертикальной плоскости и располагаются ближе к поверхности океана.



Приведенные схемы дают наглядное представление об особенностях движения волн цунами на различных скоростях недалеко от эпицентра на поверхности океана. С этого момента волны цунами начинают свободное движение у поверхности океана.

Когда на берег обрушивается сверхмощное и сверхразрушительное цунами, люди немедленно начинают видеть в этом злые помыслы психов-военных и ученых-маньяков, тайно взорвавших в океане ядерную или термоядерную бомбу. Но такие цунами имеют не техногенный, а гораздо более мощный природный источник — разрядку напряжений литосферных плит Земли вблизи ее поверхности на дне мирового океана.

В XX веке в открытой акватории Тихого океана изредка взрывали сверхмощные заряды. Но такие испытания носили крайне ограниченный характер и изучались по обе стороны океана, невзирая на политические разногласия государств (автор не имеет в виду печально известные и бесполезные для науки испытания на атолле Муророо). Эпицентры взрывов располагались достаточно далеко от берега и на некотором удалении от цепи мелких безлюдных островов и дугообразной подводной гряды.

Рассматривалась в первую очередь проблема моделирования цунами искусственно и возможные методы глобального противодействия этому масштабному бедствию.

Эпицентр этого взрыва строго описывается набором дельта-функций и вызывает искусственное появление волн цунами, движущихся на околокритических скоростях. Их поведение четко согласуется с представленной моделью.

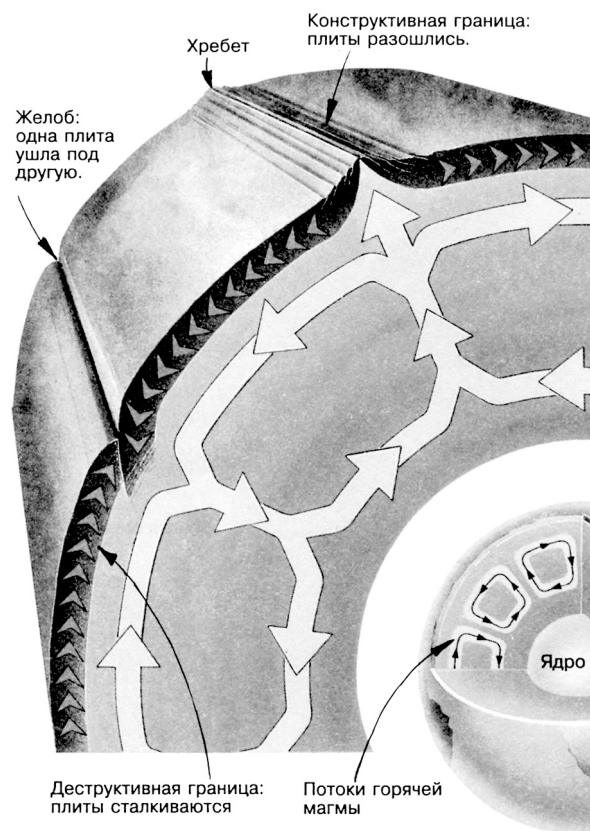
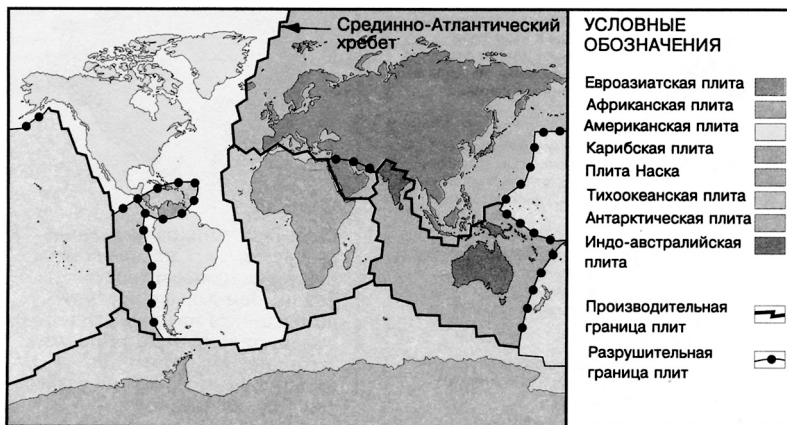
При глубоком подводном взрыве на поверхности формируется четко выраженный пологий холм, содержащий ударную волну. Затем ударная волна разрывается в центре и радиально расходится в разные стороны.

На месте разрыва куполообразной ударной волны формируется направленный вертикально, с высокими стенками столб воды. У его основания стенки перпендикулярны поверхности океана.

Под действием направленного вверх импульса силы, резко перешедшего во внутреннюю энергию цунами, под местом разрыва образуется локальная зона концентрации давления. Как только купол ударной волны разрывается, вода под давлением устремляется вверх, образуя столб, напоминающий струю жидкости, хлещущую вверх из скважины высокого давления.

Границы столба воды с высокой степенью точности обрисовывают границы зоны разрыва начальной куполообразной структуры ударной волны. Во время подземного взрыва на таком месте образуется воронка. Третья и заключительная большая волна не формируется.

А теперь приведем схемы литосферных плит Земли, а также производительные и разрушительные границы этих плит. Ниже наглядно представлен механизм трансформации литосферных плит Земли.



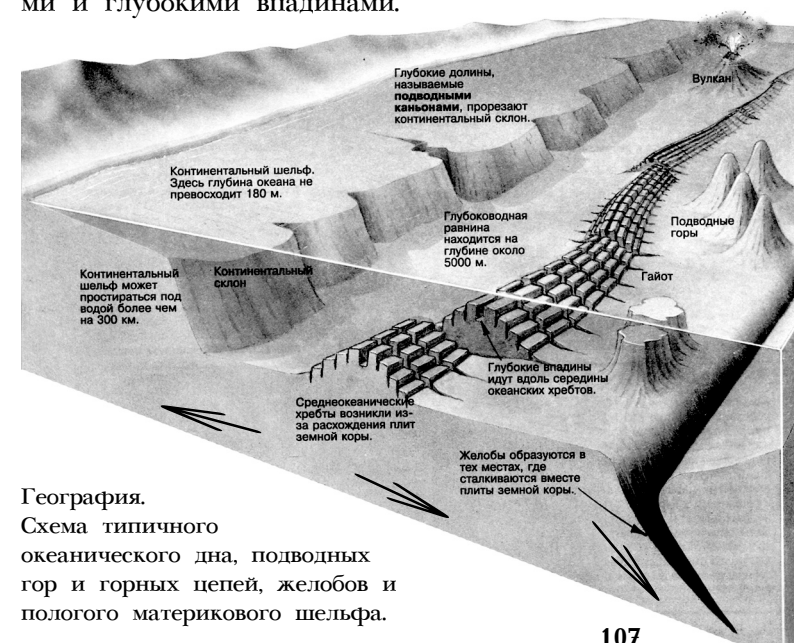
§ 5. Модель распространения волн цунами

В этом параграфе будут изучаться аспекты перераспределения энергии при движении волн цунами и особенности различных типов разрушения, саморазрушения и рассеивания энергии системы волн цунами.

Наиболее мелкие части океана — пологие и ровные континентальные шельфы, средняя глубина которых не превосходит 180 метров.

Подводные глубокие желоба формируются там, где одна литосферная плита уходит под другую. Вода на глубине практически неподвижная, очень холодная, не освещаемая солнцем, и давление на глубине колоссальное.

Подводные хребты возникают из-за расхождения литосферных плит. Они простираются по дну океана в длину до 60 000 км. Вершины их гор довольно плоские, такую форму они приобретают благодаря движению воды в океане. Цепи гор прорезаны глубокими вертикальными трещинами и глубокими впадинами.



География.
Схема типичного океанического дна, подводных гор и горных цепей, желобов и пологого материкового шельфа.

Дно равнин океана относительно плоское. Под дном земная кора значительно истончена, поэтому вероятность образования на ней вулканов и гор вулканического происхождения намного выше, чем на континенте. Если подводные горы имеют плоские вершины, их называют гайотами.

Очагами источников энергии, формирующих цунами различной интенсивности, могут служить землетрясения из-за раздвижки или надвига литосферных плит, а также подводные вулканы.

Эти потенциальные источники цунами концентрируются в достаточно узких зонах океанического дна.

Объекты морского дна не подвергаются такой эрозии, как в атмосфере. Океанические хребты хранят в себе историю рывковых раздвижек и приостановок движения литосферных плит.

Поверхностный слой океана прогревается солнцем и перемешивается за счет движений волн. Ниже зон солнечного и сумеречного освещения вода почти неподвижна.

Эту зону могут достигать лишь отголоски прибрежных волнений и течений, которые опускаются вниз вдоль дна шельфа, несут с собой обломочный материал (отлагая и сортируя его по дороге), после чего скатываются по континентальному склону вниз. Воду изредка могут перемешивать опускающиеся сверху тяжелые объекты, глубинные составляющие системы волн цунами и извержения вулканов.

Рассмотрим поведение подводной части классической системы двух волн цунами, которые движутся вдоль поверхности и в толще океана на дозвуковых (по меркам воды) некритических скоростях.

Как было доказано ранее, энергия волн цунами формируются уходящим в глубины океана клином, причем ее значительная часть сосредотачивается в приповерхностной зоне, а другая часть распространяется в глубине.

В толще океана формируются достаточно плоские или овальные фазовые траектории и сопровождающие их турбулентные вихревые (круговые) потоки.

По мере свободного движения вдоль поверхности океана волны цунами плавно аккумулируют и транспортируют часть внутренней энергии в приповерхностную зону, причем данный процесс идет плавно и медленно.

Особенностью геометрии цунами является то, что его энергия носит направленный характер. Она легко передается в среде в горизонтальном направлении и не терпит скачкообразных или резких изменений в вертикальной плоскости. Отдельные составляющие волн цунами не могут обойти вертикальные препятствия большой площади и претерпевают на их границе локальные разрушения.

Таким образом, встреча с препятствием существенного размера вызывает скачкообразный рост функции потерь и локальное разрушение в этом секторе части волны.

Например, если цунами направляется из зоны желоба через океанический хребет к континентальному шельфу, при его пересечении будет отсечена большая часть энергии цунами, удар которой пришелся непосредственно на хребет. Это вызовет локальное разрушение отдельных блоков горных пород, углубление и расширение вдоль направления движения цунами существующих впадин и горизонтальное сглаживание вершин.

Конечно, поведение цунами на дне не носит характер ударной или классической волны, но благодаря горизонтально-ориентированным фазовым траекториям циркуляции оно напоминает и ударные, и классические волны.

Кроме того, в глубинных зонах цунами вызывает круговое горизонтальное перемешивание практически неподвижных до этого вод с поверхностными водами, предоставляя шанс на выживание самым глубинным обитателям океана (в полной темноте нет растений — там живут особые рыбы и другие подобные монстры).

Попадая в расщелины, рассекающие горные хребты поперек, волны будут продолжать движение по ним, расширяя и полируя их практически отвесные стенки. Там, где нет препятствий на пути, волны цунами будут продолжать свободное продвижение вперед.

Отдельные узкие подводные горы, имеющие заостренные подводные вершины, подводная часть цунами частично огибает, а частично полируют их склоны и вершины. Широкие подводные горы поглощают энергию значительно, претерпевая колебания и толчки, и эта энергия концентрируется в районе вершины, что содействует разрушению ее верхней части, вплоть до полного выравнивания у гайотов — древнейших и старейших подводных гор мирового океана.

Достигая континентального склона шельфа, подводная часть цунами теряет практически всю энергию, которая была распределена ниже линии шельфового дна.

Эта энергия затрачивается на передачу сейсмических волн твердым горным породам (гранитам и базальтам) и на разрушение и перенос более мягких и хрупких (в том числе осадочных) пород.

Чем выше уровень континентального склона, тем более сильный удар он принимает. Удар способствует частичному разрушению склона и транспортировке обломочного материала к подножию.

Прохождение цунами, имеющего протяженный вглубь участок переноса внутренней энергии, дополнительно вызывает перемешивание глубинных вод с водами зоны сумеречного освещения вдоль континентального склона и у его подножия на дне океанической равнины.

Если цунами заходит в глубокие долины, называемые подводными каньонами, вся его энергия будет направлена на дальнейшее углубление и удлинение каньона в направлении своего движения. Чем меньше поперечное сечение каньона, тем большая энергия концентрируется на малой площади вплоть до образования локальных ударных волн в наиболее узких местах. При проходе волны мощного цунами опаснее всего находиться в верхней или узкой части подводных каньонов.

С этого момента ослабленное цунами начинает движение по пологому склону континентального шельфа.

Шельф поверхностно сложен мягкими осадочными породами, образовавшимися в результате транспортировки обломочного и мелкозернистого материала от береговой линии вглубь океана.

Этот материал переносят текущие воды, движущиеся вдоль океанического дна. Часть материала выносятся реками из глубины континента. Прибрежные зоны разрушаются за счет энергии волн и штормовых ветров. Волны, которые приходят на пологий берег вдоль поверхности океана, совершают обратное движение назад вдоль дна океана.

Поэтому движение по шельфу можно рассматривать как движение по пологому ровному склону вплоть до достижения (а зачастую и преодоления) береговой линии.

Рассмотрим цунами, которое начинает движение от эпицентра на околокритических скоростях. Можно заметить, что у эпицентра произойдет отрыв двух приповерхностных составляющих волн от глубинной составляющей из-за огромной скачкообразной разницы горизонтальных скоростей и формы профилей фазовых траекторий.

Отрыву также будут способствовать клиновидные мини-ударные волны, сопровождающие движения чечевицеобразных профилей циркуляции внутренней энергии при околокритических скоростях.

Две основные волны понесутся с огромной скоростью вперед у поверхности. Как будто с трамплина, они слетят с глубинного сектора. Их глубинная составляющая оторвется и будет медленнее распространяться в толще океана, формируя еще одну — фантомную подводную волну или ложную волну цунами.

Эта волна не является полноценной и тем более третьей заключительной волной цунами, так как она сформировалась вследствие разрыва сектора круга на приповерхностную и глубинную составляющие.

Глубинная составляющая будет вести себя аналогично поведению подводной части обыкновенного цунами, не выходя на поверхность океана при столкновении с вертикальными препятствиями, но поднимаясь вверх с потерями энергии на пологих и гладких уклонах дна.

Возникает вопрос — может ли сформироваться и распространяться вдоль дна океана цунами, которое не достигает его поверхности? Теоретически этот феномен возможен — но в особых условиях.

В океане существуют зоны резкого и скачкообразного изменения (перепада) давления. Глубинные воды океана иногда разделены выраженными поверхностями скачков давления на продольные зоны и поэтому практически не перемешиваются друг с другом.

Если величина скачка значительна, его гипотетическая поверхность будет вести себя, как поверхность океана, и может сформировать структуру волн, напоминающих приповерхностное цунами. Волны глубинного цунами будут распространяться от эпицентра в горизонтальном или наклонном направлении по вектору скорости.

В океане существуют зоны резкого и скачкообразного изменения давления, и это доказано. Глубинные воды оказываются разделенными поверхностями этих скачков на продольные зоны. Слои практически не перемешиваются благодаря наличию границ-скачков.

Если величина скачка значительна, его гипотетическая поверхность будет вести себя как поверхность океана и может сформировать структуру волн, напоминающую приповерхностное цунами. Волны глубинного цунами будут распространяться от эпицентра в стороны.

Чем больше глубина — тем выше давление и плотность воды, и тем выше скорость распространения волн в такой среде. Источник энергии может располагаться в недрах глубокого океанического желоба, в зоне практически неподвижных вод, абсолютной тьмы и колоссальных давлений.

Энергия с глубины 8000—11000 метров быстро, узким клином распространится вверх по расширяющемуся желобу, пока не достигнет глубоководной равнины.

В этой зоне наблюдается резкий скачек качественного характера поведения глубинных вод. Поэтому существует тонкая скачкообразная граница между водами желоба и придонными водами океана, которая выступает физическим аналогом поверхности океана.

Горизонтальные переносы энергии и переносы энергии вдоль дна океана сглаживают придонный рельеф, выскабливают основания подводных гор и хребтов и способствуют некоторому перемешиванию придонных слоев глубинных вод океана.

Зона солнечного освещения имеет глубину до 200 метров, зона сумеречного освещения — до 1000 метров. Глубинная зона простирается до 6000 метров. Сверхглубокие узкие желобы достигают глубины 11000 метров.

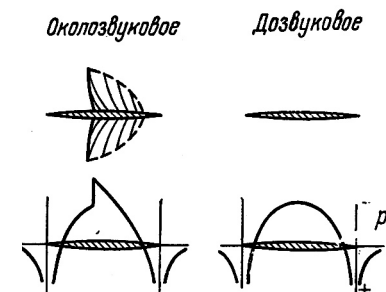
Благодаря тому, что цунами существенно перемещают и перемешивают глубинные воды с водами сумеречного слоя, они поддерживают существование кислородозависимой органической жизни на глубинах, куда иным способом кислород не может проникнуть ни из атмосферы, ни из зоны обитания флоры и солнечного освещения.

В страшных глубинах формируются парадоксальные монстроидные формы органической жизни — в том числе благодаря глубинной составляющей энергии цунами.

А теперь поднимемся из самых глубин океана к его поверхности и опишем поведение приповерхностных составляющих волн цунами в открытом океане, на материковом шельфе и возле берега.

Несколько идеализированной и даже рафинированной является модель приповерхностного движения волн цунами на околоскоростных и высоких дозвуковых скоростях перемещения.

Будем использовать физику гидродинамики.



Первая и вторая волна цунами движутся быстро у самой поверхности при нулевом угле атаки без глубинной составляющей, которая перемещается отдельно из-за произошедшего отрыва приповерхностного слоя. Фазовые траектории (профили), несущие внутреннюю энергию системы, имеют малую, но ненулевую вертикальную и протяженную горизонтальную составляющую — наподобие чечевицеобразного профиля.

Напоминаем, что мы выбрали систему координат, которая движется с фронтом волн цунами — в этой системе формируемые волны либо неподвижные (их обтекают набегающие потоки), либо стоячие (выражающие изменение конфигурации поверхности океана). Движение системы координат описывается отдельной моделью.

При обтекании фазового профиля каждой волны часть набегающего потока захватывается и перераспределяется вверх — над профилями каждой волны. На дозвуковых скоростях функция распределения плотности давления жидкости над профилем будет непрерывной. Она вызовет классическую волновую деформацию поверхности океана, которая в этой окрестности ведет себя как гибкая мембрана — стоячая нагруженная некоторой массой волна.

Чем выше дозвуковая скорость волн, тем значительнее деформация и тем выше холм, пока над критическим дозвуковым профилем не начнет формироваться скачок функции распределения плотности давления. Он форми-

рует обратный разрыв поверхности океана. Этот скачек уплотнения повышает сопротивление среды и вызывает рост потерь кинетической энергии волны.

