

**ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П.ШИРШОВА
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

На правах рукописи

Куликов Евгений Аркадьевич

Изучение цунами: измерение, анализ, моделирование
25.00.28 - океанология

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П.Ширшова РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ефим Наумович Пелиновский

доктор физико-математических наук
Владимир Владимирович Жмур

доктор физико-математических наук,
Михаил Александрович Носов

Ведущая организация: Гидрометцентр России

Защита состоится 8 июня 2005 г. в ____ часов на заседании Диссертационного Совета Д.002.239.02' по океанологии при Институте океанологии им. П.П.Ширшова РАН по адресу: 117997, Москва, Нахимовский пр., 36, большой зал конференций

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН.

Автореферат разослан 21 апр - 2005 г.



Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

С.Г.Панфилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Цунами относится к наиболее грозным стихийным бедствиям. Возникая обычно в результате сеймотектонических подвижек дна в зоне сейсмического очага, волны цунами распространяются далеко от источника, нанося ущерб там, где само землетрясение не ощущалось. Эффект неожиданности атаки цунами является дополнительным фактором риска. Можно привести трагический пример последней катастрофы 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, в результате которой погибли более 300000 человек в Индонезии, Индии, Шри Ланке и др. странах. Время, прошедшее между моментом образования волны в океане и приходом цунами на побережье, было достаточным (от 20 мин до 2 ч), чтобы вовремя вывести население из вероятной зоны поражения, но отсутствие службы предупреждения в этом регионе не позволило организовать своевременную эвакуацию.

Учитывая специфический характер поражающих факторов цунами, это стихийное бедствие можно отнести к одному из наиболее неотвратимых природных явлений. Чудовищные объемы морской воды, накатывающие на берег, в большинстве случаев не могут быть остановлены искусственными защитными сооружениями. Высота наводнения порой превышает 10 м, а в некоторых зонах побережья (в области мелководного шельфа, в устьях рек и др.) волна приобретает форму бора (водной стены). Двигаясь с огромной скоростью вглубь берега, этот вал воды аккумулирует колоссальную динамическую энергию, уничтожая на своем пути суда и строения. Наиболее эффективной защитой от этого бедствия являются мероприятия по своевременной эвакуации населения в безопасные зоны побережья и увод судов в открытое море. Естественно, в этом случае важен фактор заблаговременности поступления информации о приближении волны. Своевременный *оперативный прогноз цунами* - это, пожалуй, наиболее важный аспект этой проблемы. Однако и само по себе знание степени

опасности цунами на том или ином участке побережья позволяет предотвратить вероятный ущерб за счет правильной организации хозяйственной и коммунальной деятельности в прибрежной зоне, включая планирование строительства, создание путей эвакуации населения, проведение мероприятий по обучению жителей, проживающих в цунамиопасных зонах т.д. Сегодня невозможно представить себе современную экономическую деятельность без учета оценки рисков и страхования от стихийных бедствий. Собственно говоря, формализованный подход к оценке опасности цунами на побережье и составляет понятие *долгосрочный прогноз цунами*.

Проблема цунами, несомненно, относится к ряду прикладных задач геофизики. Большинство выполняемых исследований могут быть отнесены или к проблеме *оперативного*, или *долгосрочного прогноза* цунами. При этом часть из них находится на стыке нескольких «классических» направлений геофизики, в частности, океанологии и сейсмологии. Однако необходимо подчеркнуть, что круг проблем, связанных с изучением цунами, носит не только прикладной, но и общенаучный интерес в рамках фундаментальных проблем наук о Земле.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ являлось комплексное исследование, включающее этапы *измерения, анализа и моделирования* цунами для целей оперативного и долгосрочного прогноза.

Непосредственные задачи работы могут быть сформулированы следующим образом:

- Анализ физических механизмов формирования колебаний уровня океана типа цунами и разработка методов измерения (идентификации) цунами в записях уровня океана по данным береговых регистраторов уровня, датчиков придонного гидростатического давления (ПГД) и спутниковых высотомеров (альтиметров);

- Разработка методов анализа записей цунами с целью определения свойств очага цунами;
- Создание прикладных методов и алгоритмов идентификации сигнала цунами в записи для автоматизированного прогноза в системе предупреждения цунами (оперативный прогноз цунами);
- Построение статистических моделей вероятностного распределения высот цунами на побережье для расчета повторяемости (долгосрочный прогноз цунами);
- Анализ физических механизмов и создание эффективных численных моделей процессов генерации волн цунами, возбуждаемых подводными оползнями

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В работе использовались современные технологии статистического анализа результатов измерения уровня океана и исторических данных (каталогов) о цунамигенных землетрясениях и высотах волн на побережье. При создании моделей процессов генерации и распространения цунами применялись аналитические и численные методы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫПОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Разработан метод оценки степени захвата шельфом энергии цунами, возбуждаемого в пределах шельфа и континентального склона. Введен формальный параметр - «коэффициент захвата» для точечного изотропного источника, определяющий долю энергии волн цунами, не выходящих за пределы шельфа из-за эффекта полного внутреннего отражения (совместно с Г.В Шевченко и И.В.Файном).

2. Предложены модели формирования спектра естественных (фоновых) колебаний уровня океана в диапазоне волн цунами (0.5 - 30 цикл/ч) вследствие воздействия на поверхность океана случайных возмущений атмосферного давления. Показан резонансный характер механизма возбуждения поверхностных волн из-за

эффекта рассеяния и отражения их на береговой границе и на краю шельфа (совместно с Г.В.Шевченко).

3. Разработан метод «детектирования» сигнала цунами на фоне «шумовых» колебаний уровня в записях придонного гидростатического давления в открытом океане. Метод основан на статистической модели авторегрессии. Предложен способ оценки оптимального *порога* при принятии решения о «наличии сигнала цунами» в записи. Данный метод внедрен в практику оперативного прогноза в Росгидромете.

4. На примере цунами 26 декабря 2004 г. была показана принципиальная возможность регистрации волн цунами из космоса по данным спутниковых высотомеров (альтиметров).

5. Разработана модель генерации волн цунами подводными оползнями. Она основана на представлении оползня в виде потока тяжелой вязкой жидкости. С помощью этой модели был выполнен анализ цунами 3 ноября 1994 г в бухте Скагуэй и сделана оценка цунамиопасности в неустойчивых зонах донных осадков в проливе Джорджия (совместно с И.В. Файном и А.Б.Рабиновичем).

6. На основе анализа исторических данных о высотах цунами на побережье (район Перу и Чили) показана физическая обоснованность логнормального распределения при описании вероятностного распределения высот волн на побережье и сформулирован научно-методический вывод о непригодности применения понятия «средней» высоты цунами в оценке интенсивности цунами. Предложено использовать альтернативный параметр - «среднегеометрическую» высоту цунами.

7. На основе анализа записей цунами в открытом океане сделан научно-методический вывод о неприменимости приближения мелкой воды для моделей трансокеанского распространения цунами.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Представленное исследование является логически связанным циклом работ по развитию современных методов *измерения, анализа и моделирования* цунами. Практически каждый из выполняемых

этапов являлся отражением текущего состояния исследований и осуществлялся на самом современном научном уровне.

