

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ЦУНАМИ
НАДВОДНЫМИ И ПОДВОДНЫМИ ВУЛКАНАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Овечкина Александра Сергеевича

студента 2 курса, 2225 группы

направления подготовки 03.04.02 Физика

Института физики

Научный руководитель
к.ф.-м.н. доцент

О.А. Черкасова

Заведующий кафедрой
компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН
д.ф.-м.н. профессор

В.М. Аникин

Саратов 2021 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Катастрофические океанские волны, получившие название “цунами”, ещё в 60-х годах XX века, считались неизвестным и необъяснимым феноменом в жизни океанов. Внезапное обрушение на побережье гигантской волны уносило десятки тысяч жизней, причиняя весомый ущерб. На сегодняшний день имеются сведения о 1500 событиях в океанах и морях, которые приводили к возникновению цунами. Явление моретрясения, вызываемое сейсмическими колебаниями дна акватории, известно только редким специалистам и опытным мореплавателям. Другие быстропротекающие явления в океане (волны-убийцы, температурные аномалии, акустические эффекты) совсем недавно попали в поле зрения учёных благодаря стремительному развитию дистанционных методов наблюдений, совершенствованию методов обработки данных, доступности электронных баз и каталогов. Изучение всего комплекса перечисленных явлений в океане проливает свет на механизмы взаимодействия различных сред в сообщающейся и взаимопроникающей системе литосфера–гидросфера–атмосфера. Образование цунами в первую очередь связывают с сейсмическими движениями дна, оползнями и обвалами (в том числе и подводными), подводными вулканическими извержениями. Аналогичные по характеристикам волны могут возникать при резких изменениях атмосферного давления (метеоцунами) и при мощных подводных взрывах. В последнее время активно обсуждается вопрос о генерации цунами в результате падения метеоритов. Следует иметь в виду возможность комбинации различных причин. Так, например, подводные оползни, спровоцированные землетрясением, могут обеспечить дополнительный вклад в энергию волн цунами, образованных подвижками дна. Подчеркнем, что основной причиной разрушительных цунами являются резкие вертикальные смещения участков дна при сильных подводных землетрясениях. Для численного моделирования волн цунами обычно используют уравнения гидродинамики, которые проинтегрированы вдоль вертикальной координаты. За счет снижения размерности исходной трехмерной задачи такой подход обеспечивает существенный выигрыш в объеме необходимых вычислений, что позволяет воспроизводить трансокеанское или даже глобальное распространение волн. Простейшим вариантом вертикально интегрированных уравнений являются уравнения теории длинных волн, которые положены в основу многих современных численных моделей цунами.

Целью данной выпускной квалификационной работы (ВКР) является построение физических моделей генерации волн цунами подводными и надводными вулканами, а также сравнение полученных результатов, разработка двух компьютерных программ с использованием метода конечных разностей для описания процесса генерации вулканических цунами.

Задачи. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Построение математических моделей рассматриваемых явлений;
2. Выбор метода решения, поставленных математических задач;
3. Разработка и применение программного обеспечения;

4. Проведение вычислительного эксперимента;
5. Обработка и сравнение результатов моделирования.

Практическая значимость данной работы заключается в создании простой расчетной модели и алгоритмов расчета задач генерации волн цунами с целью методического изучения вышеуказанного процесса в компьютерном практикуме.

Методы исследования. В данной работе при создании моделей процессов генерации волн цунами применялись аналитические и численные методы.

Объектом исследования являются вулканические цунами, а **предметом исследования** – процесс генерации волн цунами извержениями подводных и надводных вулканов.

Достоверность результатов подтверждается сравнением с результатами, полученными с помощью аналитических решений поставленных математических задач.

Структура ВКР. Выпускная квалификационная работа (ВКР) изложена на 52 страницах и состоит из введения, трёх разделов, заключения, литературы и трёх приложений. Список использованных источников содержит 41 наименование, в том числе статьи в периодических изданиях за последние 20 лет. Текст иллюстрирован 9 рисунками и содержит два листинга программ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы аспектные характеристики работы (актуальность, цель, задачи, объект, предмет и методы исследования).