Обратный разрыв на околоскоростных скоростях формирует парадоксальный пенистый гребень, который наклоняется в сторону эпицентра — против вектора движения волны (в обычных волнах гребень наклоняется по ходу движения волн). После истощения части кинетической энергии скорость снизится, и гребень исчезнет.

Профиль поверхности океана, получаемый каждой волной этого рафинированного цунами, является центрально-симметричной нагруженной стоячей волной, на высоту которой концептуально влияет характер распределения давления над фазовым профилем и крайне незначительно — малая величина подъемной силы.

Расчеты необходимо последовательно проводить через дискретные временные интервалы.

Записываем начальные условия для расчета профиля стоячей волны в каждый момент времени, используя начальные условия — параметры максимального вертикального отклонения поверхности океана (используются формулы гидродинамики) и половину длины фазового профиля цунами. После расчета графика деформации поверхности производим отдельный расчет на отрицательной полуоси Ox (как если бы она была положительной).

Таким образом, мы рассчитываем график отклонения нагруженной поверхности, вызываемый статическим источником (с точки зрения выбранной системы координат), при помощи волнового уравнения в цилиндрических координатах, известных начальных условий и цилиндрических функций математической физики — причем исключительно в нулевой момент времени.

Так как две волны движутся достаточно далеко независимо одна за другой (по оси Ox), и каждая волна образует собственную волну на поверхности, формируемую над ее фазовым профилем и вызывающую волнение океана.

Деформации поверхности океана описываются классическими волновыми законами, поэтому результирующая кривизна поверхности океана в каждый из расчетных моментов времени будет результатом объединения двух полученных волн на всей числовой полуоси.

Таким образом, задача вычислений мгновенной траектории профиля поверхностной волны цунами оказалась сведенной к классической задаче математической физики о колебаниях закрепленной на концах нагруженной струны, в одной или нескольких точках которой помещены сосредоточенные массы.

В задаче цунами длина рассматриваемой струны окажется протяженной по сравнению с длиной нагруженного участка и низкой амплитудой колебаний, которую вызывают сосредоточенные на очень малом участке струны ненулевые массы (или одна масса).

Задача о колебаниях струны, нагруженной сосредоточенными массами, находит широкое применение в математической физике и технике. Еще Пуассон решал задачу о продольном движении груза, подвешенного к упругой нити.

Особую актуальность задача подобного типа приобрела в связи с изучением вибрации крыльев самолета. Кроме того, рассматриваемая задача встречается при расчете собственных колебаний антенн, нагруженных сосредоточенными емкостями и самоиндукцией.

Существуют приближенные (численные) методы нахождения собственных значений и собственных функций задачи, аналогичных приближенным методам нахождения соответствующих величин для неоднородной струны. Эти методы реализуются с использованием специальных функций математической физики.

В задачах газодинамики, гидродинамики и теории ударных волн часто возникают задачи, характеризующиеся большими скоростями и высокими давлениями. В этом случае линейные аппроксимации (приближения) акустики непригодны, приходится иметь дело с нелинейными моделями. Серьезным шагом вперед является построение таких математических моделей процессов, при которых состояние системы сводится к линейным дифференциальным уравнениям — в частности, дифференциальным уравнениям второго порядка и оператору Лапласа, изучаемых современной математической физикой.

Для этого понадобилось детально изучить физику и механику процесса, выбрать удобную систему координат, ввести непрерывно-разрывную функцию потерь и фактически дискретизировать понятие времени.

В отличие от колебаний струн акустической гитары, глобальное поведение волн в океане не может быть описано методом разложения в ряды Фурье — по тригонометрическим функциям синуса и косинуса.

Для таких задач используется пополнение — специальные функции математической физики и волновое уравнение с оператором Лапласа:

$$\Delta u + \mu u = 0 \quad \text{— описывает круговые процессы.}$$

В задачах математической физики рассматривают такие решения волнового уравнения, которые описывают колебательные процессы. Это возможно в том случае, если постоянная μ строго положительна.

При переходе к полярным координатам, которые мы фактически используем в данной задаче на плоскости, и рассматривая фактор времени (то есть гармонические колебания), мы получим такое уравнение:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Для поиска решений дифференциального волнового уравнения используется метод разделения переменных и замена, рассмотренная в первой части издания:

$$u(r, \varphi, t) = R(r) \Phi(\varphi) T(t)$$

Задача сводится к решению трех обыкновенных линейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \left(\mu - \frac{\lambda}{r^2} \right) R(r) = 0$$

$$\Phi''(\varphi) + \nu^2 \Phi(\varphi) = 0$$

$$T''(t) + \mu c^2 T(t) = 0$$

Первое уравнение носит название волнового уравнения Бесселя, второе — волновое уравнение Штурма-Лиувилля.

Волновые процессы могут быть получены только при следующих ограничениях:

$$\lambda = \nu^2 \geq 0, \quad \mu = k^2 > 0, \quad x = kr$$

$$u(r, \varphi, t) = (a_1 \cos(kct) + a_2 \sin(kct)) \cdot (a_3 \cos(\nu\varphi) + a_4 \sin(\nu\varphi)) (a_5 J_\nu(kr) + a_6 \mathcal{N}_\nu(kr))$$

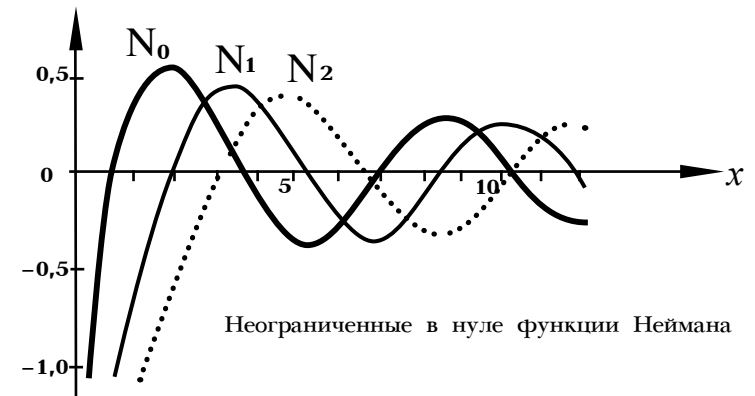
где $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ — произвольные константы. Их значение зависит от конкретных краевых условий задачи.

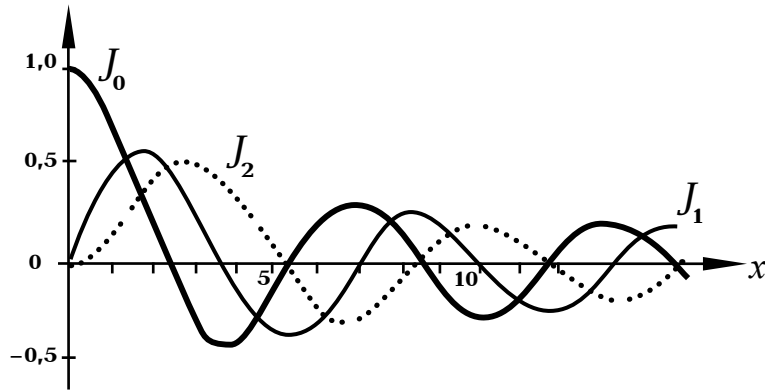
Решение уравнения Бесселя представимо в виде линейной комбинации функций Бесселя, ограниченных на всей числовой оси и описывающих гармонические колебания, и неограниченных в нуле функций Неймана, которые возникают при описании волновых процессов с особенностями и аномалиями.

В случае, если мы изучаем решение дифференциального уравнения в начальный момент времени и вдоль направления радиуса (угол φ отклонения от оси Ox нулевой), оно представляется в простом виде, и выражается через решения классического уравнения Бесселя:

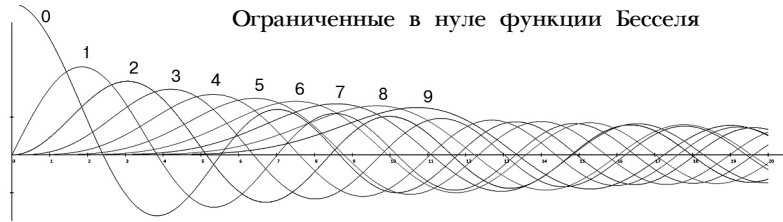
$$y = u(r) = a J_\nu(kr) + b \mathcal{N}_\nu(kr)$$

Приведем графики функций Бесселя и Неймана, и график, описывающий поведение функций Бесселя — программа вычисления была написана автором на языке JavaScript и выполнено попиксельное построение точных графиков (коэффициент растяжения по вертикали равен 4).





Ограниченные в нуле функции Бесселя



По мере значительного удаления от начал координат функции Бесселя и Неймана стремятся к нулю, совершая колебания вдоль оси Ox , причем период этих колебаний стремится к периоду колебаний синуса и косинуса. На удалении от начала координат асимптотическое поведение решений уравнения может быть представлено как:

$$u(r) \cong \sum_{k=0}^m r^{-k-1/2} (V_k \sin r + W_k \cos r)$$

В практических задачах обычно не рассматривают и не вычисляют значения цилиндрических функций на значительном удалении от начала координат, так как их компьютерные вычисления через разложения в ряды вырождаются в ноль. По этим же причинам очень редко используют эти функции при больших значениях индекса. Асимптотическое поведение таких функций очень сложное, оно было подробно описано в монографии Ватсона.

Цилиндрические функции малого индекса вблизи начала координат обеспечивают очень хорошие показатели сходимости реальных волновых процессов, для их превосходного моделирования достаточно использовать первые 3-4 собственные функции при разложении в ряд.

В начальный момент времени поверхность получает заданное начальными условиями отклонения и скорости, описываемые краевыми условиями:

$$u(r, \varphi, t)|_{t=0} = f(r, \varphi) \quad \text{— отклонение}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = w(r, \varphi) \quad \text{— скорость}$$

Мембрана — бесконечная круглая пластинка. Существует еще одно дополнительное условие:

$$u(r, \varphi, t)|_{r=r_0} = 0 \quad \text{— отклонений в точке } r_0 \text{ нет.}$$

Краевому условию на участке мембраны можно удовлетворить, потребовав выполнения условия

$$J_n(kr_0) = 0 \quad \text{и получив из этого отношения } k.$$

Очевидно, что данное уравнение по k имеет бесконечное множество решений, при которых kr_0 должно принимать значение корней функции Бесселя.

Обозначив множество нулей функции Бесселя как $\lambda_m^{(n)}$, мы получим, что k может принимать только следующие значения $k = \lambda_m^{(n)} / r_0$ где $m = 1, 2, 3 \dots$ и n — индекс.

Для того, чтобы удовлетворить общим начальным условиям, нужно использовать линейные комбинации всех возможных решений при всех допустимых значениях установленных параметров, или иными словами — обобщенные ряды вышеуказанных функций.

Колебание мембраны будет результатом наложения гармонических колебаний, соответствующих функциям $u_m^{(n)}$

Это можно записать в виде двойного ряда:

$$u(r, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} u_m^{(n)}(r, \varphi, t)$$

где $\lambda_m^{(n)}$ — нули функции Бесселя $J_n(x) = 0$

$k_m^{(n)} = \lambda_m^{(n)} / r_0$ и выполняется следующее равенство:

$$u_m^{(n)}(r, \varphi, t) = (a_{m1}^{(n)} \cos(k_m^{(n)} ct) + a_{m2}^{(n)} \sin(k_m^{(n)} ct)) \cdot (a_{m3}^{(n)} \cos(n\varphi) + a_{m4}^{(n)} \sin(n\varphi)) J_n(k_m^{(n)} r)$$

В рассматриваемом нами случае поведение системы изучается только в начальный момент времени и только вдоль распространения фронта волны. Поэтому

$$y(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_m^{(n)} J_n(r\lambda_m^{(n)}/r_0)$$

где $\lambda_m^{(n)}$ — нули функции Бесселя $J_n(x) = 0$

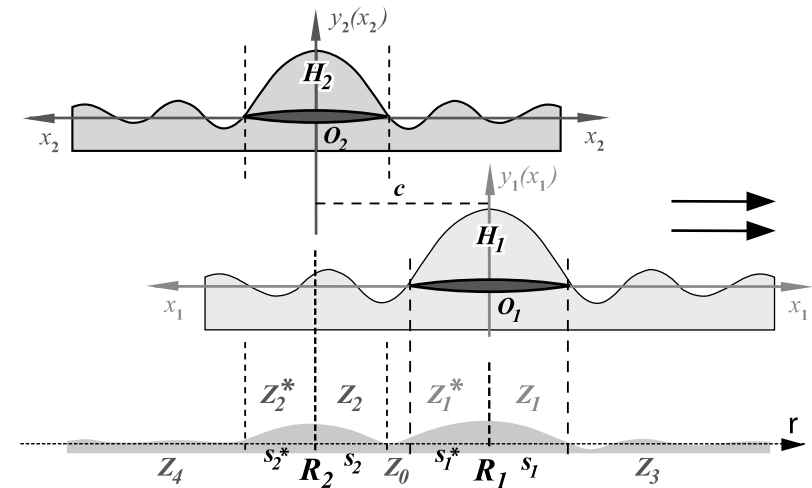
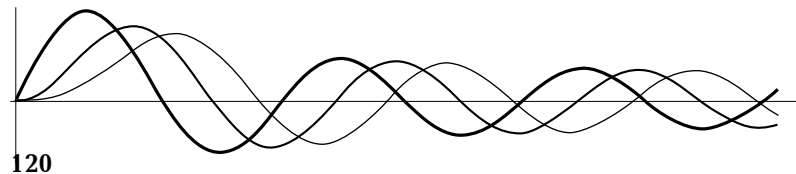
Следует заметить, что на практике наибольшее значение имеют только первые члены этого ряда, так как при росте значений параметров n и m значения функций Бесселя быстро стремятся к нулю.

И хотя теоретически решение волнового уравнения представляет результат наложения бесконечного множества колебаний с различными частотами и амплитудами, практически существенную роль играют только колебания, соответствующие начальным членам этого ряда.

Очевидно, что каждую из волн необходимо отдельно моделировать в зоне вынужденного колебания — профиль описывается уравнениями гидродинамики крыла, и отдельно — в открытой части океана, где колебания распространяются свободно по волновым законам (исходя из начальных условий, задаваемых гидродинамическим активным профилем).

Это одна из причин, почему целую волну цунами не удастся описать одним уравнением — каждому из двух уравнений соответствуют различные состояния системы.

На графиках приведены функции Бесселя первого, второго и третьего значения индекса. Разложение по этим функциям чаще всего производится в том случае, если край мембраны является закрепленным и колебательная функция обращается в ноль.



Мы рассматриваем систему волн цунами, которая движется относительно выбранной изначально неподвижной системы координат Ox . В момент времени t волны и следующие с ними центры систем их координат находятся на расстояниях R_1 и R_2 от эпицентра.

Зона Z_1 для $R_1 < r < R_1 + s_1$

Зона Z_2 для $R_2 < r < R_2 + s_2$

Зона Z_1^* для $R_1 - s_1 < r < R_1$

Зона Z_2^* для $R_2 - s_2 < r < R_2$

Зона Z_3 для $r > R_1 + s_1$

Зона Z_0 для $R_2 + s_2 < r < R_1 - s_1$

Зона Z_4 для $r < R_2 - s_2$

В зонах Z_1 , Z_1^* и Z_2 , Z_2^* происходит формирование профиля под действием законов гидродинамики крыла.

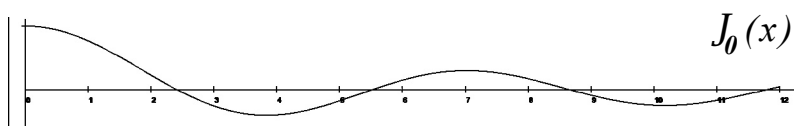
В зонах Z_0 , Z_3 и Z_4 — происходит формирование стоячих волн, которые описываются волновым уравнением и задаются начальными условиями, связанными с данными гидродинамической системы.

Сформировавшаяся на поверхности волна цунами распространяет вокруг себя возмущения, которые движутся вместе с самой системой и зависят только от показателей гидродинамической системы внутри волн цунами.

Наиболее типичными и распространенными являются цунами, которые движутся на дозвуковых скоростях и могут успешно моделироваться системой из двух гипотетических судов на подводных крыльях, которые последовательно, один за другим несутся по поверхности океана. Модель обтекания крыла у поверхности достаточно неплохо была разработана учеными в XX веке и внедрена в практику малого судоходства во всем мире.

Эта система описывается в различных зонах разными уравнениями в зависимости от того, являются ли статические волны поверхности вынужденными (непосредственно волны цунами) или свободно-распространяемыми (поверхность вне зоны волн цунами).

Приведем график нулевой функции Бесселя. Расчет и отрисовка графиков выполнялись на персональном компьютере в программе, написанной на JavaScript.



Какой бы моделью и формулами не описывались волны цунами, это не меняет их физического поведения — впереди по ходу движения цунами формируется набор протяженных на значительные расстояния стоячих волн, пологих и имеющих меньшую амплитуду (высоту), чем волны цунами. Цунами движется с большой скоростью, и гонимая впереди стоячая волна ведет себя, как жесткая и упругая инерционная мембрана в тонком слое океана.

Когда волны цунами при движении у берега быстро и существенно меняют свою форму и конфигурацию — это явление описывается другой математической моделью. Более того, на формирование бегущих впереди стоячих волн оказывают существенное влияние только активные гидродинамические составляющие цунами (горизонтальные фазовые профили крыла) и практически не влияет то, какую внешнюю конфигурацию принимает вода непосредственно над фазовыми профилями.

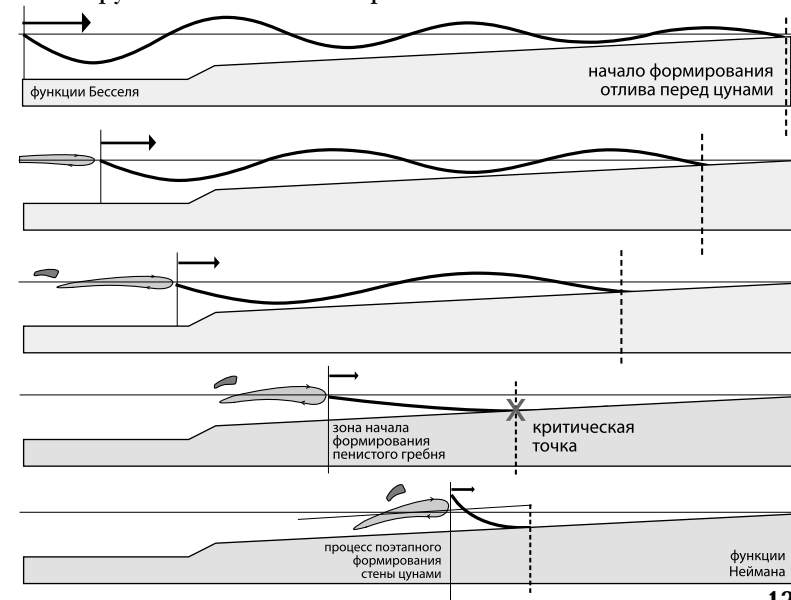
Длинные, пологие, бегущие впереди цунами стоячие волны способны достигнуть берега задолго до того, как цунами приблизится к береговой линии.