Научная новизна работы связана в первую очередь со следующими результатами:

- Разработаны аналитические и статистические модели для задачи идентификации сигнала цунами в записи колебаний уровня открытого океана на фоне естественного длинноволнового шума;
- Разработана модель генерации волн цунами, возбуждаемых подводными оползнями. Впервые тело оползня представлялось в виде потока тяжелой вязкой жидкости на произвольном рельефе дна;
- Построена физически обоснованная вероятностная модель распределения высот цунами на побережье в задаче о долгосрочном прогнозе. Предложено использовать специальные статистические параметры, инвариантные относительно числа измерений высот волн на берегу в соответствии с логнормальным законом распределения и характеризующие интенсивность цунами.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Используемые данные наблюдений отличались надежностью и высоким качеством. Точность измерений и длительность записей позволили получить статистически надежные оценки. Достоверность полученных результатов анализа данных подтверждается также аналитическими и численными моделями и сопоставлением с другими опубликованными результатами.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. Большинство результатов исследований могут быть отнесены или к проблеме *оперативного*, или *долгосрочного прогноза* цунами. Разработанные методы идентификации цунами в записях колебаний уровня уже внедрены в практику автоматизированной обработки сигналов в системе

предупреждения о волнах цунами в Росгидромете. При этом значительная часть научных выводов представляют общенаучный интерес в плане изучения физических механизмов формирования поверхностных волн типа цунами.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Всего по теме диссертации автором лично (одна) и в соавторстве опубликовано 35 статей и 2 монографии. Они отражают основные результаты диссертации. Организация, проведение и участие в натурных экспериментах по проведению исследований цунами в открытом океане выполнялись автором в составе коллектива ученых [1,3,4]. В 1978 г. он являлся научным руководителем 2-й советско-американской экспедиции по изучению цунами [1, 3]. При анализе данных наблюдений в [2-36] лично автором выполнялось статистическая обработка результатов измерений и их сравнение с модельными расчетами. Постановка задач и разработка аналитических моделей процесса формирования спектра колебаний уровня океана атмосферными возмущениями [16, 18] были сформулированы автором. В работах [9, 13] вклад был ограничен постановкой задачи. Им были разработаны научные методы автоматизированной идентификации волны цунами в записи уровня океана в системе оперативного прогноза цунами [23] и внедрены в практику новые алгоритмы и программы обработки гидрофизического сигнала [5,22]. Анализ сейсмичности и цунамиопасности на Тихоокеанском побережье Южной Америки [30, 35, 37], выполненный совместно с А.Б.Рабиновичем, включал развитую автором статистическую модель распределения высот цунами на побережья. Разработка численной модели генерации волн цунами, возбуждаемых подводными оползнями, а также анализ цунами 3 ноября 1994 г. в бухте Скагуэй и цунамиопасности в проливе Джоргия (Канада) выполнялись совместно с И.В.Файном и А.Б.Рабиновичем [27, 28, 29, 31, 32, 34]. Вклад автора в этих исследованиях состоял в постановке задачи, в

тестировании и настройке модели, а также в выполнении анализа данных наблюдений и результатов моделирования.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты работы докладывались на XIV Тихоокеанском научном конгрессе (Хабаровск, 1979), 2-м Съезде океанологов (Ялта, 1982), на конференции по межведомственному проекту "Волна" (Севастополь, 1988), на Всесоюзных симпозиумах по цунами (Владивосток, 1980; Южно-Сахалинск, 1981; Горький, 1984; Обнинск, 1988; Горький, 1990), на 1-м и 2-м Совещаниях по природным катастрофам и стихийным бедствиям (Южно-Сахалинск, 1988, 1990), на Международном симпозиуме по цунами (Новосибирск, 1989), на Международном симпозиуме по цунами (Офунато, Япония, 1981), на Генеральной ассамблее IAPSO, XVIII (Гамбург, Германия, 1983), на Международной конференции по природным и антропогенным катастрофам в береговой зоне (Сан-Диего, Калифорния, США, 1988), на рабочей группе UJNR (Гонолулу, США, 1990), на Международном симпозиуме по цунами (Вена, Австрия, 1992), на Международном симпозиуме по цунами (Вакаяма, Япония, 1993), на XXI Генеральной ассамблее «Геофизика и окружающая среда» (Болдер, Колорадо, США, 1995), на Международной конференции по цунами (Париж, Франция, 1998), на заседании Международной рабочей группы «Локальный прогноз цунами и предотвращение ущерба» (Петропавловск- Камчатский, 2004), на Ежегодном совещании AOGS (Сингапур, 2004), на семинарах отдела цунами Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (Южно-Сахалинск, 1980-1985), Государственного океанографического института (1986-2004), Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова (1996 -2004), Института океанских наук (Сидней, Канада, 1993 - 2004), Тихоокеанской морской лаборатории окружающей среды (Сиэтл, США, 1993).

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Работа состоит из введения, 4-х глав и заключения и библиографического списка, включающего 219 наименований. Работа изложена на 228 стр. машинописного текста, 67 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* сформулированы наиболее важные проблемы в изучении цунами и охарактеризовано состояние исследований. Обоснована актуальность решаемых задач и кратко изложены основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. Особенности распространения волн цунами в пограничных областях океана

Одна из главных особенностей поля длинных волн - это разделение его составляющих на *захваченные* и *излученные* в области шельфа. За счет эффекта полного внутреннего отражения на вытянутом шельфе образуются специфические слабо затухающие краевые волны, распространяющиеся вдоль берега. Выполнено исследование этого эффекта в приложении к волнам цунами, генерируемым в зоне шельфа и континентального склона. Для построения лучей область исследования была развита на треугольники. Для каждого треугольника строилось точное решение уравнения для траекторий лучей в случае мелкой воды, имеющего вид $gh(\nabla\varphi)^2 = 1$, где φ - фаза (эйконал), h - глубина, g - ускорение свободного падения.

Предложен формальный параметр - «коэффициент захвата», характеризующий долю энергии цунами, приходящуюся на захваченные волны, для точечного изотропного источника. Расчеты этого коэффициента были выполнены для сейсмоактивной зоны Курильских островов и Камчатки. Показано, что «цунамигенные зоны» в этом районе характеризуются степенью захвата от 0.3 до 0.7.

В разделе 1.2 подобная задача рассмотрена в длинноволновом приближении для модели океана с цилиндрическим дном. Использован известный подход Кадзиуры (1973) решения задачи Коши о распространении волн цунами от источника, задаваемого в виде начального отклонения уровня океана. В отличие от модели Кадзиуры задача решена в более общем виде - с учетом вращения Земли. Решение для поля волнового поля удалось представить в виде суммы захваченных краевых и шельфовых мод и интеграла по непрерывному спектру «излученных» волн Пуанкаре.

В разделе 1.3 рассматривается механизм возбуждения захваченных краевых волн вследствие рассеяния движущегося метеоприлива вдоль статистически неоднородной береговой линии. Граничное условие на берегу, было задано в приближении однократного рассеяния (Fuller, Mysak, 1977). Стохастические уравнения движения преобразовались к уравнениям для среднего уровня. Для простой модели шельфа - ступеньки удается выписать явное решение. Были рассчитаны коэффициенты рассеяния для отдельных краевых мод и показано, что максимальные амплитуды рассеянных волн наблюдаются для частот, соответствующих минимуму групповой скорости (см. рис. 1).