В первой, обзорной по характеру главе, излагается теоретическое описание процесса генерации цунами при вулканических извержениях. В настоящее время на Земле известно 933 действующих вулкана, из которых 195 являются подводными. Основными физическими механизмами возбуждения вулканогенных цунами являются:

- выброс в воду большого объёма вещества (от медленного истечения лавы до взрывного или взрывного извержения);
- коллапс кальдеры (взрыв вулканического острова);
- пирокластические потоки, обвалы и т. д;
- вулканические землетрясения.

Для подводных вулканов наиболее распространёнными являются первые два из перечисленных механизмов. Третий (обвальный) механизм может быть больше свойственен вулканам, расположенным на побережье, хотя не следует исключать возможность подводных оползней и обвалов, инициированных подводным извержением.

В данной работе сделан акцент на рассмотрении только следующих механизмов генерации цунами: вулканогенных землетрясениях, выбросе большого объёма вещества в воду и коллапсе кальдеры. Генерация волн вулканогенными оползнями и обвалами в данной работе не рассматривается.

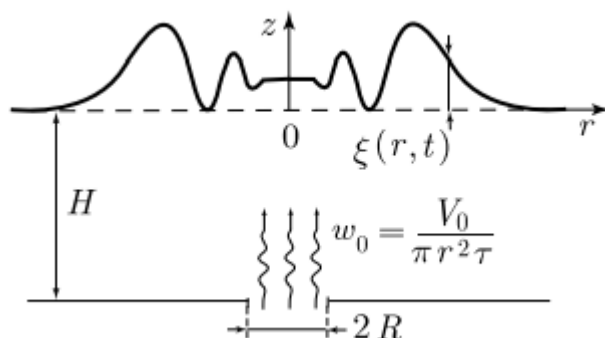


Рисунок 1 – Математическая постановка задачи о генерации цунами подводным извержением

Во второй главе решается задача построения математических моделей указанных в работе процессов. В данной работе при моделировании генерации волн цунами надводными вулканами, будет рассмотрен случай подводного землетрясения.

При построении математической модели выбраны следующие приближения для описания волн цунами:

1. Модель идеальной (невязкой) жидкости.
2. Модель несжимаемой жидкости (тем самым пренебрегаем различными акустическими эффектами).
3. Использование линейного приближения (волны малой амплитуды).
4. Пренебрежение вращением Земли.
5. Глубина океана является постоянной на рассматриваемом участке.

После всех принятых приближений, система уравнений для описания линейных гравитационных волн запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \operatorname{div}(\vec{v}) = 0 \end{cases}$$

Здесь первое уравнение в системе описывает динамику движения волны, а второе – это уравнение неразрывности. Вектор скорости содержит 3 компоненты $\vec{v} \equiv (u, v, w)$, где u и v – горизонтальные, w – вертикальная.

Граничные условия для данной системы можно записать в виде:

$$p|_{z=0} = p_{\text{атм}}$$

Давление на поверхности воды равно атмосферному (в данной модели полагаем, что $p_{\text{атм}} = \text{const.}$)

$$w|_{z=-H} = 0.$$

Условие непротекания: вертикальная скорость жидкости на дне полагается равной нулю.

Рассмотрим задачу о генерации волн цунами движениями дна. После принятых приближений переходим к *линейной потенциальной теории*.

Если принять океан за идеальную жидкость (не вязкую), то получим дифференциальное уравнение Лапласа с граничными условиями гравитационных волн на поверхности и условием не протекания на дне:

$$\begin{cases} \Delta F = 0 \\ \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = -g \frac{\partial F}{\partial z}, z = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, z = -H \end{cases}$$

В третьей главе работы произведен и описан численный эксперимент, а также проведен сравнительный анализ полученных результатов моделирования.

На рис.2 изображен процесс генерации волны цунами подводным землетрясением. Возмущение начинает резко нарастать в момент времени t_1 , совпадающий с моментом прихода сейсмической волны к поверхности воды.