Если берег резко обрывается в океан, это колебание уровня океана можно не заметить вплоть до прихода заключительной стоячей волны — но и этот приход тоже проявится незначительно. Иная картина наблюдается на пологом и практически ровном уклоне дна — когда длинная и пологая стоячая волна достигает береговой линии и уже не может продолжить распространение дальше.

Переносимая ею энергия не может далее распространяться свободно в приповерхностной зоне, так как этому мешает длинная и пологая береговая линия.

Ее профиль управляемо формируется под действием движения горизонтальных фазовых профилей, которые стремительно теряют скорость за счет трения о пологий берег. Поскольку волны цунами при проходе по берегу тормозятся, амплитуда колебаний стоячих волн уменьшается, а длина их растет. В идеальной математической модели, как только скорость волны упадет до нуля, формируемые ею бегущие впереди стоячие волны выродятся в прямую.

Описываемое явление, приведенное на схеме ниже, вызывает аномальный отлив перед приходом основных волн цунами на очень пологом океаническом дне. В качестве примера мы подвергнем поэтапной деформации меняющую знак функцию Бесселя первого индекса.



Как только отлив достигает своей критической точки, математическая модель гонимой вперед стоячей волны меняется, и она начинает вести себя как ограниченная сдвливаемая мембрана. Гонимая вперед вода теперь сможет достичь береговой линии только в том случае, если она последует непосредственно перед волной цунами.

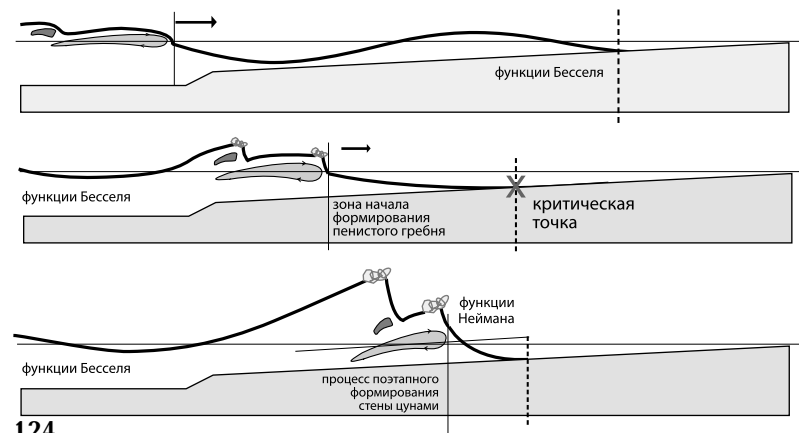
Таким образом, можно дать строгое математическое определение критической точки, меняющей локальное поведение волны цунами на пологом берегу.

Критической точкой называется точка, в которой ближайший к волне цунами минимум фазовой траектории бегущей перед цунами стоячей волны, сформированный в данный момент времени, совпадет с точкой статистически-усредненной поверхности дна.

В критической точке производная функции фазовой траектории обратится в ноль, а ее расположение совпадет с точкой, расположенной на усредненной поверхности дна.

Заметим, что используемые для построения модели бегущих вперед волн цилиндрические функции являются непрерывными не только по аргументу — они являются непрерывными функциями своих индексов. Поэтому они могут успешно использоваться для построения моделей подобных процессов.

Чем более пологий берег, тем дальше отступит вода. Чем выше уклон дна, тем ближе к берегу будет находиться критическая точка. При вертикальном рельефе и большой глубине дна у берега она совпадет с самим берегом.



В критической точке изменяется математическая модель локального описания поведения системы волн цунами — этот момент для формирования фазовой траектории бегущей вперед цунами волны должен моделироваться только с использованием функций Неймана и разложения исключительно **по функциям Неймана**. Профили фазовых циркуляций изменяют угол атаки и движутся практически параллельно статистически-усредненной поверхности дна.

На малом удалении от нуля функции Неймана ведут себя практически так же, как и функции Бесселя. В нуле функции Неймана терпят неустранимый разрыв, резко устремляясь к бесконечности, поэтому функции Неймана используют, незначительно отступив от нуля.

В условиях сильного тяготения и мощного давления атмосферы природа на Земле не может продемонстрировать визуальное воплощение линейных комбинаций функций Неймана на очень малом удалении от нуля — вместо этого она сформирует гребень волны. Ноль функций Неймана находится за фронтальной границей пенистого гребня.

Пенистый гребень и его конфигурация являются самостоятельными объектами математического моделирования. Он воплощает функцию разрыва поверхности волны в ее физическом проявлении — стохастическом потоке турбулентных завихрений, который может увлекать за собой в самостоятельное движение воды локальной окрестности.

Если зона разрыва мала, пенистый гребень будет локально намечаться и окажется малоразличимым среди гребней движущихся волн. В критической точке пенистый гребень цунами начнет формирование в виде дуги, строго повторяющей фронт движения цунами. Если поверхность воды идеально-гладкая, тонкий локальный разрыв будет проявляться дугой легких и малозаметных гребней.

При приближении к берегу площадь разрыва увеличивается, локальные гребни сливаются воедино, и пенистый гребень приобретает характерный вид огромной надвигающейся и пенящейся вверх стены. Эта стена должна моделироваться разложением только по цилиндрическим функциям Неймана — а не по гармоническим синусам или косинусам и рядам Фурье.

Это происходит потому, что ограниченные единицей на всей числовой оси тригонометрические функции синуса

и косинуса не имеют разрывов и высоких подъемов, поэтому в принципе не могут использоваться для моделирования локальных окрестностей точек неустраимых разрывов.

И уж тем более прибрежная стена цунами никогда не моделируется множеством вложенных друг в друга окружностей или эллипсов компьютерной 3D-модели — по этому признаку легко отличить модель трехмерной визуализации цунами от реального природного кошмара.

Конечно, на экране визуальные модели, воссозданные мастерами компьютерной трехмерной живописи, выглядят устрашающе. Их задача — не моделировать цунами как таковое, а максимально напугать зрителя, вызвав у него эмоциональное потрясение, и заставить их раскошелиться. Больше эмоций — выше кассовые сборы и прибыли.

И вот просвещенный турист на спокойном и ровном берегу океана видит нечто непонятное и непохожее на кино или видео — маленькая длинная волна движется к берегу вдоль линии горизонта. Вдруг она оказывается на самом берегу и... А люди не осознают, что **именно так**, а **не как в кино**, к ним в гости пришло цунами.

Функции Неймана на сегодня являются почти идеальными объектами для моделирования и аппроксимации физической реализации дельта-функции Дирака и процессов с узко локализованными неустраимыми разрывами.

В XX веке их использование было отягощено сложностью производимых на компьютере вычислений — ресурсов хватало только у ЭВМ самого мощного класса. Но сегодня функции Неймана можно легко и быстро рассчитать на персональном компьютере средней мощности с использованием встроенного в веб-страницы программного языка JavaScript буквально дома. Прогресс...

Пройдя по пологому континентальному шельфу, волны цунами значительно теряют и скорость, и внутреннюю энергию — по сравнению с окрестностью эпицентра, она уже демонстрируют совершенно иную модель поведения.

Во-первых, большая часть кинетической энергии уже была израсходована на торможение о дно и обтекание стоящих в океане объектов — скал, островов, рифов, в связи с чем скорость движения волн резко падает. Во-вторых, внутренняя энергия цунами частично рассеялась, частично

отсеклась континентальным склоном, частично израсходовалась на удары и разрушения вертикальных объектов, встретившихся на пути цунами. В-третьих, ударная волна приобретает способность менять конфигурацию и двигаться самостоятельно, либо она претерпевает значительные локальные разрывы и перемещается как множество волн.

Поэтому меняется модель поведения цунами — его ударная волна приобретает более упругий характер, она может изгибаться, менять форму и траекторию движения. На ее передвижение начинают существенно влиять прибрежный рельеф, дно, водные потоки и т. п.

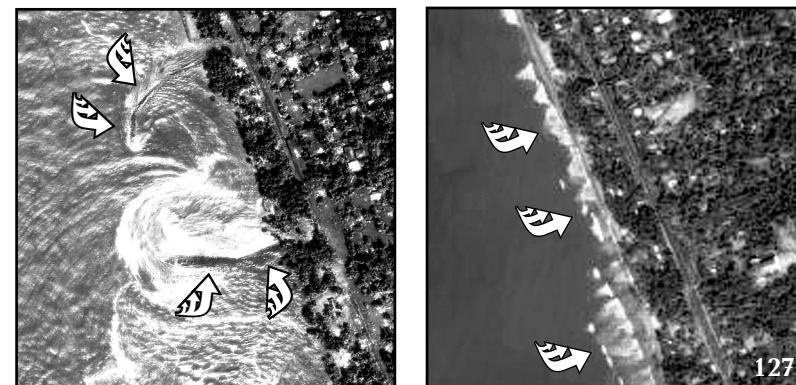
Если энергия ударной волны очень высокая, она будет разрываться на фрагменты и формировать изолированно движущиеся участки ударных волн.

Длина ударной волны укорачивается, ударная волна разделяется и изгибается — иногда может напоминать стену или гигантские тонкие лопасти, которые при просмотре сверху перемешивают приповерхностную воду как будто винты гигантской адской машины.

К берегу может придти как одна, так и несколько изолированных ударных волн. Приводим фотографию, на которой отчетливо видны два изолированных профиля разорвавшейся ударной волны, которые набегают под углом на берег и перемешивают воду, как лопасти.

Их очень хорошо видно на фото — просто нужно знать, какой именно объект Вы ищите среди волн.

Хорошо видно, как гигантские лопасти локально загоняют воду на берег там, где ударные волны заходят за береговую линию. Это один из наиболее разрушительных сценариев прихода цунами недалеко от эпицентра.



Менее критическим является проход значительно ослабленного цунами через пологий шельф.

До критической точки с точки зрения прикладной математики и математической физики, можно не разделять внутреннюю и потенциальную энергию системы, так они демонстрируют единую модель воздействия на окружение. Специалисты-практики и физики могут углубленно заниматься изучением распределения внутренней и потенциальной энергии на ранних и докритических этапах продвижения цунами.

Как только цунами достигает критической точки, нужно разделять его внутреннюю и потенциальную энергии так как она расходуется на различные процессы.

Потенциальная энергия системы волн цунами равна ее внутренней энергии, из которой вычитается внутренняя энергия обособленного профиля ударной волны, поскольку его поведение носит узко локализованный характер и имеет качественные и характеристические отличия.

$$E_{\text{внутр.}} = E_{\text{потенц.}} + E_{\text{ударн.волн}}$$

$$E_{\text{цунами}} = E_{\text{кинет.}} + E_{\text{потенц.}} + E_{\text{ударн.волн}}$$

При проходе критической точки прибрежного дна в ее окрестности происходит изменение угла атаки профиля фазовых траекторий циркуляции воды ударной волны. Данная система не жесткая, а представляет собой функцию скачкообразной концентрации энергии в жидкой среде. Поэтому может произойти перераспределение части кинетической энергии на изменение профиля фазовых траекторий внутри ударной волны вплоть до полной потери их аэродинамических характеристик. И тогда крыло может превращаться в разрушительную лопасть.

Если скорости атаки очень высокие, на пологом берегу они окажут существенное влияние на конфигурацию и поведение ударной волны. Горизонтальная составляющая скорости начнет деформировать, изгибать, поворачивать и даже разрывать ударную волну на фрагменты. Это очень хорошо видно на фото сверху.

Если скорости атаки очень низкие, на пологом берегу волны цунами имеют иное поведение. Они способны мягче огибать препятствия, легче разрываются на фрагменты и имеют меньшую разрушительную ударную силу.

На низких скоростях при пологом дне система двух волн цунами движется, образуя тандем. За счет более сильного торможения о дно первой волны вторая волна набегают на первую, и они движутся к берегу, напоминая одну волну с двумя гребнями (меньшим и большим). Цунами гонит воду вперед, возвращая ее в сторону берега и аккумулируя потенциальную энергию в верхней части волны.

Первая волна накатывает на берег и ведет себя наподобие большой океанской волны. Достигнув своего пика, она схлынет и начнет возвратное движение — уже по дну океана под волной цунами. Первая волна начнет возврат в океан, когда ее потенциальная энергия будет равна весу mg выдвинутой на сушу воды. Кинетическая энергия влияет в основном на скорость процесса, если дно и берег имеют очень малый уклон. Момент равновесия:

$$mg - (E_{\text{потенц.}} + E_{\text{кинет. по } Oy}) = 0$$

Некоторые участки суши могут располагаться ниже уровня берега — в этом случае вода не стечет с них, а останется на суше, вызывая наводнения.

Вода также останется во всех котловинах, уровень которых ниже уровня океана.

Вторая волна продолжит движение вперед, причем вода, сливающаяся в океан с берега под малым уклоном, слегка приподнимает цунами и позволяет почти без трения преодолеть границу, разделяющую сушу и океан. Это очень хорошо видно на видеозаписях очевидцев.

Как только цунами преодолет границу, оно будет продвигаться по суше до тех пор, пока вес выдвинутой на берег воды не сравняется потенциальной энергией и составляющей кинетической энергии по оси Oy , после чего начнет отход назад. Кинетическая энергия расходуется на продвижение воды вперед и падает по мере увеличения массы выдвинутой на сушу воды. Поэтому цунами имеет ограниченный интервал времени воздействия на сушу.

На этом моменте сходство поведения волн цунами и штормовых волн заканчивается. У очевидцев складывается ощущение, что при приходе цунами не выполняются законы сохранения энергии. Не самые страшные с виду волны ломают, подрезают и крушат основания всего, что

попадает на их пути. Крыши капитальных домов, например, волнами цунами как таковыми непосредственно не повреждаются — они обрушиваются самостоятельно.

Это связано с тем, что цунами несет в себе дополнительный заряд внутренней энергии, который сосредоточен в зонах ударных волн и не подчиняется школьным формулам элементарной физики.

Кроме того, профиль ударной волны частично или полностью продолжает сохранять свои гидродинамические качества и движется с самонастраивающимся к рельефу дна и суши углом атаки.

Вся энергия ударных волн расходуется только на рассеивание в следствии разрывов и на разрушение ударной волной располагающиеся вдоль фронта и ориентированных относительно угла атаки препятствий.

Даже если волна цунами выдвинется на берег максимально и начнет обратный отток в океан, неизрасходованная энергия блуждающих фрагментов ударных волн будет продолжать свое разрушительное действие, пока не истощится или не окажется опять в океане. И даже там она будет продолжать существование — в форме волн-убийц. Цунами действительно напоминает маньяка.

Цунами истратит на суше часть кинетической энергии и часть энергии ударных волн. Если в котловинах на суше останется вода, которая не может схлынуть в океан, она визуально продемонстрирует часть затраченной системой потенциальной энергии цунами — в соответствии с весом оставленной им на суше воды.

Цунами не может выдвинуть на сушу воду большего веса, чем переносимая им потенциальная энергия.

В этом аспекте цунами напоминает гигантские и пологие приливные волны, которые формируются под воздействием вызываемого тайфунами разрежения атмосферы. Они могут моделироваться функциями Бесселя и несут в себе энергию циклонических процессов. Отличием от цунами является подчинение их поведения привычным законам школьной физики, отсутствие энергетических парадоксов и глобальных ударных волн.

Стоячая волна также носит принудительный характер формирования, но ее система координат движется вместе с

центром тайфуна. Направление движения системы координат в локальный момент времени совпадает с касательной к фазовой траектории движения центра тайфуна.

Приливные волны разрушают побережье за счет кинетической энергии воды, движущейся под влиянием тайфуна, и переносят ее массы с одного места на другое.

Они вызывают отлив от пологого берега и способны выдвинуть на сушу огромные массы океанических вод. Они не просто пассивно аккумулируют воду на большой площади и по инерции ее переносят, но и продолжают получать энергетическую подпитку от активного тайфуна.

Кинетическая энергия тратится на разрушения, потери потенциальной энергии остаются в форме наводнений и значительного подтопления территорий.

Наиболее страшным явлением, с точки зрения очевидцев, выступает поведение волн цунами высоких энергий в обособленных зонах с дном и имеющих форму воронки с конусообразными стенками. Это локальное поведение качественно отличает цунами от любых ветровых волн.

Как только любая волна, движущаяся с некоторой скоростью, попадает в обособленную замкнутую воронку с конусообразными стенками, она начинает циркулировать внутри, пока не израсходует большую часть кинетической энергии. Даже небольшие волны в этих зонах мгновенно превращаются в особо опасные объекты.

А цунами, помимо всех присущих волнам характеристик, несет в себе ударные волны высоких энергий. Если вход в воронку узкий и направлен в океан, ударная волна может разорваться на несколько обособленных фрагментов и модифицировать свою форму. После чего ее поведение напоминает гигантскую мясорубку. Именно так ее и описывают очевидцы.

Волны не просто бешено вращаются и крушат все подряд на своем пути. Фрагменты ударных волн начинают двигаться в трех измерениях — не только по горизонтали, но и по вертикали. Цунами формирует объемную 3D-мясорубку, которая расходует почти всю кинетическую энергию и энергию ударных волн на разрушения внутри ограниченной локальной зоны — пока не схлынет вода. Шансов уцелеть в ней практически нет. Инженерам советуем моделировать эту ударную волну сопрогатом.

Достаточно опасным является поведение цунами внутри узких протяженных ущелий и каньонов с отвесными стенками, так как энергия волн в них концентрируется и направляется на локальные участки. А фрагменты ударных волн будут разрываться, блуждать и перемешивать воду в теснинах и узких расщелинах.



Вот съемки после прохода цунами: десятки километров залитых, опустошенных, с торчащими кое-где островами домов низменных побережий. Квадратные километры гниющих болот. Как будто люди здесь никогда и не жили.

Спросите ученых, изучающих цунами, видели ли они цунами воочию. Ответ будет отрицательный. Потому что никогда нельзя лично отправиться на берег для просмотра прихода цунами. Аномалия!!! Есть приборы, которые, в отличие от людей, не жалко. Кстати, мощные взрывы давно уже изучают на очень удаленном от них расстоянии...

Признаком приближающегося цунами является отступление воды от берегов и необычайно сильный отлив. Спаситься можно, поднявшись на возвышенное место, при подъеме в горы следует избегать передвижений по долинам, ущельям и прочим узким местам, развернутым в сторону моря, так как в этих местах высота волны цунами достигает своего максимума по высоте.

Если цунами застало вас на корабле, постарайтесь убедить капитана как можно скорее выйти в море, а если этого не удалось сделать, бегите или уезжайте с этого судна как можно выше, дальше и быстрее.