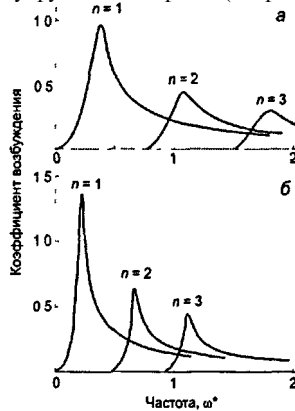


Рис. 1 Коэффициент возбуждения краевых волн: а - $h/H=0.05$; б - $h/H=0.025$

В разделе 1.4 обсуждается физический механизм формирования спектра фоновых колебаний уровня *открытого* океана. Источником таких колебаний принято считать микробарические возмущения в атмосфере. Однако, как показывает анализ динамики акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн в атмосфере, прямой (резонансный) механизм возбуждения ими поверхностных волн в океане невозможен из-за разницы в фазовых скоростях. В данной работе решается задача о генерации свободных поверхностных волн в океане, подобно тому, как это было сделано в известной модели Раттри (1969) возбуждения внутренних волн на краю шельфа баротропной волной. Рассматривается отражение вынужденной поверхностной волны, соответствующей падающей из открытого океана барической волне. Для модели рельефа в виде шельфа-ступеньки удалось получить относительно простое решение. Оказалось, что существуют длины волн, для которых возникает эффект резонансного отражения. Показано, что главным источником энергии при возбуждении колебаний «фоновых» уровня океана в диапазоне частот 0.5 - 30 цикл/ч являются внутренние гравитационные волны в атмосфере.

ГЛАВА 2. Измерение, анализ и оперативный прогноз цунами

В разделе 2.1 рассмотрена проблема регистрации цунами в открытом океане и разработки современных систем измерения (ПГД) - датчиков цунами. Обработка цифровой записи уровня с целью выделения фронта «опасной» волны включает несколько этапов - устранение инструментального тренда, фильтрация доминирующих приливных колебаний, и, наконец, поиск сигнала цунами искаженного присутствием «барических волн» шумового характера. В дополнение к аналитическим моделям (1.3-1.4) была разработана статистическая модель фонового длинноволнового шума. Модель авторегрессии «шумовых» колебаний уровня оказалась эффективной при детектировании сигнала цунами на фоне случайных помех. Настроив параметры модели на этот стабильный уровень шума, можно построить обеляющий фильтр, который на выходе дает стандартный случайный

сигнал типа белого шума с дисперсией равной 1. Вступление сигнала цунами вызывает рассогласование фильтра в ответ на появление этого «постороннего» сигнала, и значения на выходе начинают выходить за пределы стандартного среднеквадратического отклонения. Подбирая пороговое значение для такого фильтра-детектора, можно настроиться на поиск цунами определенной амплитуды (см. рис.2).

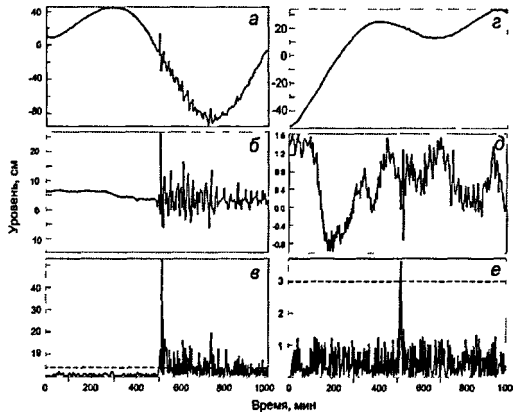


Рис. 2.. Примеры выделения опасного сигнала цунами на фоне шума, а, г - исходные записи приливом; б, д - неприливной остаток; в, е - выход AR-фильтра; штриховой линией показан порог прирешения инициализации сигнала в записи.

В работе рассмотрен вопрос о выборе оптимального порога с учетом априорной вероятности присутствия сигнала в записи (вероятность возбуждения цунами землетрясением определенной силы). Использование такого порога сводит к минимуму число ложных тревог и «пропусков» сигнала цунами в автоматизированной системе предупреждения о волнах цунами.

В разделе 2.2 представлены результаты обработки мареограмм цунами 13 и 20 октября 1963 г., возникших в результате землетрясений вблизи острова Уруп. Специальная методика спектрального анализа позволила оценить энергию волн цунами $E_{\text{ц}} \sim 2 \cdot 10^{21}$ эрг для цунами 13 октября и $E_{\text{ц}} \sim 4 \cdot 10^{20}$ эрг для цунами 20 октября. Кроме того, удалось связать форму спектра волн и характерную «длительность» цунами в источнике (7.2 и 5.4 мин для цунами 13 и 20 октября соответственно).

В разделе 2.3 Изложены результаты обработки эксперимента, выполненного в районе о. Шикотан в 1991 г. Регистрация уровня выполнялась синхронно с помощью двух датчиков ПГД внутри и вне Малокурильской бухты. Ставилась задача оценить передаточную функцию от открытого океана к берегу. Эксперимент оказался успешным - в ходе измерений удалось зарегистрировать небольшое цунами 16 февраля 1991 г, возникшее в результате землетрясения юго-восточнее о. Шиашкотан с магнитудой $M_s = 5.9$. Наиболее «чувствительным» к сигналу цунами оказался датчик, размещенный внутри бухты. Это объясняется специфической частотной характеристикой «отклика» бухты на внешний сигнал (приходящую извне волну цунами). Приход цунами вызвал внутри бухты «сейшевый шторм» с частотой фундаментальной моды Гельмгольца (около 20 мин). Анализ записей цунами 16 февраля 1991 г. вблизи о. Шикотан выполнялся методами обычного спектрального анализа, а также с помощью специально разработанной модели авторегрессии. Авторегрессионная модель колебаний в бухте связывает статистические параметры записи колебаний уровня в бухте Малокурильская (порядок и значения коэффициентов авторегрессии) и резонансные свойства акватории (периоды и коэффициенты затухания сейшевых колебаний). Впервые удалось физически обосновать случайный характер колебаний в бухте (типа «дробовой шум» - разновидность Пуассоновского случайного процесса) и определить частотно-избирательные свойства закрытого водоема. Оказалось, что Малокурильская бухта обладает уникальным свойством усиления сигнала цунами, что определяется ее специфическими резонансными свойствами. Кроме основной моды Гельмгольца (20 мин) прослеживались колебания с периодами более высоких мод 7 и 5 мин.

В разделе 2.4 представлены результаты обработки данных глубоководных измерений уровня океана (ПГВ), полученным в ходе экспедиции 1978 г. в северо-западной части Тихого океана и записи ПГД. Использовалась описанная в 2.1 методика детектирования сигналов цунами. Удалось выделить два события «микроцунами», возникших в результате землетрясений 3 августа (о. Рюкю, Япония,

($M_s = 5.0$) и 23 сентября 1978 г (о. Парамушир, $M_s = 5.5$). Показан эффект возрастания «фонового» шума в записях ПГД при прохождении тайфуна.

Изучение записей цунами 30 ноября 1987 г и марта 1988 г, вызванных землетрясениями с магнитудой $M_s = 7.6$ в заливе Аляска, продемонстрировало высокое качество измерений и выявило эффект дисперсии волнового пакета поверхностных волн (см. рис.3). Небольшой размер очагов обусловил «высокочастотный» характер спектра волн - основная энергия колебаний уровня пришлось на периоды от 2 до 10 мин. Оказалось, что на расстояниях около одной тысячи км от источника эффект линейной дисперсии таких составляющих становится уже существенным - амплитуда сигнала уменьшается, а длительность «звучания» цунами увеличивается в несколько раз. Это наблюдение приводит к важному методическому выводу - использование приближения мелкой воды, широко используемое в численных моделях цунами, не применимо для задач «трансокеанского» распространения волны. Удалось также восстановить форму сигнала в источнике.