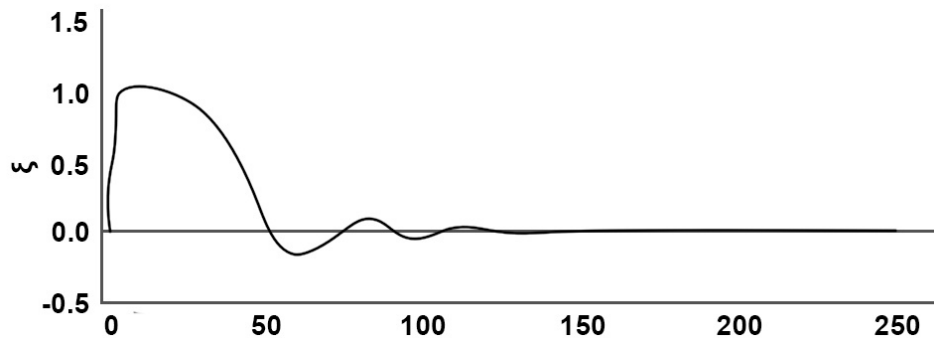


Рисунок 2 – Смещение свободной поверхности океана, сгенерированной подвижкой дна, вызванной вулканическим землетрясением в центре источника

В случае отдаления от источника генерации волн (рис.3) наблюдаем, что гравитационная волна вступает с запозданием по сравнению с акустической [1][3].

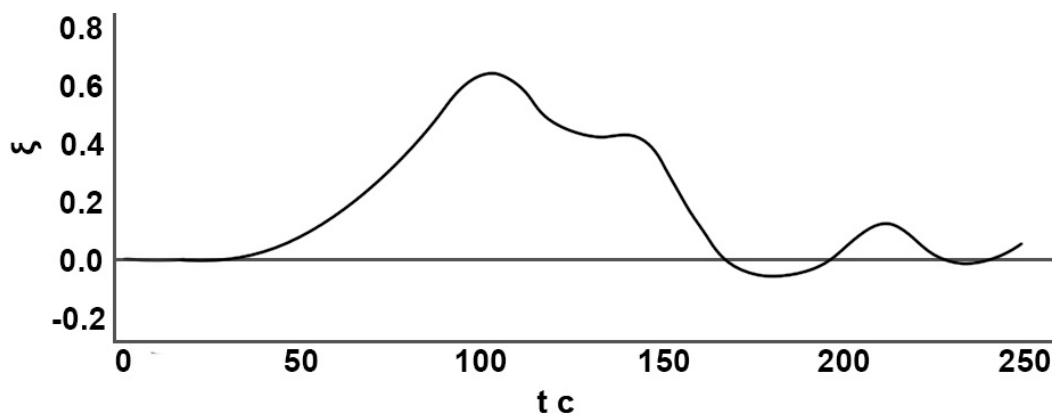


Рисунок 3 – Смещение свободной поверхности океана, сгенерированной подвижкой дна, вызванной вулканическим землетрясением на удалении от источника

На рис.4 изображен процесс генерации волны цунами подводным извержением. Начальный момент времени совпадает со временем выплеска вещества из жерла вулкана. Время t_1 – время прихода взрывной волны, вызванной извержением, к поверхности воды. Взрывная волна усиливает цунами, вызванное выплеском большого количества вулканического вещества, далее волна затухает.