Морские волны, вызванные атлантическими ураганами и тихоокеанскими тайфунами, по разрушительной силе сравнимы с цунами, и иногда отождествляются с ними. Не посещайте потенциально опасные побережья — никогда.

§ 6. Ударные волны в атмосфере Земли

Ударные волны, возникающие в атмосфере от точечного сверхмощного источника, удаленного от поверхности земли или водной акватории, и свободно распространяющиеся на сверхзвуковых скоростях, описываются по аналогичным математическим моделям. В этом случае поверхностью, которая ограничивает движение атмосферных расходящихся сферами волн источника, является поверхность Земли.

Поэтому систему координат нужно ориентировать таким образом, чтобы ее центр находился в центре источника, ось Ox располагалась в атмосфере параллельно поверхности Земного шара, а ось Oy была направлена вниз к поверхности земли или воды.

Модель окажется перевернутой на 180 градусов по сравнению с моделями цунами и землетрясений.

Источники свободно распространяемых ударных волн, формируемых на основе сферических волн по цилиндрическому типу, могут иметь как природный, так и техногенный характер. О подобных надземных взрывах мир впервые узнал, когда была взорвана бомба в Хиросиме. О сверхмощных взрывах вулканов мир знает давно.

Атмосфера имеет неоднородный характер, максимальная плотность воздуха достигается на уровне океана. По мере подъема вверх давление падает, и образование ударных волн по описываемому типу становится невозможным.

Тропосфера, определяющая погоду на поверхности Земли, распространяется на 11 000 метров. В спокойном слое стратосферы летают самолеты — этот слой простирается до 50 000 метров. Твердые космические тела сгорают на высоте до 80 000 метров в мезосфере. И до 450 000 метров простирается термосфера, в которой происходит отклонение фазовых траекторий элементарных частиц высоких энергий. Вот так происходит переход к космическому вакууму.

Особенностью процесса формирования ударных волн описываемого типа является возможность передачи энергии из атмосферы в земную кору или в океан. Из атмосферы часть энергии ударных волн передается в более плотную сплошную среду, а наоборот — уже нет.

Помимо Хиросимы и Нагасаки, классическим примером формирования ударных волн подобного типа является два последовательных взрыва Тунгусского метеорита. Ученые долго работали над этой загадкой — и только серия лабораторных опытов и экспериментов позволила установить не только два последовательных источника, но и их месторасположение и даже оценочную мощность.

Эксперименты производились с установленными на спицах маленькими взрывпакетами — над лабораторным лесом из обыкновенных спичек. Рельеф был воспроизведен максимально правдоподобно.

После долгих и отчаянных поисков исследователи смогли практическим путем получить идентичную природной картину поваленного спичечного леса. Уже после этого взрыв Тунгусского метеорита моделировали не один раз — и каждый раз лабораторная картина совпадала с природными реалиями. При любых отклонениях картина значительно менялась.

Перебрав все возможные варианты одного источника, исследователи сделали вывод, что их было два. Более того, взрываться они должны были строго последовательно один за другим и независимо друг от друга, только в указанных точках и только на заданной высоте. И мощность каждого взрыва тоже имела только один вариант.

Мне как теоретiku сложно представить себе, как можно выдержать такое количество однотипных лабораторных экспериментов, методично повторявшихся изо дня в день, из месяца в месяц.

Хотя, с другой стороны, исследователь-практик не сможет больше двадцати лет постоянно думать над одной и той же теоретической проблемой — он просто не выдержит столь продолжительного ожидания.

Поэтому для прогресса науки требуются усилия и теоретиков, и практиков — только в этом случае наука поступательно движется вперед.

С того времени, как люди стали регистрировать происходящие вокруг них природные явления, отмечена активная деятельность почти 700 вулканов. Конечно, период, в течение которого ведется регистрация вулканических явлений, слишком мал в масштабах геологического вре-

мени. Кроме того, остается неучтенной деятельность подводных вулканов, поскольку извержения в глубинах океанов обычно протекают незаметно — только в Тихом океане имеется более 10 000 вулканических конусов и центров излияния лав.

Вулканы по видам извержения подразделяют на несколько типов. Два из них сопровождаются мощными и сверхмощными взрывными процессами.

Вулканический, или вулканский тип. В группе Липарских островов расположен остров Вулькано с пиком (499 м) и кратером; по его имени и названы все пики на земном шаре, образовавшиеся в результате извержений различного материала из недр, — вулканы.

Для вулканов этого типа характерна очень густая, вязкая лава, которая успевает образовать только очень короткие потоки, прежде чем остынет и затвердеет. В связи с этим в жерле вулкана вблизи вершины вскоре после начала извержения лавы возникает своеобразная шапка крепких пород, она закупоривает вулканический канал и препятствует выходу газов.

В конечном итоге, давление газов возрастает настолько, что происходит мощный взрыв, в результате которого вместе с газами выбрасываются черные тучи пепла. Одно из таких сильных извержений вулкана началось в 1888 году и продолжалось почти два года. Лава выбрасывалась из кратера в виде больших сгустков, которые затвердевали и превращались в вулканические бомбы. В настоящее время вулкан бездействует, но в будущем от него, безусловно, можно ожидать внезапных взрывных извержений.

Извержение везувианского типа в целом по своему механизму принципиально не отличается от извержения вулканического типа. Везувий (1277 м) — наиболее известный итальянский вулкан, хотя по высоте он почти в три раза меньше Этны (3340 м) — высочайшего вулкана Италии и всей Европы. Установлено, что в 79 г. н. э. произошло очень сильное извержение Везувия, сопровождавшееся ливнем, о чем свидетельствует тот факт, что расположенные вблизи вулкана поселения, в частности города Помпеи и Геркуланум, были молниеносно погребены под толщей вулканического пепла и образовавшейся из него жидкой грязи, а вершина вулкана была целиком снесена необычайно мощным выбросом газа.

Пелейский тип. Извержение этого типа отличается от вулканического тем, что очень вязкая лава, застывая глубоко в жерле, образует громадную пробку, выдавливающуюся из кратера в виде своеобразного монолитного обелиска. Накапливающиеся в канале вулкана газы вырываются из-под пробки в виде направленного вбок (по склону вулкана) взрыва, в результате которого вместе с газами выносятся глубинный, сильно перегретый и сжатый материал.

Наиболее известным примером такого взрыва чрезвычайно большой мощности является извержение вулкана Мон-Пеле, расположенного на о. Мартиника, входящем в группу Малых Антильских островов.

В 1902 г. этот вулкан, который на памяти многих поколений бездействовал, неожиданно проснулся. Произошел взрыв, приведший к очистке и раскрытию верхней части вулканического канала. После этого в течение шестнадцати месяцев из кратера вытекала лава, которая постепенно образовала крутосклонный купол высотой около 300 м. Купол состоял из полужастывшей очень вязкой породы, покрытой затвердевшей коркой, которая часто прорывалась под действием непрерывных внутренних взрывов.

Затем совершенно неожиданно купол с одной стороны раскрылся, и наружу стремительно вырвалась огромная масса черного дыма. Эта палящая туча (по-французски *puee ardente*) состояла из мелких капелек расплавленной лавы, раскаленного пепла и огромных глыб затвердевшей породы, подхваченных сжатыми расширяющимися газами.

Туча устремилась вниз по склону со скоростью более 300 км/ч и, легко преодолев 8-километровый участок пути, поглотила главный город острова Сен-Пьер, где даже тяжеловесные статуи были передвинуты на несколько метров, а стекла в домах расплавились. Охваченные раскаленными (свыше 700 градусов) газами погибли 28 000 человек, а затем весь город был погребен под пеплом и лавой.

Редкими оставшимися в живых свидетелями катастрофы оказались люди, которые находились на борту судов и успели отплыть на безопасное расстояние, потому что вода в гавани закипела и многие стоявшие на якоре суда были уничтожены, так и не успев отшвартоваться. Из находившихся в городе выжил лишь один человек, защищенный толстыми стенами городской тюрьмы.

Эти и подобные им источники сразу формируют приповерхностную ударную волну, механизм формирования и распространения которой неплохо изучен — при сверхзвуковых скоростях и сверхмощных источниках происходит поверхностное схлопывание составляющих расходящихся от источника сферических волн и образование нового объекта — ударной волны.

Аналогичные волны формируются в узких ущельях при разрушении расположенных в них дамб перед стеной надвигающейся воды — кстати, ее профиль удобно моделировать разложением по функциям Неймана.

В условиях газовой сплошной среды фронт атмосферной цилиндрической ударной волны моделируется цилиндрическими функциями Неймана в окрестности нуля при очень малых (стремящихся к нулю) значениях индекса. Система координат движется вместе с фронтом распространения ударной волны, которая моделируется как стоячая, ее ориентация — у поверхности (осью *Oy* вверх).

Однако при точечных сверхмощных источниках энергии над поверхностью земли возникают аномалии на земле, не поддающиеся описанию стандартной модели. В частности, строго под эпицентром взрыва в Хиросиме остались частично разрушенные здания, а далее наблюдалась очень резкая граница и следующая за ней зона тотальных разрушений. Даже поверхность земли на некотором участке казалась ровной и сглаженной. Аналогичная картина наблюдалась при взрыве Тунгусского метеорита в начале XX века.

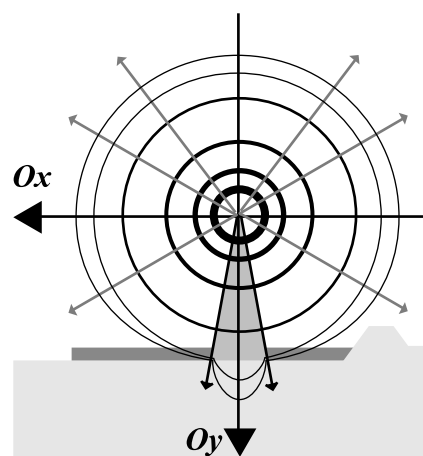
Ни при наземном, ни при воздушном (высокое расположение источника) сверхмощных взрывах этого феномена в проекции эпицентра не наблюдается.



Феномен одних стоящих деревьев и других, которые были повалены на землю, наблюдался в эпицентрах взрывов Тунгусского метеорита (на фото вверху).

Поясняет феномен модель формирования цилиндрической ударной волны от сферических волн источника, расположенного на удалении от границы сплошной среды (на границе земли и атмосферы).

Сформировавшаяся ударная волна носит характер передвигающейся на высоких скоростях приповерхностной энергетической стены (на схеме она отмечена темным).



От надземного центра точечного источника энергии, описываемого дельта-функцией Дирака, направленные почти перпендикулярно границе сферические волны большей частью перейдут в твердую среду, где они распространяются с высокими скоростями. Поэтому от такого источника энергии регистрируются сейсмические волны, распространяющиеся в земной коре.

Разрушительному удару в этой узкой зоне подвергнется все, что имеет поверхности, параллельные фронту сферической волны — в приведенном примере крыши разрушатся полностью, а стены домов или стволы частично сохранятся. Наименьшие разрушения получают вертикально-ориентированные объекты с заостренным верхом.

Далее в следствии частичного разрыва и схлопывания сферических волн у самой поверхности формируется цилиндрическая ударная волна, которая будет распространяться вдоль поверхности и тотально разрушать все встреченные по пути объекты. Ее границы очерчены четкими зонами тотальных разрушений. Энергия затрачивается на объекты, имеющие большую площадь лобового контакта. Ударная волна полностью экранируется от внешней среды массивными объектами типа цепи окружающих эпицентр гор, она не может проникнуть в подвалы и провалы.

Схожие цилиндрические приповерхностные ударные волны могут сформировать извержения вулканов, сопровождающиеся сверхмощными взрывами.

Феномен Тунгусского метеорита поставил исследователей перед фактом, что искажения рельефа и его существенные отклонения от горизонтали могут сместить

в сторону характерные структуры очагов, которые на идеально-горизонтальной поверхности формируются строго под центром приповерхностного взрыва.

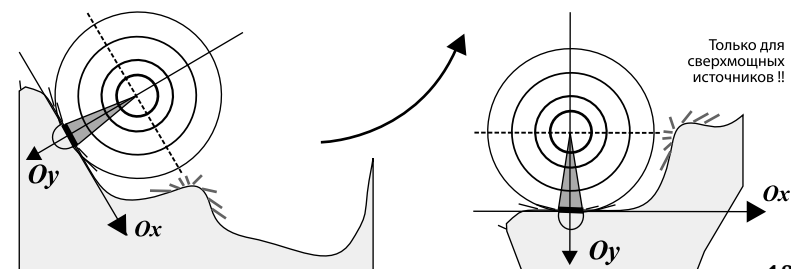
Одним из указателей на центр могут служить стволы, которые оказались не повалены, а были направлены вдоль нормали (градиента) сферической волны источника.

В случае сложного рельефа на местности можно предложить следующий способ поиска потенциальных эпицентров воздушного взрыва — по типу Тунгусского метеорита. Привожу двумерную модель — но на компьютере нужно строить трехмерную объемную 3D-модель.

Вначале нужно выявить эпицентр взрыва, сосны вокруг которого были повалены равномерно во всех направлениях — вкруговую (за исключением мест, экранированных рельефом). В эпицентре строится поверхность, касательная к статистически-усредненной локальной окрестности эпицентра. Нормаль к этой поверхности укажет прямую, на которой размещался источник взрыва. То есть источник взрыва совпадает с локально-усредненным градиентом к поверхности рельефа в эпицентре.

После этого поворачиваем всю систему таким образом, чтобы касательная к поверхности эпицентра была строго горизонтальной, а нормаль — вертикальной. И мы получим оценочный аналог поведения системы, которая достоверно моделирует окрестность взрыва, на которую источник оказал существенное влияние. Уже по этой картине специалисты могут точно указать и высоту, и мощность взрыва.

Аналогично можно изучать второй источник, который частично перекрывается первым. Из рассмотрения нужно исключить зону разрушений, которая была вызвана первым источником. Систему может понадобиться повернуть под другим углом, нежели для первого взрыва. И так далее.



Глава III

Вихревые ударные волны в атмосфере

§ 1. Торнадо и смерчи — вихревые природные аномалии

Смерч (синонимы торнадо, тромб, мезо-ураган) — это очень сильный вращающийся вихрь с размерами по горизонтали менее 50 км и по вертикали менее 10 км, обладающий ураганными скоростями ветра более 33 м/с.

Энергия типичного смерча радиусом 1 км и скоростью движения 70 м/с, по оценкам С. А. Арсеньева, А. Ю. Губаря и В. Н. Николаевского, равна энергии эталонной атомной бомбы в 20 килотонн тротила, подобной первой атомной бомбе, взорванной США во время испытаний Тринити в Нью-Мексико 16 июля 1945 года.

Чаще всего смерчи имеют форму вращающегося хобота, трубы или воронки, свисающей из материнского облака (отсюда и их названия: *tromb* — по-французски труба и *tornado* — по испански вращающийся).

В физике атмосферы смерчи относят к мезо-масштабным циклонам и их нужно отличать от синоптических циклонов средних широт (с размерами 1500–2000 км) и тропических циклонов (с размерами 300–700 км).

Мезо-масштабные циклоны (от греческого *meso* — промежуточный) относятся к середине диапазона между турбулентными вихрями с размерами порядка 1000 м и менее и тропическими циклонами, образующимися в зоне конвергенции (схождения) пассатов на 5-ом градусе северной широты и выше, вплоть до 30-го градуса широты.

В некоторых тропических циклонах ветер достигает ураганной скорости 33 м/с и более (до 100 м/с) и тогда они превращаются в тайфуны Тихого океана, ураганы Атлантики или вилли-вилли Австралии.

Смерчи часто образуются на тропосферных фронтах — границах раздела в нижнем 10-километровом слое атмосферы, которые отделяют воздушные массы с

различными скоростями ветра, температурой и влажностью воздуха. В области холодного фронта (холодный воздух натекает на теплый) атмосфера особенно неустойчива и формирует в материнском облаке смерча и ниже него множество быстро вращающихся турбулентных вихрей.

Сильные холодные фронты образуются в весенне-летний и осенний период. Они отделяют, например, холодный и сухой воздух из Канады от теплого и влажного воздуха из Мексиканского залива или из Атлантического (Тихого) океана над территорией США.

Известны случаи возникновения небольших смерчей в ясную погоду при отсутствии облаков над перегретой поверхностью пустыни или океана. Они могут быть совершенно прозрачными и лишь нижняя часть, запыленная песком или водой, делает их видимыми.

Смерчи и торнадо надо отличать от образующихся на атмосферных фронтах шквальных бурь, характеризующихся быстрым (в течение 15 минут) возрастанием скорости ветра до 33 м/с и затем ее убыванием до 1–2 м/с (также в течении 15 минут).

Давление воздуха в циклонах понижено, но в смерчах падение давления может быть очень сильным, до 666 мбар при нормальном атмосферном давлении 1013,25 мбар. Масса воздуха в торнадо вращается вокруг общего центра (глаза бури, где наблюдается затишье) и средняя скорость ветра может достигать 200 м/с, вызывая катастрофические разрушения, часто с человеческими жертвами.

Внутри торнадо есть более мелкие турбулентные вихри, которые вращаются со скоростью, превышающей скорость звука (320 м/с). С гиперзвуковыми турбулентными вихрями связаны самые злые и жестокие проделки смерчей и торнадо, которые разрывают людей и животных на части или сдирают с них кожу и шкуру.

Пониженное давление внутри смерчей и торнадо создает эффект насоса, т.е. втягивания окружающего воздуха, воды, пыли и предметов, людей и животных внутрь тромба. Этот же эффект приводит к подъему и взрыву домов, попадающих в депрессионную воронку.

Классической страной торнадо является США. Например, в 1990 в было США зарегистрировано 1100 разрушительных смерчей.

Хотя многие качественные свойства смерчей к настоящему времени поняты, точная научная теория, позволяющая путем математических расчетов прогнозировать их характеристики, еще в полной мере не создана.

Трудности обусловлены прежде всего отсутствием данных измерений физических величин внутри торнадо (средней скорости и направления ветра, давления и плотности воздуха, влажности, скорости и размеров восходящих и нисходящих потоков, температуры, размеров и скорости вращения турбулентных вихрей, их ориентации в пространстве, моментов инерции, моментов импульса и других характеристик движения в зависимости от пространственных координат и времени).

В распоряжении ученых есть результаты фото и киносъемок, словесные описания очевидцев и следы деятельности торнадо, а также результаты радиолокационных наблюдений, но этого недостаточно.

Торнадо либо обходит площадки с измерительными приборами, либо ломает и уносит аппаратуру с собой. Другая трудность состоит в том, что движение воздуха внутри торнадо существенно турбулентно.

Математическое описание и расчет турбулентного хаоса — это сложнейшая и до сих пор не в полной мере решенная задача математической физики.

Торнадо наиболее часто наблюдаются в Северной Америке. Здесь их насчитывают около 200 в год. Об огромной силе ветра в торнадо свидетельствуют результаты произведенных ими разрушений домов и инженерных сооружений. Скорость движения торнадо также велика, иногда она достигает 100 км/ч.