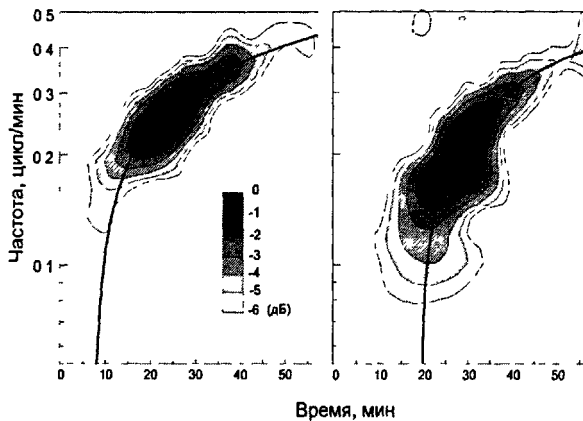


Рис.3 Диаграммы временной эволюции спектральной амплитуды (вейвлет-анализ) колебаний уровня океана для записей цунами 30 ноября 1987 г. и марта 1988 г. Изолинии проведены через 1дБ от основного максимума. Сплошной линией проведена кривая, соответствующая теоретическому времени вступления спектральных компонент $\tau(f)$, согласно закону линейной дисперсии гравитационных волн (4.2.4).

Был разработан новый метод «инверсии» сигнала цунами, основанный на законе линейной дисперсии $\omega^2 = gk \operatorname{th}(kH)$. Фурье - компоненты исходной записи преобразовывались с учетом пути пробега к виду, соответствующему начальному моменту возникновения волны. Оказалось, что измеренный «растянутый» во времени волновой пакет стягивается при этом в дельта-образную функцию. Размеры этого дельта-импульса характеризуют масштаб очага цунами. Удалось подтвердить обоснованность модели генерации цунами «поршневого типа» Окадо [Okada, 1985], расчеты по ней оказались очень близкими к этим измерениям.

В разделе 2.5 рассматривается возможность регистрации цунами из космоса.. Единичные попытки обнаружить сигнал цунами по данным спутниковой альтиметрии делались и ранее [Callahan, Daffer, 1994; Kaistrenko et al, 1997; Okal et al., 1999]. Однако результаты этих изысканий носили противоречивый характер. Кроме крупномасштабных приливных изменений уровня и барометрического отклика, в профиле уровня океана, который записывает спутниковый высотомер, содержатся возмущения, обусловленные поверхностными течениями и вихрями. Их масштаб сопоставим с характерными длинами волн цунами, и поэтому задача «детектирования» сигнала, амплитуда которого сравнима с «вихревыми» отклонениями поверхности океана (~5-10 см), довольно сложна. В ходе данной работы были проанализированы данные TOPEX/POSEIDON, начиная с 1993 г. Оказалось, что только два события (Шикотанское цунами 4 октября 1994 г и Окуширское цунами 12 июля 1993 г.) сопровождались значимыми возмущениями в окрестности фронта цунами, которые удалось выделить на записях альтиметра. В первом случае применялся полосовой фильтр, «пропускающий» колебания уровня с масштабами, типичными для цунами. Амплитуда выделенных возмущений уровня составила около 10 см. Во втором случае сигнал цунами был обнаружен по изменению спектра колебаний уровня вдоль трассы. Впервые *уверенно* удалось выделить сигнал цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане. Трасса спутника Jason-1 пересекла фронт цунами примерно через 2 часа после землетрясения. Максимальной отклонение поверхности океана составляло 80 см. Спектральный

анализ этой записи показал значимую дисперсию волн. На рис. 4 приведена спектрограмма (СВАН- анализ) сигнала цунами, полученного со спутника.

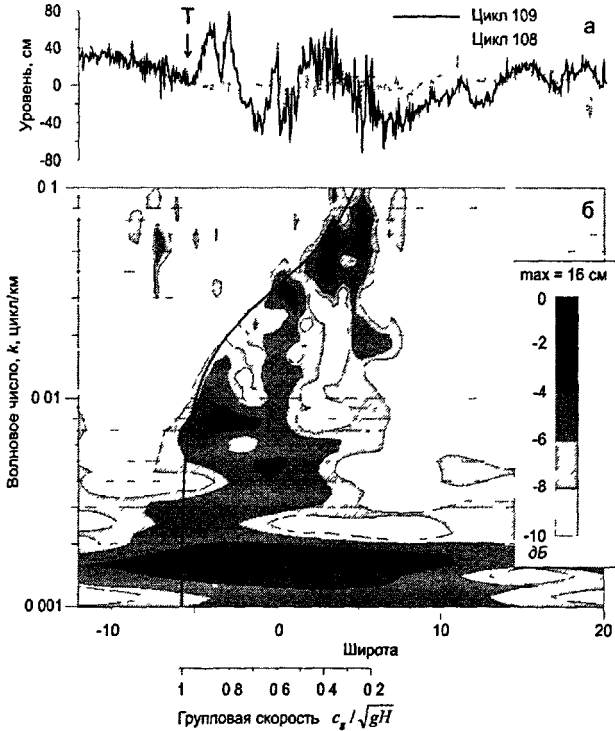


Рис 4а Профиль уровня океана в зависимости от широты, полученный по данным альтиметрии JASON-1 (109 цикл, 129 виток, 26 декабря), для сравнения тонкой штриховой линией показан тот же профиль, соответствующий 108 циклу (16 декабря); буквой Т отмечено положение фронта волны.

4б Результаты спектрально-амплитудного анализа записи цунами (СВАН-анализ), изолинии проведены через 2дБ, отсчитываемые от максимума (16см) На рисунке показана дисперсионная кривая $c_g(k)$, показывающая теоретическое «вступление» соответствующей спектральной компоненты, рассчитанное для закона линейной дисперсии поверхностных гравитационных волн. В нижней части рисунка показана шкала изменения безразмерной групповой скорости

В разделе 2.5 изложены прикладные методы и алгоритмы обработки записи уровня в реальном масштабе времени и автоматизированного прогноза цунами, разработанные на основе теоретические исследований и накопленного

опыта анализа цунами [Поплавский и др., 1988]. Формулируются принципы организации современной службы оперативного прогноза цунами в гидрофизической подсистеме. В настоящее время эти разработки успешно внедрены в системе Росгидромета.

ГЛАВА 3. Исторические базы данных по цунами и долгосрочный прогнозцунами

В разделе 3.1 обсуждается проблема долгосрочного прогноза и качества данных по цунами.

В разделе 3.2 рассматривается состояние исследований по сейсмичности и цунамиопасности побережья Перу и Чили. Показано, что данный район относится к областям высокого риска цунами. Известны три случая, когда высота волны превосходила 20 м (1586, 1746 и 1877 гг.). Показано, что в целом сейсмичность и цунамиопасность побережья Перу и северной части побережья Чили отличается относительной однородностью. Выявлены существенные расхождения в содержании баз данных NGDC и ETDB, ряда сильнейших исторических событий.

В разделе 3.3 выполнен анализ повторяемости цунамигенных землетрясений в этом районе. Для интерполяции и экстраполяции оценок зависимости повторяемости магнитуды землетрясений (M_S) использовалась модель предельного распределения Гумбеля I-го и II-го рода. Вероятность того, что магнитуда ожидаемого события окажется меньше чем M , записывается:

$$F(M) = \exp(-\alpha e^{-\beta M}) \quad \text{- предельное распределение I-го рода;}$$

$$F(M) = \exp\left[-\left(\frac{M_\infty - M}{M_\infty - \mu}\right)^k\right] \quad \text{- предельное распределение III-города,}$$

где α, β, μ, k и M_∞ - эмпирические параметры, определяемые статистически из наблюдений. Период повторяемости может быть вычислен по формуле:

$$T_e(M) = \frac{\bar{T}}{[1 - F(M)]}, \quad \text{где } \bar{T} = T_N / N - \text{период повторяемости события с}$$

минимальной магнитудой, представленной в выборке.