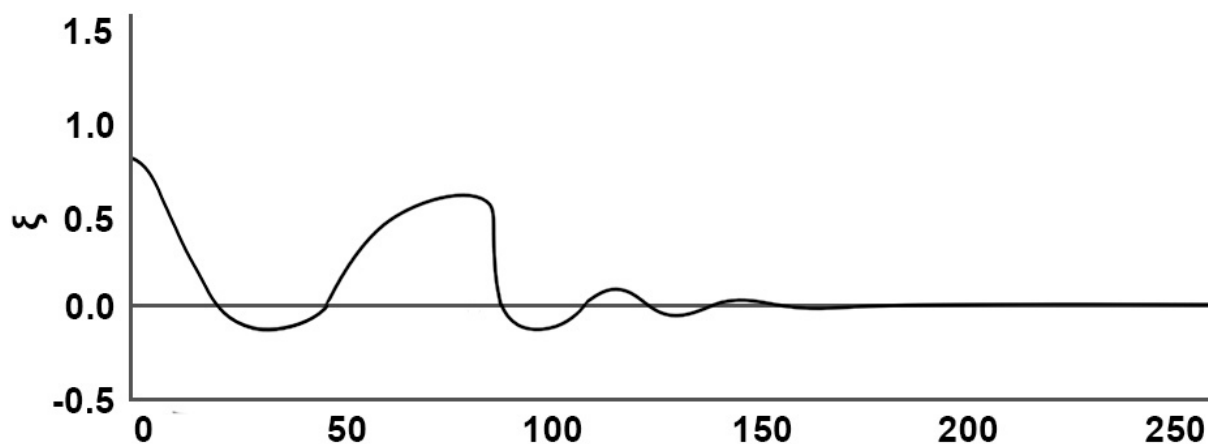


Рисунок 4 – Смещение свободной поверхности океана, сгенерированной взрывным извержением подводного вулкана в центре источника.

На (рис.5) наблюдаем аналогичную картину рис.3, гравитационная (под действием силы тяжести) волна аналогично предыдущей задаче вступает в процесс с запозданием.

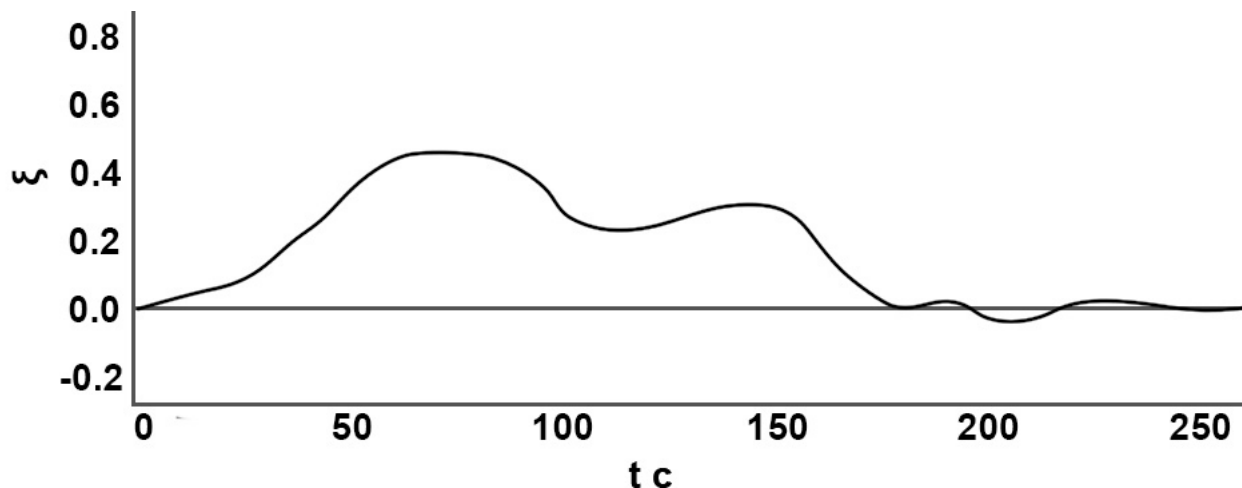


Рисунок 5 – Смещение свободной поверхности океана, сгенерированной взрывным извержением подводного вулкана на удалении от источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении полученных результатов моделирования генерации волн цунами двумя типами вулканов (подводный и надводный) были получены следующие выводы.