На юге Северной Америки торнадо возникают в течение всего года, с максимумом весной и минимумом зимой. Торнадо существует от нескольких минут до нескольких часов, а наибольшая траектория их измеряется несколькими сотнями километров.

Ширина зоны разрушения соответствует размерам самих торнадо, обычно до 2-3 км. Разность давления между центром вихря и его периферией иногда достигает 150-200 мб. От такой разности давления разрушаются дома, а сильнейший ветер поднимает в воздух людей, скот, автомобили, крыши, мосты и т. п.

Так, в апреле 1965 г. над США одновременно возникли 37 различных по мощности торнадо, высотой до 10 км и в диаметре около 2 км, со скоростью ветра до 300 км/ч. Эти вихри произвели громадные разрушения в шести штатах. Число погибших превысило 250 человек, а 2500 человек получили ранения.

Торнадо и смерчи, как и тропические циклоны, зарождаются при наличии большого запаса энергии неустойчивости в атмосфере. Эти условия создаются, когда внизу находится очень теплый и влажный воздух, а в верхней тропосфере — холодный.

Установлено, что при вторжении на территорию США тропических циклонов здесь возникают несколько торнадо. Это, очевидно, можно объяснить тем, что для возникновения тех и других вихрей необходимо неустойчивое состояние атмосферы.

Смерчи наблюдаются и на европейской части России. Известен сильный смерч 29 июня 1904 г. Он возник в грозовом облаке и продвинулся в сторону Москвы, разрушив по пути несколько деревень, повредил дома в Лефортове, повалил вековые деревья в Сокольниках, поднял телеги и животных, встретившихся на пути. Проходя через Москву-реку, смерч высосал воду и обнажил на короткое время ее дно полностью.

В мае 1965 г. сильнейший шквал, сопровождавшийся ливнем и градом, пронесся над Кировской областью. Скорость ветра достигала 200 км/ч. Силой ветра был поднят и отброшен зерноуборочный комбайн, разрушено много домов.

Движение воздуха в системе смерчей и торнадо обычно происходит против часовой стрелки, но не исключены и движения по часовой стрелке. Одновременно совершается подъем воздуха по спирали.

Под влиянием большой скорости вращения внутри вихря развивается центробежная сила, вследствие которой давление в нем понижается.

Это приводит к тому, что при перемещении вихря в его систему как бы всасывается все, что встречается на пути (вода, песок или различные предметы: камни, доски, крыши домов и т. п.), которые затем выпадают из облаков иногда на значительном расстоянии. Именно с этим

связаны так называемые цветные, или кровавые дожди, которые образуются благодаря втягиванию в систему вихря окрашенных частичек породы и смешиванию их с каплями дождя.

Если вихрь возникает на море или озере, часто вместе с водой всасывают в свою систему рыбу, которую облако может выбросить уже на берегу.

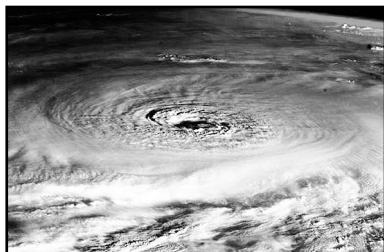
На фото приведен так называемый рыбный дождь.



Дождь из животных — относительно редкое метеорологическое явление, замеченное во многих странах в разное время. Чаще всего такой дождь состоит из рыб или лягушек, хотя есть случаи, которые свидетельствуют о дожде из птиц. В некоторых случаях животные падают на землю даже по кусочкам.

Благодаря радарным наблюдениям удастся измерить скорости вращения воздуха в торнадо на удаленной дистанции и на основании этого уже делать выводы о его внутреннем строении.

Заметим, кстати, что возникает удивительная ситуация: для изучения торнадо пока что используются методы астрономии. Будучи не в силах ни заглянуть в само явление, ни воспроизвести природные условия в лаборатории, ученые вынуждены просто внимательно наблюдать за торнадо, пытаясь на основании наблюдений понять его природу. Именно таким подход будет с точки зрения астрономии.



Смерчи часто возникают группами по два, три, а иногда и более мезо-циклонов. Например, 3 апреля 1974 возникло более сотни смерчей, которые свирепствовали в 11 штатах США. Пострадало 24 тысячи семей, а нанесенный ущерб оценен в 70 млн. долл. В штате Кентукки один из смерчей уничтожил половину города Бранденбург, извест-

ны и другие случаи уничтожения смерчами небольших американских городов.

Например, 30 мая 1879 два смерча, следовавшие один за другим с интервалом в 20 минут, уничтожили провинциальный городок Ирвинг с 300 жителями на севере штат Канзас, США.

С Ирвингским торнадо связано одно из убедительных свидетельств огромной силы смерчей: стальной мост длиной 75 м через реку Большая Голубая был поднят в воздух и закручен как веревка. Остатки моста были превращены в плотный компактный сверток стальных перегородок, ферм и канатов, разорванных и изогнутых самым фантастическим образом.

Этот факт подтверждает наличие гиперзвуковых вихрей внутри торнадо. Несомненно, что скорость ветра возросла при спуске с высокого и обрывистого берега реки. Метеорологам известен эффект усиления синоптических циклонов после прохождения горных цепей, например Уральских или Скандинавских гор.

Наряду с Ирвингскими смерчами, 29 и 30 мая 1879 года возникли два Дельфосских смерча западнее Ирвинга и смерч Ли к юго-востоку. Всего в эти два дня, которым предшествовала очень сухая и жаркая погода в Канзасе, возникло 9 смерчей.

В прошлом смерчи США вызывали многочисленные жертвы, что было связано со слабой изученностью этого явления, сейчас число жертв от торнадо в США намного меньше — это результат деятельности ученых, метеорологической службы США и специального центра по предупреждению штормов, который находится в штате Оклахома.

Получив сообщение о приближении торнадо, благоразумные граждане США спускаются в подземные убежища или подвалы, и это спасает им жизнь. Впрочем, встречаются и безумные люди или даже охотники за торнадо, для которых это хобби иногда кончается гибелью — речь идет не об ученых, а именно об обычных людях, которые хотят просто сфотографироваться на фоне торнадо.

Сильные электромагнитные поля в торнадо-образующих облаках могут служить для дистанционного отслеживания пути движения смерчей.

При определенных значениях начальной энергии и момента импульса турбулентных вихрей на периферии материнского антициклона средняя скорость ветра начинает возрастать и меняет направление вращения, формируя компактный циклон.

С течением времени размеры формирующегося торнадо увеличиваются, центральная область (глаз бури) заполняется турбулентными вихрями, а радиус максимальных ветров смещается от периферии к центру торнадо. Давление воздуха в центре торнадо начинает падать, формируя типичную депрессионную воронку.

После достижения максимальной скорости ветра торнадо начинает затухать, увеличивая свои размеры. Давление растет, средняя скорость ветра убывает, а турбулентные вихри вырождаются, так что их размеры и скорость вращения уменьшаются.

С турбулентными вихрями связаны и другие физические явления, сопровождающие смерчи. Генерация звука, слышимого как шипение, свист или грохот, обычна для этого явления природы.

Свидетели отмечают, что в непосредственной близости от смерча сила звука ужасна, но при удалении от смерча быстро убывает. Это означает, что в смерчах турбулентные вихри генерируют звук высокой частоты, быстро затухающий с расстоянием, т. е. коэффициент поглощения звуковых волн в воздухе обратно пропорционален квадрату частоты и растет при ее увеличении.

Вполне возможно, что сильные звуковые волны в смерче в том числе выходят за частотный диапазон слышимости человеческого уха (от 16 Гц до 16 кГц), т. е. являются ультразвуком или инфразвуком — закритическими.

Смерчи также генерируют сильные электромагнитные поля и сопровождаются молниями. Шаровые молнии в смерчах наблюдались неоднократно.

Данный параграф был написан по материалам сети Интернет — автор благодарит лично **Сергея Арсеньева** и сайт www.krugosvet.ru, **Х. П. Погосьяна** и сайт astromet.narod.ru, сайт www.kolomensky.com за великолепные фотографии, сайты www.poigraem.net, Zahav.ru и другие. Также благодаря посетителям блогов и форумов, которые задавали вопросы о природе смерчей и торнадо и описывали как свои личные ощущения, так и ощущения своих друзей.

§ 2. Модель формирования и поведения торнадо

Торнадо и смерчи наблюдаются не только на Земле. На Марсе сильные смерчи возникнуть не могут из-за разреженности атмосферы и очень низкого давления. Наоборот, на Венере вероятность возникновения мощных торнадо велика, так как она имеет плотную атмосферу, открытую еще в 1761 М. В. Ломоносовым.

На Земле смерчи обычно не возникают в северных и высоких южных широтах — они концентрируются в экваториальных и тропических зонах, где максимальны и скорость вращения Земли вокруг своей оси, и мощность солнечного излучения, поступающая на Землю.

В отличие от предыдущего вопроса, который автор детально и подробно (насколько это вообще было возможно в тонкой книге) рассматривала во второй главе и более 20 лет активно изучала на детальном фактическом материале (архивные данные, контакты со специалистами и, наконец, в последнее время — благодаря работе СМИ и глобальной сети Интернет), о торнадо у автора качественно меньше фактического материала.

Во-первых, в СССР в определенных кругах и сферах целевым образом не собирались данные о торнадо и смерчах по причине редкости их проявлений на территории СССР. Более того — все данные о смерчах носили исключительно открытый характер.

Во-вторых, для СССР никакие данные о торнадо и смерчах в США не служили объектом ни целевого научного обмена, ни внешнегосударственного шпионажа.

В третьих, после 1991 года большинство научных работников со стажем перестали интересоваться вопросами, связанные с научной работой (в силу объективных факторов). Их вообще перестала интересовать креативная работа молодых и начинающих ученых, если она не вписывалась в придуманные ими самими рамки (в силу субъективных проявлений, личных научных амбиций и тотальной эмиграции за рубеж). А аномальные явления не укладываются ни в какие жесткие рамки — в принципе.

Поэтому автор будет строить только половину математической модели, пользуясь теорией катастроф и фазовых переходов, используя понятия фазовых траекторий, а также теорию обобщенных функций и пространств Соболева, разработанную в 1932 году и весьма популярную в очень узком кругу прикладных математиков, занимающихся проблемами математической физики.

Теория Соболевых пространств и обобщенных функций позволяет строить весьма корректные математические модели без построения сложных результирующих дифференциальных или интегральных уравнений.

Используется **принцип полноты и ортогональности** бесконечного набора функций — собственных функций некоторого дифференциального уравнения — и сравнение скоростей сходимости разложений по разным множествам функций для конкретной функции, часто представленной в виде набора дискретных величин (результатов физических измерений, опытов и экспериментов).

Автор выпишет все аппроксимации без записи полных дифференциальных уравнений, так как для этого не хватает фактических данных — чтобы сравнить фазовые траектории природных реалий и корректность математической модели в частных производных. У автора в данный момент нет физических данных о точном влиянии переменной времени на частицы в фазовых траекториях — есть только видео.

Для построения модели торнадо автор будет использовать только линейные дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных и цилиндрических координатах, аномальные специальные функции, которые было не принято широко применять в математических моделях, и обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка.

Автор не будет рассматривать нелинейные системы в принципе — вместо этого будет произведен определенный выбор цилиндрической системы координат, который позволит избавиться от нелинейности.

Объектом изучения будут выступать фазовые траектории. Фазовые траектории оказываются очень удобными при моделировании аномальных процессов. Поясню простым языком для неспециалистов, что это за понятие — специалисты и так это хорошо знают.

Летят в небе самолеты, оставляя за собой полосы разноцветного дыма — они рисуют в небе ту фазовую траекторию, которую пролетели самолеты.



Камни движутся по дну сухого озера и оставляют в грязи следы, которые напоминают их путь — следы в глине очерчивают фазовые траектории движения камней (см. первую главу книги).

Человек идет по тропе, оставляя следы, которые покажут фазовую траекторию его движения. Они не содержат ни скорости движения, ни веса человека, но для криминалистов эти следы скажут многое — почти все.

Так и для прикладного математика фазовая траектория часто говорит больше, чем сам физический процесс в реальном режиме времени. Математики тратят массу усилий именно на построение фазовых траекторий и их последующее детальное изучение.

Математические модели физических процессов строятся в четырехмерных координатах — трех пространственных и одной по времени, причем время не может убывать. Если сделать проекцию результирующей четырехмерной обобщенной функции пространства и времени только на трехмерную пространственную систему, мы и получим фазовую траекторию, которая не зависит от времени.

Уравнения, описывающие фазовые траектории, не содержат переменную времени — время может входить в систему только как параметр, а не как переменная. Поэтому исключение времени как переменной позволяет строить математическую модель поведения фазовой траектории, а время рассматривать исключительно в качестве параметра. Таким образом, мы избавляемся от одной переменной времени и всех неудобств, связанных со временем как с переменной величиной.

Моделированию будут подвергаться фазовые траектории движения частиц и объектов, захваченных торнадо в зоне воронкообразной ударной волны. **По времени** модель носит **дискретный характер** — тем более, что исследователи сегодня располагают именно дискретными данными.

Смерч (торнадо) — атмосферный вихрь, возникающий в грозовом облаке и распространяющийся вниз, часто до самой поверхности Земли в виде темного облачного рукава или хобота диаметром в десятки и сотни метров. Существует недолго, перемещаясь вместе с облаком.

Водяные смерчи — это вращающиеся столбы поднимающегося влажного воздуха, которые обычно образуются над теплой водой. Они могут быть так же опасны, как торнадо, скорость ветра в них может превышать 200 километров в час. Часто водяные смерчи не связаны с грозами и возникают даже при сравнительно хорошей погоде.

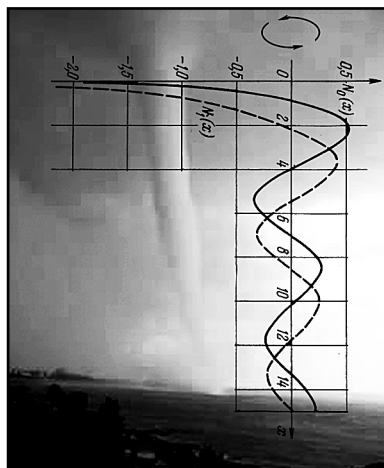
В центральной части смерча давление воздуха понижено. Внешне смерч представляется опускающимся вершиной к земле конусообразным облачным столбом или хоботом. От поверхности земли к нему часто поднимается вершиной вверх другой столб — из пыли, мусора или водяных брызг. Диаметр столба — несколько десятков метров. Движение воздуха и вовлекаемых в него предметов — круговое, со скоростью до 100 км/ч, а иногда и больше. Воздух в смерче увлекается вверх по спирали, поднимая с собой воду, пыль и даже различные предметы на огромную высоту.

При движении над местностью со скоростью несколько десятков километров в час смерч производит разрушения, вызываемые не только огромной скоростью воздуха внутри самого вихря, но и мгновенным скачком атмосферного давления, которое за считанные секунды может упасть и снова подняться на несколько десятков гектопаскалей. Дома взрываются в момент прохождения над ними смерча.

При построении математической модели существенную роль играет правильный выбор системы координат и ее ориентации в пространстве.

Если исключить действие оператора изгиба на столб торнадо, то двумерная проекция смерча близка к приведенным на иллюстрации функциям Неймана.

Воздух вращается по спирали, поднимаясь вверх.



В двумерной проекции это с высокой степенью точности напоминает абрисы цилиндрической функции Неймана, к которой добавлен оператор вращения вокруг центра ничем не изогнутого торнадо.

Это позволяет сделать предположение о том, что смерчи могут быть с высокой степенью точности и реализма смоделированы с использованием именно специальных функций Неймана как основного элемента разложения.

То, что внутри торнадо находится вихревая двумерная ударная волна (поверхность), подтверждает аномальный характер поведения торнадо — скачки давления, характер разрушений, локализованный характер. Эта поверхность носит характер вихря.

Увидеть абрисы ударной волны внутри торнадо можно в тот момент, когда столб торнадо с ударной волной коснется поверхности земли и начнет ее высверливать, напоминая гигантский алмазный бур. Пыль и другие объекты начинают подниматься по спиральным траекториям вверх и таким образом делают видимым непосредственный абрис поверхности ударной волны.

Покадровый анализ видеозаписей, на которых торнадо выполняет полный подъем видимых предметов, позволяет судить о характере фазовых траекторий движения частиц вблизи вихревой ударной волны. Последовательно выполненные качественные фотографии смерчей также помогают понять геометрию фазовых траекторий, которые описывают предметы внутри столба торнадо.

Смерч, напоминающий хобот, ведет себя, как растяжимая и деформируемая резиновая мембрана-воронка. Если потоки воздуха распределены неравномерно по высоте, а смерч достаточно гибкий и тонкий, он может изгибаться самым причудливым образом под действием ветра.

Для того, чтобы деформировать объемный смерч, простого дуновения ветра может оказаться недостаточным.

То есть чем тоньше хобот смерча, тем больше он подвержен влиянию внешних потоков воздуха в силу большей гибкости. Его парусность зависит от площади атаки и мощности ветрового воздействия.

Ударная волна в торнадо не подчиняется классическим волновым законам, а ведет себя как упругая энергетическая мембрана наподобие хобота или конуса.

Неравномерное распределение скорости ветра (различная плотность ветровых потоков на разной высоте на единицу площади) подвергает торнадо действию оператора изгиба. Чем больше диаметр торнадо и чем он мощнее, тем сильнее требуется ветровая нагрузка для его изгиба.

С точки зрения действия оператора изгиба, столб торнадо должен рассматриваться как пластичная резиновая или латексная мембрана в форме хобота, заполненная внутри жидким веществом и утяжеленная на конце (утяжеление моделирует трение о поверхность).

Объект имеет физическую толщину и примерно равную плотность вещества внутри хобота. При изменении объема жидкость должна свободно поступать внутрь латексного хобота и свободно вытекать наружу — например, по трубкам. Далее модель стандартно исследуется в аэродинамической трубе с разделением потоков ветра по горизонтали.

Математический оператор изгиба накладывается на результирующую модель торнадо только после построения его неизогнутой модели, которая движется прямолинейно — вдоль некоторой гипотетической прямой.