Рассчитано предельное значение магнитуды цунамигенного сейсмического толчка $M_\infty = 9.0$ (см. рис. 5).

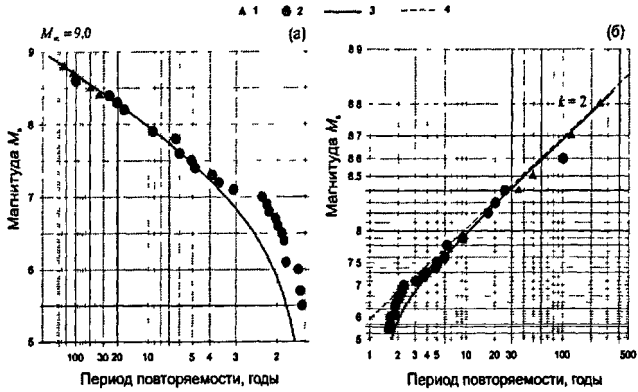


Рис. 5 Графики повторяемости цунамигенных землетрясений на побережье Перу и Чили по данным с 1513 по 2001 гг. (1) и с 1901 по 2001 гг. (2). Сплошной линией (3) показана аппроксимация, соответствующая предельному асимптотическому распределению III-го рода, штриховой линией (4) отмечена асимптота. Масштаб отображения на графике: а) - по оси абсцисс $\sqrt{1/T}$; б) - по оси абсцисс $\ln T$, по оси ординат $\ln(9.0 - M)$.

В разделе 3.4 приведены результаты расчета повторяемости высот цунами на побережье по данным ETDB. Для интерполяции и экстраполяции этих оценок была использована аппроксимация, соответствующая логнормальному распределению (рис. 6). Для периода повторяемости 200 лет значение ожидаемой высоты волны составило 25 м. При этом частота «умеренных» цунами с высотой 3 м характеризуется периодом 10 лет. Сравнение с расчетами повторяемостей по данным NGDC показало, что для больших значений периодов оценки NGDC дают существенно большие значения высот. Так, например, для периода в 100 лет высоты цунами составляют 16 и 25 м для ETDB и NGDC соответственно. Этот анализ показывает, насколько важным является вопрос об унификации современных баз данных по цунами.

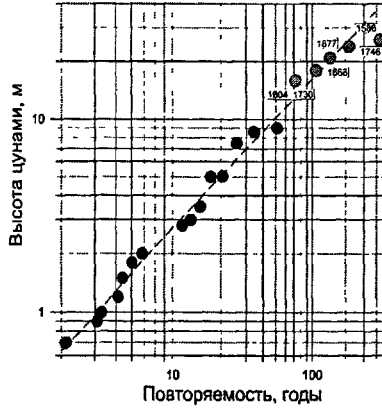


Рис.6 График повторяемости максимальных высот цунами на побережье Перу и северного Чили с 1575 по 2001 гг. Штриховой линией показана аппроксимация, соответствующая логнормальному распределению.

В разделе 3.5 выполнен расчет эмпирической связи магнитуды цунамигенного землетрясения и интенсивности цунами. В данной работе были использованы самые современные и полные данные о сейсмичности и цунами. Тем не менее, оценка оказалась близкой к известной формуле Сильгадо (1978), полученной 25 лет назад.

В разделе 3.6 представлено обоснование использования логнормального распределения вероятности для описания повторяемости высот цунами на побережье. В ряде случаев это распределение имеет вполне ясный физический смысл. Одним из типичных примеров является вероятность распределения во времени яркости звезд. Эффект мерцания объясняется случайными колебаниями плотности (коэффициента преломления) атмосферы, которые при прохождении луча формируют флуктуации яркости в соответствии с данным распределением вероятности. По аналогии с распространением света в атмосфере процесс стохастизации амплитуд волн цунами определяется «случайными» неоднородностями рельефа дна и береговой линии

$$p(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2(x/\beta)}{2\delta^2}\right), \text{ где } \chi - \text{случайная величина}$$

В работе показано, что коэффициент «рассеяния» δ в этом распределении определяется степенью

$$p(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2(x/\beta)}{2\delta^2}\right),$$

где x - случайная величина. В работе показано, что коэффициент «рассеяния» δ в этом распределении определяется степенью «гладкости» рельефа дна и береговой линии, α, β - характеризует «интенсивность» - среднегеометрическую величину высоты цунами на побережье, обусловленную сейсмо-тектонической активностью данного региона.

На основе этой модели сделано заключение о непригодности применения в статистическом описании понятия *средней* высоты цунами на побережье. В рамках логнормального распределения эта оценка среднего напрямую зависит от размера выборки, и ее математическое ожидание возрастает при увеличении числа измерений. Поэтому предложено использовать медиану β (среднегеометрическое значение) множества измерений высот цунами на побережье как статистическую меру интенсивности.

ГЛАВА 4. Численное моделирование волн цунами, возбуждаемых подводными оползнями

В разделе 4.1 представлен обзор исследований цунами, вызванных оползнями. Показана специфика изучения этого явления и указаны районы, где вероятность таких событий максимальна. Район пролива Джорджия, включая пролив Маласпина, относится к областям повышенного риска обвала осадочного материала.

В разделе 4.2 обсуждаются особенности оценки цунамиопасности оползневых цунами. Одной из важных особенностей волн, обусловленных движением массы оползневых масс по склону дна, является локальный характер их проявления. Масштаб источника обычно не превышает 10 км, что приводит к относительно «высокочастотному» спектру генерируемых возмущений поверхности. Из-за эффекта линейной дисперсии «волновой пакет» цунами, сформированный в области очага, быстро «растягивается», при этом максимальная амплитуда уменьшается с расстоянием гораздо быстрее, чем это бывает обычно для сейсмических цунами, амплитуда которых затухает вследствие геометрического расхождения. В работе

В разделе 43 изложена математическая постановка задачи о возбуждении поверхностных волн потоком вязкой тяжелой жидкости, скатывающейся по наклонному склону произвольной формы. Уравнения движения учитывают эффект «взаимовлияния» (каплинга) оползня и поверхностных волн.

Используемая здесь модель является расширенным вариантом модели Джианга и Ле Блона (1992, 1994). В ней была учтена реальная топография дна и выполнена коррекцию нескольких незначительных ошибок в уравнениях.

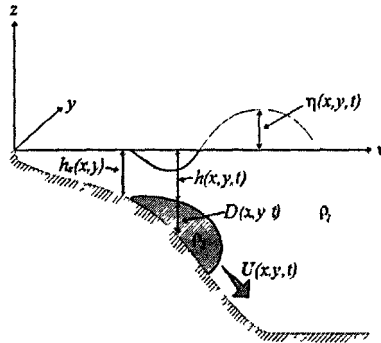


Рис. 7 Геометрия модели: система координат и обозначения. Затенённая область показывает тело вязкого оползня.