Основным является различие типов волн, генерирующих возмущение свободной поверхности и причина их появления. При рассмотрении задачи, связанной с надводным вулканом, причиной генерации являются сейсмические волны подводного землетрясения. Дошедшая от вулкана сейсмическая волна вызывает колебания дна, становящихся причиной *продольных* волн, которые доходят до водной поверхности и вызывают её возмущение. Таким образом, начальными условиями в данной задаче являются величины: силы сейсмической волны, ставшей причиной подводного землетрясения; компоненты начальной скорости по осям— скорость сейсмической волны, начальное возмущение дна. Особенностью данной задачи является то, что она привязана всего к одной пространственной координате, но из-за осевой симметричности рассматриваемой задачи можно сделать вывод, что модель выглядит идентично и по другим осям. Начальное время генерации цунами является временем прихода сейсмической волны к поверхности воды. Рассматривая полученный в результате моделирования графический результат, можно сделать вывод, что амплитуда колебаний, вызванных подвижкой дна описывается синусоидально с затуханием волн во времени.

Анализируя модель генерации волн подводным извержением приходим к выводу, что причиной их появления является ударная волна при взрывном подводном извержении. Дошедшая до поверхности воды ударная волна возмущает её, вызывая цунами. В данной задаче начальными величинами служат: сила ударной волны, заданная соотношением (26); начальная скорость — скорость ударной волны (равная скорости распространения звука под водой). Данная задача так же была смоделирована, учитывая только одну пространственную координату. Как и в прошлой модели сделано предположение, что из-за осесимметричности, полученный результат можно экстраполировать и на другие оси. Рассматривая графическое отображение полученной модели, можно сделать вывод, что начальное время возбуждения волн запаздывает по сравнению со случаем рассмотрения вулканического извержения. После выброса вещества из вулкана, возмущение свободной поверхности сначала снижается, а после прихода взрывной волны усиливается. Далее аналогично прошлой модели является собой затухающую синусоидальную функцию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алексеев А. С., Гусяков В. К.* Численное моделирование процесса возбуждения волн цунами и сейсмоакустических волн при землетрясении в океане // Труды IV Всесоюзного симпозиума по дифракции и распространению волн, 1973, Т.2. С.194–197.
2. *Басов Б. И., Дорфман А. А., Левин Б. В., Харламов А. А.* О возмущениях поверхности океана, возбуждаемых извержением подводного вулкана // Вулканология и сейсмология. 1981, №1. С.93–98.
3. *Басов Б. И., Кайстренко В. М., Левин Б. В., Поплавский А. А., Симонов К. В., Харламов А.А.* Некоторые результаты физического моделирования процессов возбуждения и распространения волн цунами // Генерация цунами и выход волн на берег. М.: Радиосвязь. 1984. С.68–72.
4. *Бреховских Л. М., Гончаров В. В.* Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн). М.: Наука, 1982. С.–335.
5. *Войт С. С., Лебедев А. Н., Себекин Б. И.* Некоторые особенности волн цунами, связанные с характеристиками очага возмущения // Теория и оперативный прогноз цунами. М.: Наука, 1980. С. 5–11.
6. *Войт С. С.* Волны цунами. // Исследование цунами. 1987. №2. С. 8–26.
7. *Гарбер М. Р.* Уточнение модели возбуждения подводными землетрясениями длиннопериодных волн в океане и атмосфере // Труды ДВНИИ №103. Л.: Гидрометеоздат, 1984, С. 14–18.
8. *Гусяков В. К.* О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения. // Математические проблемы геофизики. Новосибирск: изд-во ВЦ СОАН СССР, 1974, вып.5, ч. I. –С. 118–140.
9. *Гусяков В. К., Чубаров Л. Б.* Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Физика Земли. 1987, №11. С. 53–64.
10. *Доценко С. Ф.* Возбуждение цунами при колебаниях участка дна. // Известия АН СССР, ФАО, 1996, Т. 32, №2. С. 264–270.
11. *Доценко С. Ф.* Генерация поверхностных волн при финитных деформациях дна бассейна // Механика жидкости и газа, 1996, №2. С. 151–156.
12. *Доценко С. Ф., Соловьев С. Л.* Математическое моделирование процессов возбуждения цунами подвижками океанского дна // Исследования цунами. М. 1990. № 4. С. 8–20.
13. *Дегтярев А.А.* Метод конечных разностей: Электронное учебное пособие. Самара 2011. 83 с.
14. *Егоров Ю. А.* Гидродинамическая модель генерации волн цунами извержением подводного вулкана. // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР. 1990. Т.1. С. 82–93.
15. *Жмур В. В.* Поверхностные явления над очагами сильных подводных землетрясений // Исследование цунами. 1987. №2. С. 62–71.
16. *Зволинский Н. В.* О сейсмическом механизме возбуждения волн цунами. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. №3. С. 3–15.
17. *Ивакин Б.Н.* Методы моделирования сейсмических волновых процессов. М.: Наука, 1969, 288 с.
18. *Костицына О. В., Носов М. А., Шелковников Н. К.* Исследование нелинейности в процессе генерации волн цунами подвижками морского дна // Вестник Московского университета, Сер. 3, Физика, Астрономия. 1992. Т. 33, №4, С. 87–90.
19. *Куликов Е.А.* Изучение цунами: измерение, анализ, моделирование. Диссертация. М., 2005, 228 с.
20. *Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.* Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та. 2004. 158 с.

21. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т.4. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
22. Левин Б. В. Об очаге и гидромеханике подводного землетрясения. //Распространение и набегание на берег волн цунами. М.: Наука, 1981. С. 5–10.
23. Левин Б. В. Обзор работ по экспериментальному моделированию процесса возбуждения цунами. // Методы расчета возникновения и распространения цунами. –М.: Наука, 1978. С. 125–139
24. Левин Б. В., Носов М. А. Физика цунами и родственных явлений в океане. — М.: Янус-К, 2005. 360 с.
25. Марчук Ан. Г., Чубаров Л. Б., Шокин Ю. И. Численное моделирование волн цунами. Новосибирск: Наука, Сибирское отд. 1983. 175 с.
26. Мирчина Н. П., Пелиновский Е. Н. Дисперсионное усиление волн цунами // Океанология. 1987. Т. 27, №1. С. 35–40.
27. Мурти Т. С. Сейсмические морские волны цунами. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 450с.
28. Носов М. А. Воздействие подводных землетрясений на стратифицированный океан //Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1998. № 4. С. 23–27.
29. Носов М. А. Генерация цунами колебаниями участка дна // Вестник Московского университета. Сер.3, Физика. Астрономия. 1992. Т. 33, № 1. С. 109–110.
30. Носов М. А., Колесов С. В., Остроухова А. В., Алексеев А. Б., Левин Б.В. Упругие колебания водного слоя в очаге цунами // ДАН. 2005. Т. 404, №2. С. 255–258.
31. Носов М.А., Колесов С.В. Комбинированная численная модель цунами, Матем. моделирование. 2019. Т. 31, № 1. С. 44–62.
32. Носов М. А., Скачко С. Н. Нелинейный механизм генерации цунами колебаниями дна // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2001. № 1. С. 44–47.
33. Никифоров А. Ф., Уваров В. Б. Специальные функции математической физики. М.: Наука, 1984. 334 с.
34. Носов М. А., Шелковников Н. К. Генерация волн цунами подвижками дна // Взаимодействие в системе литосфера– гидросфера–атмосфера. М.: Недра, 1996. С. 118–128.
35. Новикова Л. Е., Островский Л. А. О возбуждении волн цунами бегущей подвижкой океанического дна. Методы расчета возникновения и распространения цунами. М.: Наука, 1978. С. 88–99.
36. Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами. –Нижний Новгород: ИПФ РАН. 1996. 276 с.
37. Подъяпольский Г. С. Возбуждение цунами землетрясением // Методы расчета возникновения и распространения цунами. М.: Наука, 1978. С. 30–87.
38. Сасорова Е. В., Диденкулов И. Н., Карлик Я. С., Левин Б. В., Морозов В. Е., Петроченко С. П. Подводные землетрясения вблизи от береговой линии: акустические методы для выделения процесса подготовки землетрясения и перспективы применения для систем предупреждения о цунами // Локальные цунами: предупреждение и уменьшение риска. М.: Янус-К, 2002. С.167–180.
39. Сидняев Н.И. Теоретические исследования гидродинамики при подводном взрыве точечного источника. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С.21.
40. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 798 с.
41. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. Пер. с англ. М.: Недра, 1981, 232 с.