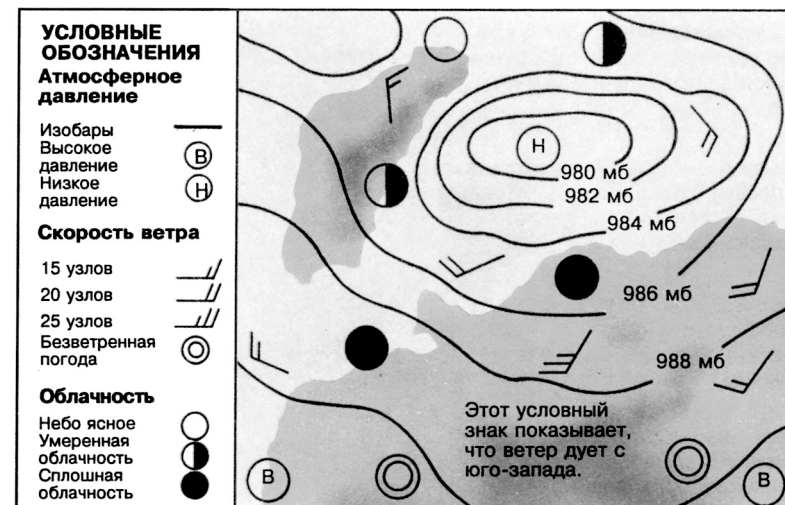
В дальнейшем мы будем игнорировать оператор изгиба и предполагать, что столб торнадо ровный. Оператор изгиба является достаточно изученным математическим объектом в прикладных моделях и исследованиях, его можно успешно моделировать как на компьютере, так и в физических экспериментах и опытах даже дома.

Торнадо осуществляет свое движение в глобальном окружении по закону сохранения энергии — от областей с повышенным атмосферным давлением к областям с пониженным давлением.

Торнадо движется вдоль градиентов к изобарам в сторону областей с пониженным давлением. Изобары — линии, обозначающие линии с одинаковым давлением.

Траектория движения торнадо должна быть перпендикулярна пересекаемой им изобаре строго в точке ее пересечения — и именно строго в конкретный момент времени. Функция градиента изобары дает самый короткий путь от области высокого к области низкого давления (с точки зрения затрат энергии системы на движение).

Это обеспечивает закон возрастания энтропии.



Изобары в нормальных атмосферных процессах глобального характера — гладкие кривые, имеющие непрерывные первые производные, которые либо не пересекаются, либо совпадают.

Процесс построения возможных фазовых траекторий движения торнадо может носить дискретный характер — расчет ведется от изобары к изобаре — наподобие модели движения камней в Долине Смерти в США (первая глава настоящей книги).

Начальный импульс движения торнадо — его скорость и направление — задается местом, в котором торнадо начал формироваться, изобарами и формируемым давлением в конкретной пространственно-временной точке.

Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать процесс движения торнадо, который является прямолинейным, а сам столб торнадо — неизогнутый.

Фазовая траектория движения торнадо пройдет по градиентам к изобарам — от области высокого к области низкого давления и зависит исключительно от внешних факторов. В математической модели фазовая траектория должна быть приведена к прямой линии методом замены переменных. Будет использоваться система координат, которая движется вместе с центром торнадо, и направление оси которой совпадает с касательной к фазовой траектории — то есть градиентом к пересекаемой изобаре.

Таким образом, ветер как таковой влияет только на изгиб и деформацию формы хобота или столба торнадо при условии, что его ветровой нагрузки для этого достаточно. Ветер является локальным фактором.

Глобальная картина расположения изобар, областей высокого и низкого атмосферного давления в момент прохода торнадо покажет фазовую траекторию движения торнадо до тех пор, пока он не распадется. Метеорологическая карта является глобальным фактором.

Поскольку глобальная метеорологическая картина на большой территории существенно не меняется в течение времени жизни торнадо, метеорологические данные для торнадо можно считать неизменными. Это позволит оценить фазовую траекторию движения торнадо и ее вероятности при помощи простых численных методов только на основе статистической метеорологической карты.



Теория обобщенных функций и ряд прогрессивных теоретических обобщений конца XIX — XX века утверждают, что можно построить приближенную математическую модель системы только по набору дискретных данных и выбранной системе полных ортогональных функций.

Проблема выбора системы функций является одной из наиболее сложных. Если поведение функций данной системы значительно отклоняется от поведения физической модели, сходимость математической модели с использованием численных методов будет очень плохой — вплоть до практической невозможности их использования.

Хотя чисто теоретически данные функции обеспечивают сходимость модели, ее практические характеристики оказываются крайне неудовлетворительными.

Если же функции, по которым производится разложение, ведут себя достаточно хорошо и похоже на то, что происходит в реальности, при этом образуя полную ортогональную систему на заданном конечном или бесконечном интервале — возможно, с некоторым весом — их практическое использование будет обеспечивать хорошую или почти идеальную сходимость математической модели при очень малом числе членов ряда разложения. А это значит, что применение численных методов и компьютерных вычислений становится реальным.

Рассмотрим фазовую траекторию движения видимого материального объекта в столбе торнадо — объект поднимается с земли, все время описывая расходящиеся круги. Обратим внимание на форму неизогнутого торнадо на фотографиях. Если рассматривать фазовую траекторию движения видимого объекта в двумерной проекции, то она напоминает цилиндрические функции Неймана в повернутой системе координат, причем движение объекта осуществляется в сторону нуля системы координат.



Круговое движение и циркуляции описываются тригонометрическими функциями, которые также образуют полную ортогональную систему функций на отрезке. Используются цилиндрические координаты.

Внутри столба торнадо образуется область пониженного давления, ограниченной от внешней среды поверхностью вихревой ударной волны.

Частицы воздуха поднимаются вверх не так быстро, как это происходит во внешней окрестности, описывая при этом вихревые циркуляции. Данные циркуляции могут быть представлены через функции Бесселя.

Наибольшую сложность представляет задача параметризации самой конфигурации хобота ударной волны. Введем в рассмотрение функцию максимумов, которая обозначается:

$$\mathcal{N}m(x) = \max \mathcal{N}_\nu(x)$$

при некотором значении ν

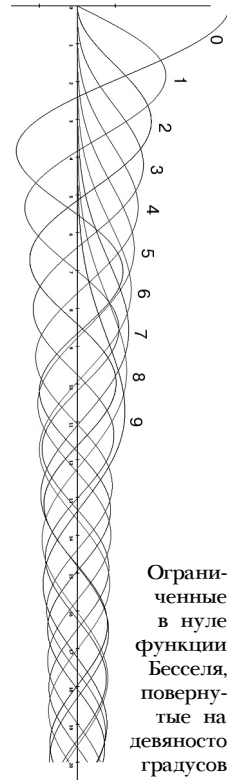
Она показывает значение максимума, который достигим в точке X для некоторой функции Неймана параметра ν . Это возможно потому, что функции Неймана могут рассматриваться как непрерывные функции своих параметров, а также благодаря тому, что между двумя максимумами (или нулями) функции Неймана некоторого параметра лежит максимум (или нуль) функции параметра, отличающегося на единицу.

Аналогично ведут себя функции Бесселя, поэтому можно ввести следующую функцию:

$$Jm(x) = \max J_\nu(x) \text{ при некотором значении } \nu$$

Она показывает значение максимума, который достигим в точке X для некоторой функции Бесселя параметра ν .

Введенные функции существуют и ведут себя как монотонные функции. Функции Бесселя и Неймана являются обобщением тригонометрических функций в цилиндре на общий случай идущих с затуханием физических процессов (часто в неограниченных или больших областях). Эти функции обрисовывают поверхность циркуляций.



Ограниченные в нуле функции Бесселя, повернутые на девяносто градусов

Замыкающиеся процессы (например, волновые в цилиндре) описываются при помощи функций Бесселя и Неймана целых индексов, так как в случае нецелых индексов функции не моделируют замкнутые процессы — и это именно то, что нам нужно. Мы моделируем фазовые траектории функциями, в которых присутствует непрерывно изменяющееся значение параметра ν .

Рассмотрим поведение практически не имеющих веса молекул воздуха и пыли, которые вовлекаются в круговорот вращения и обрисовывают поверхность ударной волны.

Совершив полный оборот вокруг центра торнадо и поднявшись вверх, модель переходит с параметра ν на параметр $\nu-1$. При этом радиус постепенно возрастает.

У автора нет практических данных, чтобы сделать уверенное предположение о том, что полные обороты невесомых частиц воздуха и пыли в зоне вихревой ударной волны совершаются за равные временные интервалы — но автор выдвигает гипотезу, что и возле земли, и возле облаков невесомые частицы оборачиваются вокруг центра торнадо за равные промежутки времени.

Если же объект имеет существенную массу или он несколько удален на некоторое расстояние от поверхности вихревой ударной волны, на него будут оказывать влияние и вес, и торможение об воздух. Поэтому скорость вращения объекта будет постепенно замедляться, а время совершения полного оборота — увеличиваться по мере подъема.

Если бы частицы торнадо двигались вдоль поверхности простейшего кругового цилиндра (кругового конуса бесконечной высоты), их фазовую траекторию можно было бы задать параметрическим уравнением:

$$x = r_0 \cos \varphi$$

$$y = r_0 \sin \varphi$$

$$z = h \varphi / 2\pi$$

где r_0 — радиус цилиндра и h — высота.

В цилиндрических координатах это параметрическое уравнение выглядит еще проще:

$$r = r_0 \equiv \text{const} \text{ при всех значениях угла } \varphi$$

$$z = h \varphi / 2\pi$$

Если бы частицы торнадо двигались вдоль поверхности простейшего кругового конуса (как это иногда рисуют в голливудских фильмах), их фазовую траекторию можно было бы задать параметрическим уравнением:

$$\begin{aligned}x &= (r_0 + a\varphi) \cos \varphi \\y &= (r_0 + a\varphi) \sin \varphi \\z &= h \varphi / 2\pi\end{aligned}$$

где r_0 — начальный радиус и h — высота.

В цилиндрических координатах это параметрическое уравнение выглядит еще проще:

$$\begin{aligned}r &\equiv r_0 + a\varphi && \text{— радиус при значениях угла } \varphi \\z &= h \varphi / 2\pi && \text{— высота при обороте на } \varphi\end{aligned}$$

В нашем случае сложную фигуру вращения (хобот, столб торнадо) формирует континуум максимумов функций Неймана $\mathcal{N}m(x)$ с непрерывно меняющимися параметрами $\mathcal{V}$ и переменной X , которые вращаются вокруг центральной оси торнадо — в цилиндрических координатах. Причем каждой точке X соответствует единственный параметр $\mathcal{V}$.

Мы будем строить такую дискретную модель, которую можно непосредственно использовать для компьютерных вычислений. Разобьем один полный оборот на 2π , который совершает частица воздуха или пыли вдоль ударной волны, на n равных дискретных частей — секторов.

$$\Delta\varphi = 2\pi / n \quad \text{— радиус сектора.}$$

Полный оборот на 2π частица на пыли или воздуха совершит между максимумами функций Неймана параметров $\mathcal{V}$ и соответственно $\mathcal{V}-1$. Они достигаются в интервале переменной между x_0 и x_1 , причем $x_0 > x_1$.

$$\begin{aligned}r_0 &= \mathcal{N}m(x_0) && \text{— при значении индекса } \mathcal{V} \\r_1 &= \mathcal{N}m(x_1) && \text{— при значении индекса } \mathcal{V}-1\end{aligned}$$

Между этими двумя значениями можно записать:

$$\begin{aligned}z &= x_0 - k(x_0 - x_1) / n && \text{— при } k \text{ итерации.} \\r &= \mathcal{N}m(x_0 - k(x_0 - x_1) / n) \\ \varphi &= k\Delta\varphi = 2\pi k / n\end{aligned}$$

Каждый полный фазовый оборот должен описываться различным количеством итераций. Чем ближе к нулю и началу координат, чем меньше значения индекса функций Неймана, тем больше число n должно быть выбрано и тем большее количество численных расчетов производиться для каждого отдельного витка.

Если мы производим расчеты с шагом ΔX , тогда

$$n = (x_0 - x_1) / \Delta X \quad \text{— с округлением до целого.}$$

Чем дальше от начала координат, тем лучше приведенная числовая модель будет описывать поверхность вихревой ударной волны. Наихудшие показатели будут наблюдаться вблизи начала координат. В ближайшей окрестности нуля вычисления не производятся вообще.

Мы имеем асимптотическое поведение функций Неймана при одновременном росте и значений переменной, и значений параметра.

Такие случаи асимптотики наиболее подробно исследовались только Ватсоном. Он классифицировал такой предельный случай как один из наиболее сложных с точки зрения математики, и так один из самых редко встречаемых случаев в математических моделях.

Например, такой случай описывает пространственные вращения бесконечно-длинного упругого хлыста, выведенного из равновесия в области рукоятки. Подобным образом ведут себя и фазовые траектории движения частиц пыли и воздуха вблизи вихревой ударной волны.

И абсолютно никакой теории хаоса — исключительно численные методы, математическая физика, цилиндрические координаты, уравнение Бесселя и специальные цилиндрические функции Бесселя и Неймана. Все строго.

Не вдаваясь в математические подробности и дебри теории цилиндрических функций, приведем одно из удовлетворительных асимптотических разложений.

При достаточно больших значениях переменной функции Бесселя, Неймана и их линейные комбинации могут быть вычислены при помощи асимптотической формулы и расходящихся соответствующих рядов функций:

$$r(x) \cong \sum_{k=0}^m x^{-k-1/2} (V_k \sin x + W_k \cos x)$$

Чем дольше автор специализируется на изучении специальных функций математической физики и, в частности, более 20 лет — на детальном изучении цилиндрических функций, тем больше она приходит к твердому убеждению, что теорию специальных функций могут строить и развивать только математики-фанатики.

Причем фанатики даже среди математиков, которые и так имеют концептуально отличный от общепринятого склад ума и стереотип мышления, непонятный окружающим.

Большинство математиков, вносящих свой вклад в развитие теории специальных функций, работают самостоятельно и независимо, **ориентируясь только на ранее опубликованные работы своих со товарищей**. А они либо уже скончались к этому времени, либо находятся очень далеко и недостижимо для личного общения.

Более того, в математической физике даже незначительный вклад в развитие теории специальных функций негласно относится к категории высшего пилотажа. Спрашивается — найдет ли такой прикладной математик после этого понимание среди коллег по цеху? Конечно, нет.

Еще одним негативным аспектом, о котором знают только в узких кругах, является пренебрежительное отношение к прикладным математикам тех, кто считает себя исключительно «рафинированными» математиками-теоретиками. Ни один из таких «математиков» не внес никакого личного вклада в развитие теории, но все они позволяют себе свысока относиться как к коллегам по цеху, так и к инженерам и даже к ученым других отраслей.

Эти люди забывают главное — в конечном итоге, математика призвана математически моделировать все явления, которые нас окружают, во всех существующих отраслях науки и дисциплинах. Всё вокруг нас — числа...

Теория специальных функций развивается небольшими шагами, между которыми проходят значительные отрезки времени. Каждый раз перед тем, как совершается еще один маленький шаг, прикладные математики приходят к твердому убеждению — ничего нового уже невозможно добавить к теории специальных функций. Это мнение в профессиональных кругах само по себе делало невозможным обсуждение вопроса разработки теории специальных функций с другими прикладными математиками.

Так произошло и в конце XX века, когда автор разработала и предложила метод рекуррентных отношений — для прямого, очень легкого и быстрого получения рекуррентных зависимостей специальных функций, исходя только из общего вида самого дифференциального уравнения.

Поэтому и единомышленниками у прикладного математика в сфере математической физики и специальных функций часто выступают ученые других отраслей или инженеры, производящие вычисления и расчеты, а не свои коллеги по цеху. Именно для них в первую очередь пишут свои работы математики, разрабатывающие теорию и прикладные аспекты специальных функций.

Автор хочет искренне поблагодарить каждого инженера и каждого коллегу-ученого смежных отраслей, с которыми она общалась лично, кого интересовали и аспекты практического применения, и стремление понять теорию специальных функций. Я также искренне благодарю каждого, кто опубликовал практические материалы, фото и видео в сети Интернет и сделал их доступными.

Именно для них автором был разработан метод, концептуально упрощающий изложение сложной теории специальных функций и делающий его доступным для более широкого понимания.

Подробно этот метод излагается в 1 и 2 частях настоящего издания. Эти книги рассчитаны не только на математиков, но и в первую очередь на специалистов-нематематиков, в том числе инженеров-практиков и ученых смежных нематематических специальностей.

Изложение материала носит максимально простой характер, без избыточного увлечения тонкими теоретическими нюансами и неприменимыми аспектами специальных функций математической физики.

Каждый существенный момент строго доказывается. При этом автор не рассматривает чрезмерно сложные теоретические нюансы, не имеющие большого значения для неспециалистов, и не заходит глубоко в дебри теории.

Теория специальных функций сама по себе является сложным и специализированным аспектом, и чтобы не загромождать описываемую физику аномальных процессов, она приводится отдельно — в авторском изложении, на русском и украинском языках.

§ 3. Поведение вихрей, смерчей и торнадо

Автор так не смогла найти здорового с точки зрения математического моделирования объяснения, почему и откуда возникает вихревая ударная волна (разрывная функция), если сама по себе система находится в стабильном фазовом состоянии, ее функция состояния непрерывная, гладкая и не терпит никаких разрывов вместе со своей первой производной на всем рассматриваемом континууме.

Более того, в подобных условиях стабильных фазовых состояний и гладких функций состояния порождение любых разрывных функций внутри системы невозможно в принципе, если исходное множество — континуум. Это доказанные теоремы из теории катастроф и теории фазовых переходов, являющиеся следствием базовых теорем общей теории функций.

Отсюда можно сделать вывод, что в системе, которая имеет только одно фазовое состояние, или в системе, состоящей из набора фазовых состояний, физические переходы между которыми носят относительно плавный и смазанный характер (и моделируются непрерывными гладкими функциями), смерчи, торнадо и другие самопроизвольные ударные волны не возникают.

Для возникновения глобальной ударной волны нужен очень резкий физический переход — скачек между двумя различными фазовыми состояниями (необходимое условие для образования любой ударной волны).

Поэтому процесс ее образования носит не локальный, а глобальный характер — это результат взаимодействия не менее чем двух различных систем. И каждая из этих фазовых систем — часть атмосферы, так как торнадо зарождаются именно внутри нее.

То есть для возникновения торнадо требуется система как минимум из двух фазовых атмосферных состояний, граница между которыми резкая и скачкообразная.

Установим необходимые и достаточные условия образования таких вихревых ударных волн, рассматриваемые как результат взаимодействия двух фазовых состояний.

Можно привлечь элементы теории оптимального управления, которая изучает поведение некоторых внешних по отношению к системе функций управления. Эти функции управления могут изменять даже ее фазовое состояние и переводить ее из одного состояния в другое.

Именно таким управлением является, например, подводное землетрясение, которое вызывает формирование волн цунами. Таким управлением оказалось падение Тунгусского метеорита, который сформировал две последовательные ударные волны у холмистой поверхности на местности.

Но для торнадо и смерчей наличие подобного управления отрицается как физическими условиями, так и особенностями самой модели.

На первый взгляд, нет никаких видимых или гипотетических внешних источников, которые бы способствовали образованию столба торнадо или хобота смерча. Подобная система формируется самопроизвольно, без элементов внешнего управления, и здесь может быть применима теория вероятности — как элемент теории поведения хаоса.