Длинноволновое (гидростатическое) приближение применяется как для воды, так и для жидкости, составляющей оползень. Это означает, что горизонтальные масштабы поверхностных волн значительно превосходят глубину бассейна, а толщина оползня намного меньше, чем его ширина и длина. Характерный временной масштаб предполагается достаточно малым, чтобы можно было пренебречь силой Кориолиса. Схематический рисунок, демонстрирующий геометрию модели, представлен на рис. 7. Была использована стандартная декартова система координат x, y, ξ , где ось ξ направлена вверх. Верхний слой воды имеет плотность ρ_1 , смещение свободной поверхности $\eta(x, y, t)$, и \mathbf{u} - вектор горизонтальной скорости с компонентами по x и y ; t - время. Нижний слой (тело оползня) имеет плотность, характерную для осадочных отложений ρ_2 , ν - кинематическая вязкость, \mathbf{U} - вектор горизонтальной скорости жидкости в нижнем слое с компонентами U, V . Предполагается, что наклон дна и наклон поверхности

оползня) имеет плотность, характерную для осадочных отложений ρ_2 , ν кинематическая вязкость, U - вектор горизонтальной скорости жидкости в нижнем слое с компонентами U и V . Предполагается, что наклон дна и наклон поверхности оползня мал, так что движение жидкости можно считать чисто горизонтальным. Тело оползня ограничено поверхностью дна $z = -h(x, y; t)$, а верхняя поверхность задается толщиной $D(x, y; t) = h_2(x, y) - h(x, y; t)$

Основные предположения о свойствах оползня принимаются в виде:

1) Оползень состоит из несжимаемой изотропно вязкой жидкости, при этом морская вода рассматривается как несжимаемая жидкость с нулевой вязкостью.

2) Разность между плотностью оползня и плотностью воды должна быть достаточно велика $(\rho_2 - \rho_1) \geq 0.2 \text{ г/см}^3$.

3) Поток вязкой жидкости представляет собой ламинарное, квазистационарное течение. Для описания движения вязкой жидкости по наклонному дну, вообще говоря, необходимо рассматривать два режима - инерционный и вязкий (квазистационарный). После внезапного освобождения тела оползня (из начального состояния) течение жидкости, составляющей оползень, переходит из состояния инерционного режима в вязкий, когда вертикальный профиль течения уже установился. В данной модели мы предполагаем, что это время перехода пренебрежимо мало и поток постоянно находится в состоянии квазистационарного режима, относительно медленно приспосабливаясь в процессе движения к форме рельефадна.

4) В данной модели мы пренебрегаем эффектом смешения на границе оползень-вода. Это означает, что масс-обмен между потоком осадочного материала и водой не происходит.

Движение жидкости (морской воды) описываются уравнениями для идеальной несжимаемой жидкости в приближении мелкой воды. На открытой границе предполагается выполнение условия излучения - рассматриваются только «уходящие» волны. Условие «непротекания» через твердую границу, задаваемой в виде стенки, может быть расширено для задачи субэдрального оползня (частично

применяется разностный ступенчатый метод с перешагиванием (staggered leap-frog scheme) в пространстве и времени [Imamura, 1996].

Для подавления неустойчивости численной схемы использовалась аппроксимация адвективных членов в уравнениях движения по схеме с разностями против потока (upstream) [Roache, 1976]. При этом, чтобы избежать генерации паразитных колебаний малого масштаба (сеточного шума) шаг по времени (Δt) выбирался равным $1/3$ от величины, задаваемой условием Куранта. В начальный момент $t = 0$, когда оползень находится в состоянии покоя, скорости и смещение свободной поверхности полагаются равными нулю.

В разделе 4.4 изложены результаты исследования цунами 3 ноября 1994 г. в бухте Скагуэй (Аляска, США). Приблизительно в 19 ч 12 мин по местному времени (4 ч 12 мин GMT) 3 ноября 1994 г. произошло обрушение части строящегося причала (около 250 м) и возник подводный оползень в бухте Скагуэй, расположенной в южной части Аляски (см. рис. 4.4.1). Этот оползень вызвал серию волн большой амплитуды высотой около 5-6 м в акватории и 9-11 м на берегу [Kulikov et al., 1996]. Мареограф аналогового типа на западной части бухты (напротив места обрушения причала) зарегистрировал колебания уровня с периодом около 3 мин и размахом примерно 2 м. Возникшие волны смыли около 300 м железнодорожного полотна и разрушили оставшуюся часть строящегося причала. Погиб один человек. Общий ущерб был оценен в 21 миллион долларов.

На основе геоморфологических и батиметрических исследований, была определена зона схода осадочных масс на береговом склоне. Общий объем оползня составил около 0.8 миллионов м³. На рис. 8 приведены результаты батиметрической съемки в бухте Скагуэй. Параметры модели выбирались в соответствии с данными [Comforth, Lowell, 1996]. Плотность тела оползня принималась равной 2.0 г/см³, вязкость материала 0.05 м²с⁻¹. Расчет выполнялся на сетке, покрывающей бухту Скагуэй 260x 160 с шагом $\Delta x = \Delta y = 5$ м и шагом по времени $\Delta t = 0.0167$ с.

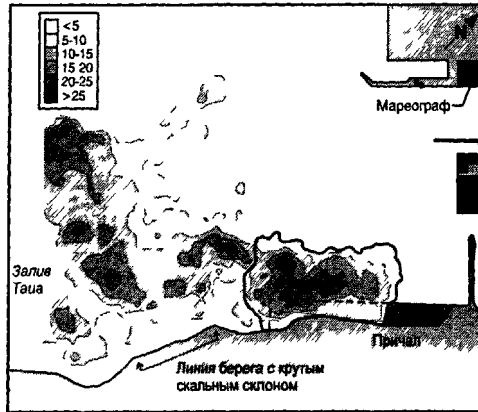


Рис 8 Изменение глубины моря (м) в области обрушения причала и прилегающей части дна бухты Скагуэй. Основная часть области обрушения оползня выделена толстой линией. Именно эта часть была использована при численном моделировании.

На рис. 9 показаны несколько фаз погружения оползня (0 - 22 с). Разрез по нормали к берегу сделан примерно через центральную часть тела оползня. Хорошо видно, что погружение оползня сопровождается деформацией его формы. Процесс «стекания» вязкой жидкости по склону приводит к утолщению нижней части потока.

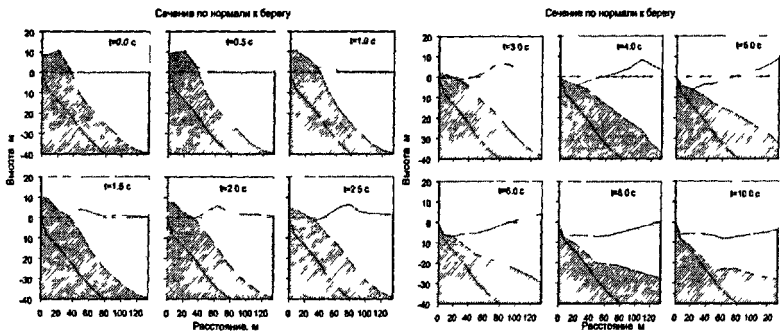


Рис 9 Разрез по нормали к берегу, иллюстрирующий погружение субэкрального оползня в воду для $t = 0-10$ с

Сопоставление с данными геоморфологии, сейсмопрофилирования и батиметрии показало хорошее согласие с рассчитанной траекторией движения

Сопоставление с данными геоморфологии, сейсмопрофилирования и батиметрии показало хорошее согласие с рассчитанной траекторией движения оползня. А результаты расчета волн цунами подтверждались анализом записи берегового регистратора уровня и свидетельствами очевидцев.

Эта модель была использована для исследования цунамиопасности в районах высокой вероятности подводных оползней (пролив Маласпина, Канада). На рис.9-10 приведены результаты геоморфологического исследования в проливе Маласпина вблизи о. Тексада. Была выделена неустойчивая зона осадочного слоя с высокой вероятности схода подводного оползня. Были выполнены расчеты такого гипотетического события и оценены амплитуды волн цунами, возбуждаемые таким оползнем.

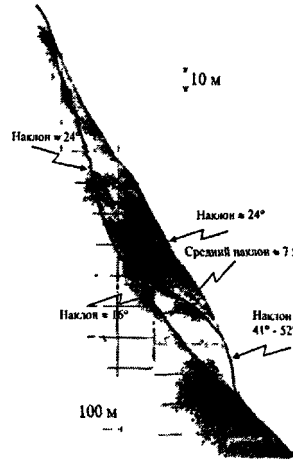
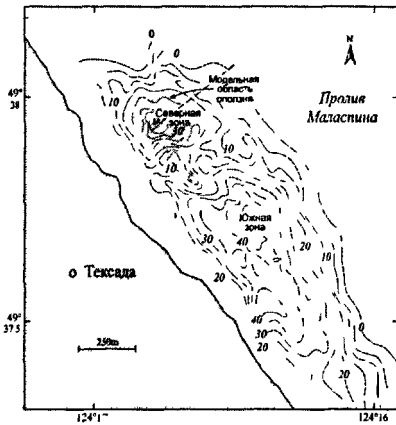


Рис10 Карта, показывающая распределение поверхностных осадков и профилирование с высоким их разрешением, выполненного для участка восточнее о. Тексада. Изолинии даны, восточнее о. Тексада через северный проведенены через 5м. Штриховой линией участок осадочного чехла отмечен сейсмический профиль.

Дополнительно была разработана методика оценки чувствительности модели к изменению параметров оползня (положение, плотности и вязкости). Оказалось, что наибольшее влияние оказывает изменение его положения. При смещении центра оползня в сторону глубоководья амплитуда волны цунами уменьшается на 70%.

Вторым районом вероятного возникновения оползневого цунами в проливе Джорджия оказалась зона дельты реки Фрезер. Вынос речных взвесей и их отложение в дельте приводит к образованию обширных неустойчивых областей осадков на кругом склоне.

В заключение главы 4 обсуждаются ограничения использованной модели. Выполнена оценка ошибки при использовании длинноволнового приближения для больших уклонов дна. Показано, что, например, для $\theta = 16^\circ$ (уклоноу. Тексада) $f = 0.92$, а для, $\theta = 23^\circ$ (кромка дельты реки Фрезер) $f = 0.85$. Таким образом, возможная ошибка достигает 8% в первом случае и 15% во втором. Учитывая неопределенность в задании физико-механических параметров осадочных масс, такие ошибки не представляются значительными. Как показано в тестах чувствительности модели к изменению ее параметров (4.5.3 и 4.6.2), ошибка в задании плотности материала оползня может привести к существенно большим отклонениям амплитуды волн цунами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Разработан метод оценки степени захвата шельфом энергии цунами, возбуждаемого в пределах шельфа и континентального склона. Введен формальный параметр - «коэффициент захвата» для точечного изотропного источника, определяющий долю энергии волн цунами, не выходящих за пределы шельфа из-за эффекта полного внутреннего отражения (совместно с Г.В.Шевченко и И.В. Файном).
2. Предложены модели формирования спектра естественных (фоновых) колебаний уровня океана в диапазоне волн цунами (0.5 - 30 цикл/ч) вследствие воздействия на поверхность океана случайных возмущений атмосферного давления. Показан

резонансный характер механизма возбуждения поверхностных волн из-за эффекта рассеяния и отражения их на береговой границе и на краю шельфа (совместно с Г.В.Шевченко).

3. Разработан метод детектирования сигнала цунами на фоне «шумовых» колебаний уровня в записях придонного гидростатического давления в открытом океане. Метод основан на статистической модели авторегрессии. Предложен способ оценки оптимального *порога* при принятии решения о «наличии сигнала цунами» в записи. Данный метод внедрен в практику оперативного прогноза в Росгидромете.
4. На примере цунами 26 декабря 2004 г. была показана принципиальная возможность регистрации волн цунами из космоса по данным спутниковых высотомеров (альтиметров).
5. Разработана модель генерации волн цунами подводными оползнями. Она основана на представлении оползня в виде потока тяжелой вязкой жидкости. С помощью этой модели был выполнен анализ цунами 3 ноября 1994 г. в бухте Скагуэй и сделана оценка цунамиопасности в неустойчивых зонах донных осадков в проливе Джорджия (совместно с И.В. Файлом и А.Б.Рабиновичем).
6. На основе анализа исторических данных о высотах цунами на побережье (район Перу и Чили) показана физическая обоснованность логнормального распределения при описании вероятностного распределения высот волн на побережье и сформулирован научно-методический вывод о непригодности применения понятия «средней» высоты цунами в оценке интенсивности цунами. Предложено использовать альтернативный параметр - «среднегеометрическую» высоту цунами.
7. На основе анализа записей цунами в открытом океане сделан научно-методический вывод о неприменимости приближения мелкой воды для моделей трансокеанского распространения цунами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Куликов Е А**, Павленко В.Г., Латаю С.С., Рабинович А.Б. Вторая советско-американская экспедиция по изучению цунами в открытом океане. Океанология, 1979, том 19, N2, 357-359
2. Багрянцев В.И., **Куликов ЕА**, Пул СЛ., Спильфогель Л., Рабинович А.Б., Тюрин Ю.В. Изменение длинных волн в открытом океане (опыт обработки) В сб.: "Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана". Владивосток, 1980, 11-27
3. **Куликов ЕА**, Рабинович АУ., Лаппо С.С., Павленко ВТ., Рабинович А.Б., Пул СЛ. Организация и проведение Второй сов.-амер. экспедиции по изучению цунами в открытом океане. В сб.: "Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана". Владивосток, 1980
4. Дыхан БД, Жак В.М., **Куликов ЕА**, Лаппо С.С., Митрофанов В.Н., Поплавский А.А., Родионов А.В., Соловьев СЛ., Шишкин А.А. Первая регистрация цунами в открытом океане (цунами 23 февраля 1980г. у Южных Курильских островов). ДАН СССР, 1981, том 257, N5, с. 1088-1092
5. **Куликов ЕА**, Рабинович А.Б. Методические принципы организации гидрофизических наблюдений на ЕАС Цунами. В сб.: "Вопросы долгосрочного и оперативного прогноза цунами", Южно-Сахалинск, 1981, с.98-99
6. **Куликов ЕА**, Рабинович А.Б., Файн И.В. Исследование длинных волн в пограничной области океана и проблема цунами. В сб.: "Вопросы долгосрочного и оперативного прогноза цунами", Южно-Сахалинск, 1981, с.29-31
7. **Куликов ЕА**, Соловьев СЛ. Спектрально-временной анализ береговых мареограмм цунами. В сб.: "Вопросы долгосрочного и оперативного прогноза цунами", Южно-Сахалинск, 1981, с.52-53