В системе из двух сред, разделенных резкой границей, возможна существенная локальная передача внутренней энергии из менее плотной в более плотную среду, и намного меньшая передача локализованной внутренней энергии из более плотной в менее плотную среду.

Процесс передачи внутренней энергии из существенно более плотной среды в менее плотную среду невозможен — он не допускает прямой передачи энергии и поэтому может сопровождаться образованием горизонтально-ориентированных приповерхностных ударных волн.

Процесс локальной передачи внутренней энергии из более плотной в менее плотную среду должен сопровождаться дополнительными особыми условиями.

Благодаря им производится выравнивание давления, например, в слоях атмосферы различной плотности и становится возможной такая локальная передача энергии.

Чем плотнее среда — тем выше скорость движения в ней энергетических волн. В более плотных средах, например, возрастает скорость движения звука. В оптически-прозрачной среде меняется даже скорость света (по сравнению с эталоном — разреженным вакуумом).

Погода формируется в атмосфере в так называемой тропосфере — на высоте до 11 000 метров. Выше нее атмосфера очень разрежена и абсолютно спокойна, а на высоте более 480 000 метров заканчивается и переходит в околоземное космическое пространство.

В зависимости от плотности воздуха, различают те или иные слои тропосферы. Чем выше вверх — тем ниже плотность воздуха, так как ниже сила притяжения Земли.

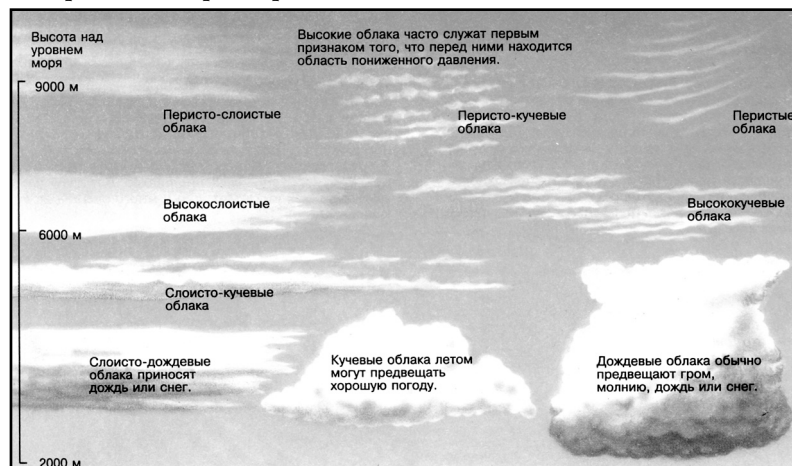
Облака на приведенной схеме, за исключением высоких грозовых облаков особой формы, распределяются строго вдоль границ различных слоев тропосферы. Они состоят из водяного пара и плавают на поверхности слоев, как пена по поверхности воды.

Чем ниже облака — тем выше в них плотность пара, вплоть до полной его конденсации в капли дождя.

Туман, кстати, можно смело назвать приповерхностным облаком пара, которое формируется у самой земли, а росу — вырожденным с точки зрения расстояния явлением дождя (капли росы не претерпевают процесс полета на землю, а осаждаются сразу же в месте формирования).

Над водами океана может формироваться дополнительный слой, в котором происходит активное испарение и насыщение воздуха теплыми парами воды.

Распределение плотности между слоями тропосферы может носить как более плавный, так и практически скачкообразный характер.



164 Схема распределения типов туч и облаков

Атмосферный фронт — это линия, где масса холодного воздуха сталкивается с массой теплого воздуха.

Если при встрече фронт теплого воздуха надвигается, фронт называют теплым фронтом.

Если надвигается холодный воздух — холодным фронтом.

Фронты обозначаются на метеорологических картах как показано на схеме.



Если теплый воздух вклинивается в пространство, занятое холодным воздухом, это явление называется депрессией. В результате образуется окклюзированный фронт. Именно в его зоне часто формируются смерчи.

Смерчи часто образуются на тропосферных фронтах в границах раздела в нижнем 10-километровом слое атмосферы, в которых разделяются воздушные массы с различными скоростями ветра, температурой и влажностью воздуха — то есть с различными фазовыми состояниями.

В области холодного фронта и низкого давления (где холодный воздух натекает на теплый) атмосфера особенно неустойчива и формирует в материнском облаке множество быстро вращающихся турбулентных вихрей.

Сильные холодные фронты образуются в весенне-летний и осенний период. Они отделяют, например, холодный и сухой воздух из Канады от теплого и влажного воздуха из Мексиканского залива или из Атлантического (Тихого) океана над территорией США — эту зону иногда называют Коридором торнадо. Разумные люди не строят в ней дома без капитальных погребов или подвалов.

Известны случаи возникновения небольших смерчей в ясную погоду при отсутствии облаков над перегретой поверхностью пустыни или океана — в этом случае формируется дополнительный приповерхностный слой, фазовое состояние которого скачкообразно отличается от общей атмосферной картины в целом.



Вихревые потоки в различных слоях тропосферы могут формироваться при движении атмосферных фронтов или в конвекционных потоках воздуха под действием избытка тепла у поверхности. В холодных фронтах и воздушных массах вихревые потоки возбуждаются легче, так как у холодного воздуха выше его плотность.

Кроме того, на формирование вихревых процессов в атмосфере непосредственное влияние оказывает вращение Земли вокруг своей оси и трение нижних слоев атмосферы о поверхность Земли с образованием вихрей различного масштаба. Но этого недостаточно для ударной волны.

Так как холодный воздух плотнее и тяжелее, а теплый — легче, сценарии наступления холодных и теплых фронтов отличаются. Холодный воздух холодного фронта опускается вниз и простирается вдоль поверхности земли длинным холодным языком — он как будто подползает снизу и постепенно вытесняет теплый воздух. Теплый фронт, наоборот, движется почти вертикальной стеной и резко вытесняет холодный воздух по всей длине фронта.

Так бывает при большинстве нормальных атмосферных процессов — за исключением аномального сценария движения холодного фронта во время сильной жары.

Если поверхность земли значительно накалилась и сильно перегрета, холодный фронт не может двигаться вдоль поверхности Земли. Более того, перегретая зона может простираться практически на всю высоту тропосферы, обеспечивая свою высокую стабильность.

Тогда холодный фронт охлаждает узкую зону на некотором удалении от ее поверхности и вторгается длинным, узким и протяженным языком на некотором расстоянии от земли, разрезая параллельно поверхности Земли зону глобально-перегретого теплого воздуха.

Теплый воздух принудительно разделяется вдоль на два перегретых слоя, между которыми вторгается и движется относительно тонкий слой охлажденного воздуха. Толщина этого слоя часто совпадает с перепадом высоты между слоисто-дождевыми и слоисто-кучевыми облаками.

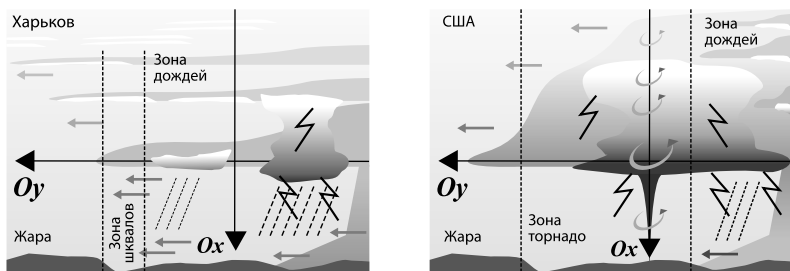
Но в некоторых случаях вторгающийся сверхмощный холодный слой может достичь уровня высокослоистых облаков и даже выше — при сверхмощных вторжениях, в то время как у поверхности земли воздух еще перегретый.

Насыщенный парами воздух движется в форме ветра и дует с океана на сушу, где влажный воздух постепенно поднимается вверх и охлаждается на высоте или на границе теплого и холодного слоев. На границе теплых и холодных воздушных масс часто формируются обильные облака — чем выше влажность воздуха и перепад температур, тем мощнее формируемый облачный покров.

При резком наступлении холодного сухого воздуха на зону перегретого влажного воздуха по аномальному сценарию слои атмосферы часто не перемешиваются. Таким образом, быстрого выравнивания условий в различных слоях тропосферы не происходит.

Более того — образуются очень резкие и скачкообразные перепады температуры, давления и влажности воздуха между узкими слоями тропосферы. И эти перепады формируют скачкообразные границы фазовых переходов, резко разделяющие слои воздуха, которые пребывают в различных фазовых состояниях. Одни воздушные массы имеют тропический генезис, другие — приполярный.

Скачкообразная граница слоев — резкий разрыв функции состояния между разными слоями тропосферы — и является тем материалом, на основании которого может образоваться скачкообразная функция — вихревая ударная волна смерча и торнадо той или иной мощности и высоты. В принципе, многие формируемые в атмосфере смерчи не достигают поверхности Земли — большинство не проникает в приповерхностный слой тропосферы.



Тем, кто считает, что в Харькове (и тому подобных районах СНГ) бывают жуткие грозы и кошмарные порывы штормового ветра, автор советует внимательно изучить сравнительные схемы наступления холодных фронтов в жаркую погоду — и понять, в какой благословенной земле мы все живем (по сравнению с Коридором торнадо в США). Схемы носят исключительно наглядный характер и не служат для моделирования описываемых природных процессов.

В Украине и средней полосе СНГ наступление холодного воздуха идет слоями — причем по характеру поведения облаков можно сделать точный прогноз погоды на несколько часов и даже на один-два дня вперед. Если стояла очень жаркая и сухая погода, наступление холодного фронта сопровождается грозами, ветром и шквалами — часто объявляется штормовое предупреждение.

Этот скачок (рост) атмосферного давления ощущают люди, страдающие вегето-сосудистыми заболеваниями. У них возникает резкое ощущение нехватки воздуха и головокружение — сосуды не успевают быстро отреагировать на скачкообразный рост атмосферного давления у поверхности земли на фоне жары и застоя воздуха.

При слишком резких изменениях давления отреагировать могут даже молодые и весьма здоровые люди.

Одновременно со скачком атмосферного давления повышается напряженность электромагнитного поля, которое генерируется грозовыми облаками, формируемыми вдоль атмосферного фронта. На него реагируют и люди, и даже электронные приборы.

Вокруг резко темнеет, налетают порывы шквального ветра, приходит дождь, гроза и сразу за ней — резкое похолодание и наступление холодного воздуха у поверхности.



А вот какие вихри и турбулентные потоки с молниями в облаках были сфотографированы очевидцами — со специальными пояснениями, что это не фотографии ядерных взрывов. Это облака, которые были сформированы локальными погодными аномалиями. Они показывают, что аномальные вихри существуют также и высоко в небе.

Совсем иная картина происходит на юге США, когда холодный и сухой воздух прорывается над жарким и влажным южным воздухом. Часто он не несет достаточного объема влаги, которая образует дождевые тучи и облака и таким образом вызывает естественный прорыв между верхним холодным слоем и перегретой поверхностью земли — в форме освежающего дождя (скачок и фазовый переход состояния атмосферы).

Холодный сухой воздух находит фронтом или зоной на некотором расстоянии от поверхности земли. Он давит вниз подобно гигантскому поршню и резко сжимает перегретый воздух у поверхности. Таким образом, холодный воздух скачком значительно повышает давление у поверхности земли и делает возможным передачу внутренней энергии верхних холодных слоев в искусственно-сжатые перегретые нижние слои атмосферы.

По словам очевидцев, непосредственно в окрестности очага образования мощного торнадо метеочувствительные люди испытывают ужасающие ощущения, не сопоставимые с теми страданиями, которые причиняет обычный грозовой фронт. Некоторым очевидцам это спасало жизни — они успевали спуститься в подвал перед тем, как прямо над их домом на крышу опускался столб торнадо.

Животные и птицы имеют высокую метеочувствительность, благодаря чему успевают покинуть опасную зону незадолго перед тем, как сформируется хобот смерча. Они доверяют своим инстинктам больше, чем просвещенные современные люди — своей интуиции и здоровью.

Между слоями очень холодного сухого и влажного перегретого воздуха возникают резкие границы — фазовые переходы моделируются функциями скачка и служат физическими предпосылками для создания ударных волн.

Поскольку нет дождевых туч как таковых, возникшие напряжения и аномальное размещение холодных сухих слоев над влажными перегретыми слоями нельзя разрядить холодными дождями и шквалами. Природная система не имеет физическую возможность сформировать привычный нам скачок — фазовый переход в форме прорыва холодной дождевой воды, града и локальных шквалов (резких порывов холодного штормового ветра).

Как только давление в нижних перегретых слоях атмосферы совпадает с давлением верхних холодных слоев воздуха, возникает угроза формирования торнадо.

Распределение давлений внутри холодного фронта происходит вдоль изобар — линий постоянного давления. Как только давление в окрестности изобары холодного фронта совпадает с давлением сжатых перегретых слоев, в границе между слоями образуются линии разрывов, через которые слои могут обмениваться внутренней энергией.

Вдоль возникших продольных разрывов пограничного слоя нижний насыщенный влагой теплый и сжатый воздух прорывается вверх в переохлажденную сухую зону, образуя гряду очень характерных облаков. Они обрисовывают линию разрыва между слоями несмешиваемого воздуха.

Разрывы могут носить точечный характер и формироваться как круговые локальные зоны облаков.



Но не каждый разрыв границы и зоны формирования облаков обязательно влечет образование торнадо.

Сквозь разрывы граничной зоны сверху могут прорываться холодные турбулентные потоки — благодаря изменению давления в нижних слоях. Если вихри и турбулентности в окрестности разрыва носят локальный характер, они формируют причудливые формы облаков.

Вихри и турбулентности холодных верхних слоев могут деформировать поверхность границы в зоне разрывов непредсказуемым образом, в то время как нижние перегретые слои будут оставаться сравнительно спокойными.

При непосредственном контакте холодного сухого и влажного перегретого воздуха пар конденсируется на границе зоны их контакта и обрисовывает формируемые при контакте фигуры облаков очень четко и явно.

Поверхность границы иногда как бы проседает под действием атмосферных вихрей верхних холодных слоев, но глобально при этом не прорывается — разрядки напряжений могут носить массовый точечный характер.



Характерные и специфические формы облаков сигнализируют об опасности торнадо. К счастью, мы можем любоваться ими в основном по фотографиям в Интернете. Торнадо может возникнуть, а может и не сформироваться — разрядка произойдет благодаря разрывам тонкого граничного слоя и постепенного смешивания потоков нижнего теплого и верхнего холодного воздуха.

Даже если турбулентности облаков носят вихревой характер, это не значит, что они сформировали классическое торнадо или смерч. Чтобы торнадо стало самим собой, помимо вихревого движения потоков воздуха и разрывов скачкообразной границы двух слоев нужна вихревая ударная волна. Только она делает эту природную аномалию столь разрушительной и страшной.

Торнадо — это не просто локальный прорыв тропосферных вихрей (инферно) к поверхности земли. Это еще и вовлечение в процесс вращения пограничной зоны между двумя слоями в зоне ее локального разрыва.



Могут наблюдаться разнообразные промежуточные варианты между атмосферными вихрями и торнадо, когда происходит прорыв мощных тропосферных вихрей через значительно ослабленные граничные зоны без вовлечения во вращение самой границы зон, а также с прорывом и последующим вовлечением во вращение границы двух разных температурных зон.

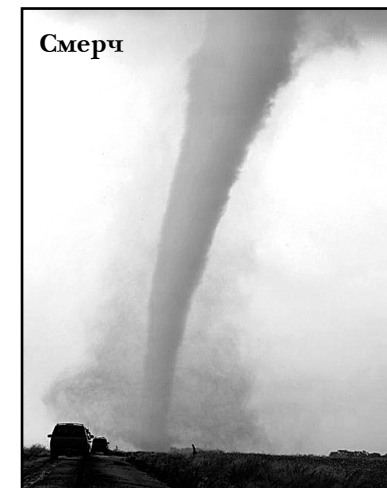
Как только граница оказывается вовлеченной во вращение и ей передается импульс, она начинает вести себя как упругая мембрана и самостоятельная поверхность.

Разрыв в граничной точке раскрывается, в него устремляется перегретый влажный воздух нижних слоев тропосферы, который немедленно вовлекается во вращение глобального холодного тропосферного вихря — его можно сфотографировать из космоса.

Одновременно происходит локализованный прорыв энергии вращения тропосферного вихря ниже зоны границы, с захватом в процесс вращения границы как таковой и формированием ударной вихревой волны.

Под действием глобального вихря в тропосфере разрыв деформируется, граничная поверхность раскручивается и скачкообразно теряет свойства элемента газовой среды. Разрыв практически мгновенно распространяется вдоль оси вращения до поверхности Земли, и пока хватает внутренней энергии, формируется вихревая зона ударной волны. Она постепенно расширяется под воздействием передаваемой из тропосферы энергии, и хобот становится видимым.

Это хорошо описывается функциями Неймана. Глобальная энергия не просто передается через локальный разрыв — она способствует формированию вихревой ударной волны, которая расширяющимся хоботом или конусом опускается к Земле и становится видимой благодаря пыли, пару и очень быстрому вращению частиц воздуха.



Пока зона ударной волны очень тонкая и скручена в тугой жгут, ее не видно. Очевидцы наблюдают опускающийся вниз расширяющийся сверху столб или хобот. Как только радиус вращения фазовых траекторий частиц, описывающих поверхность ударной волны, становится большим, вихревая ударная волна начинает вести себя, как алмазное сверло на высоких скоростях и насос одновременно.

Алмазное сверло по твердому камню и стеклу — это тонкий пустотелый цилиндр из металла, на внешнюю поверхность которого нанесены очень мелкие технические алмазы. При сверлении на низких скоростях оно может расколоть образец. При сверлении на высоких скоростях сверло буквально вгрызается в камень, превращает в пыль кольцевую зону, которую рушат острые грани алмазов, и формирует вокруг себя характерную пылевую зону.

Как технические алмазы на сверле, ведет себя и вихревая ударная волна торнадо. В окрестности же ударной волны происходит вовлечение потоков воздуха и объектов во вращение — восходящие потоки воздуха закручивают и поднимают встреченные на пути предметы.

В 1974 году в Харькове произошло редчайшее (к счастью) событие — над городом быстро прошел тонкий смерч в форме хобота. Его сила была не очень высока и диаметр хобота у земли очень мал, поэтому масштаб разрушений не носил фатальный характер.

Даже шквальные порывы ветра в Харькове могут быть более разрушительными и смертоносными.

Своим центром и хоботом смерч почти мгновенно прошел по двору дома, где проживает автор, сорвал с отдельных балконов сохнувшее белье и предметы, побил стекла в некоторых окнах, характерно изогнул и скрутил несколько ровных до того момента деревьев. Старожилы помнят момент до сих пор и даже гордятся этим.

Деревья остались скрученными до сегодня — жилицы их скоро спилят по старости, заменив молодыми и ровными. Самое интересное, что вращение смерча осуществлялось в столь малой области, что задело очень узкую полосу и изогнуло всего несколько соседних деревьев. Изогнутыми оказались пластичные и гибкие клены, а пирамидальный и серебристый тополя выстояли.