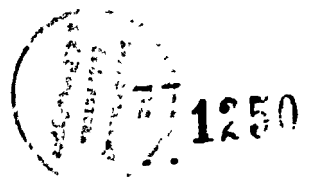
8. **Куликов ЕА.**, Джумагалиев В.А., Дыхан Б.Д., Митрофанов В.Н. Анализ естественного длинно - волнового поля по экспериментальным данным. В сб.: "Вопросы долгосрочного и оперативного прогноза цунами", Южно-Сахалинск, 1981, с.51 -52
9. Файн И.В., Шевченко Г.В., **Куликов ЕА.** Исследование лучевым методом особенностей распространения волн цунами на шельфе Курильской гряды. В сб.: "Вопросы долгосрочного и оперативного прогноза цунами", Южно-Сахалинск, 1981, с.43-44
10. **Куликов Е А**, Рабинович АР: 1983, Радиационные приливы в океане и атмосфере.Дога.*АН СССР*, т. 271, №5, с. 1226-1230.
11. Dykhan B.D., Zhak V.M., **Kulikov E A.**, Lappo S.S., Mitrofanov V.N., Poplavski A.A., Rodionov A.V., Soloviev S.L., Shishkin A.A. Registration on of tsunamis in the open ocean. *Marine Geodesy*, 1983, n.3-4, v.6, p.303-309
12. **Kulikov EA**, Spirin A.I., Rabinovich A.B., Poole S.L., Soloviev S.L. Measurement of tsunamis in the open ocean. *Marine Geodesy*, 1983, v.6, n.3-4, p.311-329
13. Файн И.В., Шевченко Г.В., **Куликов ЕА** Исследование лучевым методом эффекта захвата волн цунами Курильским шельфом. *Океанология*, 1983, вып.1, т.23, с.23-26
14. **Куликов ЕА**, Соловьев СЛ., Пул СЛ, Рабинович А.Б., Спирин А.И. Сопоставление сейсмичности и вариаций уровня океана в Западной части Тихого океана. В сб.: *Динамика длиннопериодных волн в океане и исследование цунами. Труды ДВРНИИ, Л., Гидрометеиздат*, 1984, с.25-35
15. **Куликов Е А**, Пул С Л., Рабинович А.Б., Спильфогель Л., Тюрин Ю.В., Харви Р.Р. Основные результаты регистрации уровня в Северо-Западной части Тихого океана. В сб.: *Динамика длиннопериодных волн в океане и исследование цунами. Труды ДВРНИИ, Л., Гидрометеиздат*, 1984, с.35-54

16. **Куликов Е А**, Шевченко Г.В. Генерация длинных волн флуктуациями атмосферного давления в полуограниченном океане. В сб.: "Нестационарные длинно волновые процессы на шельфе Курильских островов", ИМГиГДВН АН СССР, Владивосток, 1984, с. 15-18
17. **Куликов Е А.**, Джумагалиев В.А., Митрофанов В.Н. Кабельные измерения волн цунами в океане. В сб.: Нестационарные длинно волновые процессы на шельфе Курильских островов", ИМГиГ ДВН ЦАН СССР, Владивосток, 1984, с. 69-73
18. Шевченко **Г.В.**, **Куликов Е А** Возбуждение краевых волн при взаимодействии движущегося метеоприлива со статистически неоднородной границей. В сб.: "Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов". ИМГиГ ДВНЦ АН СССР Владивосток, 1985, с.20-27
19. Ефимов **В.В.**, **Куликов ЕА**, Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Гидрометеиздат, Л., 1985, 280 с.
20. Соловьев СЛ. **Куликов ЕА** О восстановлении параметров очага цунами из спектральных характеристик волн у берега. Изв. АН СССР, сер. ФАО, 1987, том 23, N1, с.91-98
21. Soloviev S.L., **Kulikov EA** Spectral analysis of mareogramms from Urup tsunamis of 13 and 20 October 1963. Science of Tsunami Hazards 1987, vol.5, N1, p.57-63
22. Поплавский А.А., **Куликов ЕА**, Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. Наука, М., 1988, 128 с.
23. **Куликов ЕА** Измерение уровня океана и прогноз цунами, Метеорология и гидрология, N6, 1990, с. 61-68
24. Джумагалиев В.А., **Куликов ЕА**, Соловьев СЛ. Анализ колебаний уровня в Малокурильской бухте, вызванных цунами 16 февраля 1991 г. Изв. РАН сер. ФАО, 1993, т.29, N6, с. 848-854
25. Gonzalez F.I., **Kulikov EA** Tsunami dispersion observed in the deep ocean. In: Tsunamis in the World, Dordrecht, Kluwer Publ. House, 1993, 7-16.

26. **Куликов** ЕА Гонзалес Ф. Восстановление формы сигнала цунами в источнике по измерениям колебаний гидростатического давления удаленным донным датчиком. ДАН, т.344, N6,1995, с.814-818
27. **Kulikov** E.A., Rabinovich, A.B. Thomson, R.E. Bornhold B. The landslide tsunami of November 3,1994, Skagway Harbour, Alaska. J. Geophys. Res., 1996, voL101, No.C3,p.6609-6615
28. Куликов Е.А., Рабинович А.Р., Файн И.В., Борнхольд Б.Д., Томсон Р.Е. Генерация цунами оползнями на тихоокеанском побережье Северной Америки и роль приливов в этом процессе. Океанология, 1998, т.38, N1, с.361-367
29. Rabinovich A.B., Thomson R.E., **Kulikov** E.A. Bornhold B.D., Fine I.V. The landslide-generated tsunami of November 3, 1994 in Skagway Harbor, Alaska: A case study. Geophys. Res. Lett., 1999, vol.26, No. 19, p.3009-3012
30. Rabinovich, A.B., **Kulikov** E.A., Thomson R.E. Tsunami risk estimation for the coasts of Peru and northern Chile. ITS 2001 Proceedings, CD, 2001, Sess.1, No. **1-5, p.281-291**
31. Thomson, R.E., Rabinovich A.B., **Kulikov** E.A., Fine I.V., Bornhold B.D. On numerical simulation of the landslide-generated tsunami of November 3, 1994 in Skagway Harbor, Alaska. In: Tsunami Research at the End of a Critical Decade, (edited by G. Hebenstreit). 2001, Kluwer, Dorderecht, p.243-282
32. Rabinovich A.B., Thomson R.E., Bornhold B.D., Fine I.V., **Kulikov** E.A. Numerical modeling of tsunamis generated by hypothetical landslides in the Strait of Georgia, British Columbia. Pure Appl. Geophys. 2003, 160 p. 1273-1313
33. Зайченко М.Ю., Куликов Е.А., Левин Б.В., Медведев П.П. Примеры регистрации цунами в открытом океане в 1993-2001 гг. по данным спутникового альтиметра. Препринт, Институт океанологии РАН, М.: Янус-К, 2004,30 с.

34. Fine I.V., Rabinovich A.B., Thomson R.E., Bornhold B.D., **Kulikov E.A.** The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929, preliminary analysis and numerical study. *Marine Geology*. 2005, V. 215, p. 45-57
35. **Kulikov E.A.**, Rabinovich A.B., Thomson R.E. Estimation of Tsunami Risk for the Coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards*, 2004, vol. , No. , p.
36. Зайченко М.Ю, **Куликов ЕЛ.**, Левин Б.В., Медведев П.П. О возможности регистрации цунами в открытом океане по данным спутникового альтиметра, *Океанология*, 2005, т.45, №2, с. 222-229.
37. Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Томсон Р.Е. К вопросу о долгосрочном прогнозе цунами (на примере побережья Перу и Чили). *Океанология*, 2005, т. , с.
38. **Куликов Е А**, Медведев П.П., Лаптю С.С. Регистрация из космоса цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, *ДАН*, т. 401, № 4, с.

25.00



19 МАЯ 2005