К счастью, радиус фазовых траекторий вращения частиц в зоне ударной волны был слишком мал, практически равен нулю — поэтому гипотетическое «алмазное сверло» смерча не сформировалось и не разрезало дом на три части, как это частенько происходит в США.

Если движение торнадо сопровождается последующим дождем, резким охлаждением воздуха у поверхности земли и похолоданием, угроза торнадо пропадает — происходит естественное разрушение скачкообразной границы между аномальными слоями воздуха.

Если же торнадо формируется локально, но холодный фронт продолжает свое наступление без дождя — угроза возникновения новых торнадо не уменьшается. Более того, одновременно могут сформироваться множественные хоботы смерчей, которые располагаются вдоль зоны разрывов граничного слоя. Когда торнадо в одних местах исчезают, рядом формируются новые смерчи.

Чем мощнее наступление холодного сухого воздуха, чем сильнее прогреет слой влажного воздуха у поверхности и чем стабильнее над ним тропосфера, тем более мощные вихри формируются в верхних слоях тропосферы.

В средней полосе и в частности в Харькове более страшным и актуальным явлением, чем смерчи, являются **шквальные порывы ветра**. Они предшествуют наступлению холодного фронта в жару и возникают при аномальном распределении околосurfaceных воздушных масс.

Если дожди не успевают двигаться за фронтом холодного воздуха, наступающего над поверхностью земли на некоторой высоте, образуется приповерхностная зона шквальных порывов ветра.

Перед полосой дождя и гроз формируются зоны высокой турбулентности в холодных массах. Возникает резкая — скачкообразная граница теплого и холодного воздуха и скачкообразный перепад температур.

Турбулентные потоки разрывают границу, формируя блуждающие ударные волны, которые перемещаются вместе со шквальными порывами ветра.

Некоторые порывы ветра и шквалы несут заряд внутренней энергии, намного превышающий их кинетические показатели, зависящие от массы и скорости воздуха. Именно такие шквалы содержат фрагменты ударных волн и причиняют существенные разрушения в Украине.

Когда набегает подобный шквал, возникает странное ощущение толчка упругой поверхности, а не просто плотного воздуха. Нужно лечь на землю или наклониться.

Несколько лет назад блуждающая со шквалом ударная волна сорвала с крыши высокого дома лист шифера и плавно пронесла его к земле — в результате лист ударил по затылку женщину. Она скончалась на месте.

Порыв ветра, который нес ударную волну, был слабее, чем другие шквалы — это повергло в шок свидетелей ЧП. Все они в один голос утверждали, что в этот день нарушился закон сохранения энергии (Харьков — просвещенный город, этот закон не знают только младенцы).

Такие блуждающие ударные волны срывают крыши с домов, ломают деревья, рвут и скручивают провода, причиняют ущерб экономике и гражданам государства. Некоторые блуждающие ударные волны могут нести элемент вращения и оставлять круговые примятые следы на полях. Но, к счастью, даже они не могут сравниться с колоссальными по силе и разрушительности торнадо, наблюдаемыми в южных районах США.



Известно, что мощные инферно и торнадо могут сопровождать электрические явления, линейные и даже шаровые молнии. Они зарегистрированы на фото и видео очевидцами. Электризация происходит вследствие трения частиц воздуха, пыли, паров воды на критических скоростях.

Аномальные вихревые процессы и вихревые ударные волны могут возникать не только в поверхностном слое тропосферы, но и в верхних слоях тропосферы. Такие процессы, например, проходят в высоких грозовых дождевых облаках, которые начинаются ниже зоны кучевых и слоисто-дождевых облаков и простираются вплоть до зоны слоисто-кучевых облаков до 6000 метров.

Опасные грозовые облака имеют характерную форму — заметное расширение сверху и снизу и суженую турбулентную ножку посередине. Форма и высота таких облаков (наковальня) являются диагностическими признаками.

Локальные смерчи и вихревые ударные волны, возникающие непосредственно внутри этих грозовых облаков, часто не достигают земной поверхности.

Из-за наличия аномальных турбулентностей самолетам категорически запрещено не только проходить сквозь грозовые облака, но даже приближаться к грозовому фронту и тем более облетать его сверху или снизу.

Автор видел фото, выполненные квалифицированным экспертом-криминалистом на месте аварии самолета, который пытался пройти сквозь мощный грозовой фронт, был вовлечен в грозовое облако и подвергся воздействию вихревой ударной волны. Фото не публикуются, поскольку они не были официально опубликованы в СМИ.

Характер повреждений самолета и радиус разлета осколков по номинальным показателям не соответствовал

параметрам удара самолета об землю. У экспертов сложилось мнение, что частичное разрушение элементов самолета и первичные трещины возникли еще до удара об землю. Но никаких внешних повреждений от столкновений с посторонним предметом у самолета выявлено не было.

Это позволило сделать однозначный вывод — самолет подвергся аномальному воздействию еще в воздухе. Значит, пилот попытался пройти сквозь фронт мощных грозовых облаков и зону повышенной турбулентности, а не изменил свой курс, чтобы не встречаться с грозой.

Если внутри фронта грозовых облаков, которые простираются на высоту около трех слоев тропосферы, возникают вихревые ударные волны, они распространяются практически по всей высоте облака и формируют зоны повышенной турбулентности и сверху, и снизу фронта.

Турбулентность в окрестности грозового облака может вовлечь самолет внутрь грозового облака и подвергнуть воздействию локально-сформированной вихревой ударной волны. В этом случае разрушения и трещины возникнут в момент прохождения вихревой ударной волны — профиль крыла самолетов дозвуковых и околозвуковых скоростей не может противостоять таким нагрузкам ударных волн.

Зоны, в которых отмечается максимальная электрическая активность, являются носителями наибольшей вертикальной турбулентности. Зоны максимальной электрической активности внутри грозового облака показывают места возможного расположения вихревой вертикально-ориентированной ударной волны — наиболее опасное место в грозовом облаке (см. фото облаков на стр. 169).

Водяной пар и воздух достаточно проницаемы для солнечных лучей. Но вихревая ударная волна и вовлеченные ею в локальное вращение пар, кристаллы льда и воздух практически непрозрачны. Они делают облако локально непроницаемым для солнечных лучей.

Поэтому перед проходом мощного грозового фронта вокруг резко темнеет. Чем меньше света проходит сквозь грозовые тучи, тем более мощные вихри и ударные волны были сформированы внутри грозового облака.

Существование локализованных вихревых ударных волн поясняет световую непроницаемость грозовых облаков и потемнение, вызывающее естественный страх.

В облаках грозового фронта часто формируются восходящие вращающиеся вихри и турбулентности.

Столкновение с теплым фронтальным воздухом вызывает перемешивание воздуха и образование восходящих турбулентных потоков. Если такой поток пересекает одну из выраженных фазовых границ между слоями тропосферы, формируется вертикальная вихревая ударная волна.

Она формируется у основания грозового облака, простирается до границы слоисто-кучевых облаков и перераспределяет элементы среды между слоями тропосферы.

Подобные вихревые процессы придают грозовому облаку форму наковальни и отличают его от кучевых облаков, которые называют «облаками хорошей погоды».



Известно, что электрический заряд в статической форме может накапливаться в следствие трения разнородных слоев друг о друга. При этом одни слои отдают отрицательно заряженные электроны, приобретая положительный заряд, другие слои принимают электроны и становятся отрицательно заряженными. Образуется природный конденсатор.

В результате движения облаков, расположенных на границе наступающего холодного фронта, который движется над зоной перегретого воздуха, происходит электризация.

Восходящие конвекционные потоки горячего воздуха поднимаются вверх, сталкиваются с границей, изменяют траекторию движения вдоль границы, способствуют ее электризации и накоплению статического электричества.

Даже если среди ясного неба грянул гром, это значит, что над приповерхностным теплым воздухом осуществился локальный прорыв слоя холодного воздуха. В результате восходящие от земли потоки горячего воздуха сталкиваются с невидимым препятствием и электризуют границу между аномальными горячими и холодными слоями.

Это редкое явление в природе бывает — автор его непосредственно наблюдала несколько раз. Вскорости после грома небо затягивала легкая дымка, набегали облака, и погода заметно менялась (холодало).

Трение между разнородными слоями воздуха объясняет, почему электризуется граница между слоями воздуха и обращенная к земле нижняя часть облака.

Но это не объясняет наличие зон аномальной грозовой активности, которые существуют в толще грозового облака и простираются столбами на километры вверх.

Электрическая активность вертикальных аномалий намного превышает приграничную электризацию. Такие аномалии являются центрами мощных и сверхмощных грозовых явлений и даже шаровых молний.

Многочисленными опытами и экспериментами было установлено, что для формирования стабильных шаровых молний мощных и сверхмощных источников электрической напряженности самой по себе не достаточно.

Шаровые молнии — сгустки низкотемпературной плазмы — существовали до тех пор, пока существовал источник электрической энергии, затем они разрушались.

Такие опыты имеют колоссальную научную ценность. Они не только доказали электрический генезис шаровой молнии, но и показали, что существует иная причина стабильности, не связанная с электричеством как таковым.

Источником некоторой стабильности шаровых молний может выступать комплексное взаимодействие двух независимых факторов — высокой электрической напряженности электромагнитного поля в сочетании с энергией вихревой вертикальной ударной волны.

Трение частиц воздуха, льда и пара внутри восходящих турбулентных потоков вызывает разделение и перераспределение положительных и отрицательных зарядов в грозовом облаке — это известный факт. Облако превращается в гигантский природный конденсатор. Как только его емкость превышает — наступает пробой и разряд энергии в форме линейной молнии.

В тот момент, когда емкость конденсатора становится критической, с него начинают медленно стекать избыточные заряды — как в физических опытах.

В момент стекания заряда критическая зона подвергается воздействию вихревой ударной волны, которая скачком отрывает ее фрагмент, несущий существенный заряд, и передает ему порцию внутренней энергии. Заряду обеспечивается стабильность существования во времени.

Таким образом, шаровая молния несет не только заряд электрической энергии, но и переданный ей момент внутренней энергии вихревой ударной волны.

Заряды, которые стекают с грозового облака, называются «бегущими лидерами» (или просто «лидерами»). Они движутся со скоростью около 20 м/с, оставляя за собой ионизированный канал. По пути лидер может расщепиться и разделиться — тогда молния ветвится.

Как только лидер достигает земли и высокого предмета — наступает пробой природного конденсатора и последующий разряд. Мы его видим как единую яркую молнию, а на расстоянии слышим множественные раскаты грома.

Мгновенных последовательных разрядов по одному каналу производится от 10-15 до 80 и даже до 100 в редких случаях. Можете посчитать количество раскатов грома на удалении около 2-2,5 км от молнии.

Если лидер оказался слабеньким и разрушился до того, как он полностью сформировал ионизированный канал, разряда молнии не происходит. Большинство выходов лидеров заканчиваются не разрядом, а саморазрушением.

Лидер, формирующий привычную молнию «между небом и землей», живет около 50-80 секунд, так как ему необходимо это время для достижения поверхности.

Если же лидер оказался слишком большим по размеру, он встречает существенное сопротивление окружающей среды, скорость движения замедляется, ионизированный канал за ним успевает полностью (лидер рассеивается) или частично закрыться (шаровая молния взрывается).

Если лидер получил дополнительную подпитку от ударной волны, он проживет еще некоторое время независимо от грозы, образовав видимую шаровую молнию.

Стремясь занять наименьший объем, вещество в состоянии плазмы принимает шарообразную форму (площадь поверхности шара минимальна среди прочих тел). Шаровая молния — это «слишком далеко убежавший» лидер с некоторым зарядом энергии вихревой ударной волны.

Если ураган (буря, смерч) застал Вас в здании, отойдите от окон и займите безопасное место у стен внутренних помещений, в коридоре, у встроенных шкафов, в ванных комнатах, туалете, кладовых, в прочных шкафах, под столами. Погасите огонь, отключите электроэнергию, закройте краны на газовых сетях. В США от торнадо люди прячутся в оборудованных подвалах и погребах.

Для защиты от летящих обломков и осколков стекла используйте листы фанеры, картонные и пластмассовые ящики, доски и другие подручные средства. Не заходите в поврежденные здания, так как они могут обрушиться при новых порывах штормового ветра.

Если смерч застает Вас на открытой местности, укрывайтесь на дне дорожного кювета, в ямах, рвах, узких оврагах, плотно прижимаясь к земле, закрыв голову одеждой или ветками деревьев. Нужно лечь максимально низко. Не оставайтесь в автомобиле, немедленно выходите из него и укрывайтесь, как указано выше.

Опасность для людей при таких природных явлениях заключается в разрушении дорожных и мостовых покрытий, сооружений, воздушных линий электропередачи и связи, наземных трубопроводов, поражении людей обломками разрушенных сооружений, осколками стекол, летящими с большой скоростью. Люди могут погибнуть и получить травмы в случае полного разрушения зданий.

Основными признаками возникновения ураганов являются: усиление скорости ветра и резкое падение атмосферного давления; ливневые дожди и штормовой нагон воды; бурное выпадение снега и грунтовой пыли.

Молния опасна тогда, когда вслед за вспышкой СРАЗУ следует раскат грома, а гром не имеет раскатов.

Закройте окна, двери, дымоходы и вентиляционные отверстия. Не разговаривайте по телефону: молния иногда попадает в натянутые между столбами провода. Выключите мобильные телефоны. Если Вы находитесь в лесу, то укройтесь на низкорослом участке леса. Не находитесь в водоеме и на его берегу. В степи, поле или при отсутствии укрытия (здания) сядьте на корточки в ложбине, овраге или другом углублении, обхватив ноги руками. Если гроза застала Вас в автомобиле, не покидайте его, закройте окна и опустите антенну радиоприемника.

УДК 531.0
ББК 22.311
К-305

Кафтанова Ю. В.

К-305 Специальные функции математической физики. Научно-популярное издание. — Х.: ЧП Издательство «Новое слово», 2009. — 596 с.

ISBN 978-966-2046-62-5

Издание рассматривает метод рекуррентных отношений для специальных функций математической физики и особенности использования специальных функций для моделирования различных природных и техногенных процессов.

Часть 1 рассматривает цилиндрические функции Бесселя и Неймана. Часть 2 изучает поведение сферических функций и ортогональных полиномов. Приводятся авторские программы вычислений, написанные на языке JavaScript.

В части 3 изучается применение специальных функций для математического моделирования природных катаклизмов — цунами, землетрясений, торнадо, смерчей и для исследования поведения движущихся камней в Долине Смерти, США. Также строится математическая модель звучания и управления электрогитары с использованием современного аппарата специальных функций математической физики.

Рассчитано не только на специалистов-математиков, но и на широкий круг подготовленных читателей.

УДК 531.0
ББК 22.311

© Кафтанова Ю.В., 1992-2009
© ЧП Издательство «Новое слово», 2009

ISBN 978-966-2046-62-5

Оглавление

Введение	4
Глава 1. «Живые камни» в Долине Смерти, США	
§ 1. Долина Смерти — природный феномен	6
§ 2. Геологические понятия сбросовых структур и рифтовых долин (грабенов)	11
§ 3. Математическая модель, описывающая природу самопроизвольного движения камней по дну сухого озера в Долине Смерти, США	19
Глава 2. Свободно распространяемые ударные волны в сплошных средах	
§ 1. Цунами — страшная разрушительная аномалия	39
§ 2. Математическая модель, описывающая поведение цунами	44
§ 3. Модель поведения приповерхностных сейсмических волн — явление землетрясения	64
§ 4. Модель формирования волн цунами	76
§ 5. Модель распространения волн цунами	107
§ 6. Ударные волны в атмосфере Земли	133
Глава 3. Вихревые ударные волны в атмосфере	
§ 1. Торнадо и смерчи — вихревые природные аномалии	140
§ 2. Модель формирования и поведения торнадо	147
§ 3. Поведение вихрей, смерчей и торнадо	162
Глава 4. Управляемые колебания натянутых струн *	
§ 1. Поведение натянутой струны современных музыкальных инструментов	182
§ 2. Формирование звука современной электрогитары	193
Заключение	254

**Написано нормальным языком
для нематематиков**

*) Глава 4 существует в двух вариантах — в строгом и сокращенном академическом варианте и более полном для музыкантов и меломанов.

Юлия Викторовна Кафтанова

Специальные функции математической физики
Издание осуществляется в трех частях

Часть 1. Функции Бесселя и цилиндрические функции
в элементарном изложении с программами вычислений

Часть 2. Ортогональные полиномы и другие сферические функции
в элементарном изложении с программами вычислений

Части 1 и 2 рассчитаны на специалистов, инженеров и математиков. В них строго излагается авторский метод рекуррентных отношений для специальных функций математической физики и особенности их применения на практике.

Часть 3. Моделирование аномальных и экстраординарных
природных и техногенных процессов

Часть 3 носит научно-популярный характер и рассчитана в первую очередь на нематематиков. Она написана понятным языком и рассказывает о таких явлениях, как движущиеся камни в Долине Смерти, цунами, волны-убийцы, землетрясения, торнадо, смерчи и шквалы в атмосфере с точки зрения матфизики.

Для профессиональных музыкантов и любителей современной музыки строится математическая модель звучания современной постхендриковской электрогитары.

К части 3 бесплатно прилагается компакт-диск с цветными компьютерными иллюстрациями, фотографиями и видеоматериалами очевидцев.

Юлия Викторовна Кафтанова

Специальные функции математической физики

Часть 3. Моделирование аномальных и экстраординарных
природных и техногенных процессов

ЧП Издательство «Новое слово», Харьков

Редактор выпуска: Антон Анатольевич Кафтанов

Дизайн обложки и компьютерная верстка: Ю.В. Кафтанова

Для писем: Кафтанова Ю.В., а/я 10911, Харьков, 61003, Украина

Наши электронные адреса: www.ois.org.ua, www.mat.net.ua

Тел. в Харькове: +38 050 13579-29, +38 050 0463-643

E-mail: webois@bk.ru, korum68@bk.ru

Печать обложки: типография «Планета Принт»

Сдано в набор 28.10.2008. Подписано в печать 19.01.2009.

Формат 84x118 1/32. Бумага офсетная. Печать лазерная.

Гарнитура «NewBaskerville». Усл. авт. л. 10,8.

Тираж 500 экз.

ISBN 978-966-2046-62-5



9 789662 046625 >

Любое использование материалов настоящей книги разрешается только с обязательной ссылкой на автора текста и настоящее научно-популярное издание. Использование фото в данном издании производится исключительно в научных целях — никакие фото из этого издания не могут быть скопированы и использованы третьими лицами для иных целей.

ISBN 978-966-2046-62-5

Столб торнадо



WWW.MAT.NET.UA



«Живые
камни»
в Долине
Смерти,
США



Цунами в
прибрежной
зоне



Ударная волна
в атмосфере



Управляемые колебания
натянутой струны

