

*На правах рукописи*



**КАЙСТРЕНКО Виктор Михайлович**

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПОВТОРЯЕМОСТИ ЦУНАМИ  
И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ**

Специальность: 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Южно-Сахалинск - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН).

Официальные оппоненты: Доценко Сергей Филиппович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь, главный научный сотрудник.

Талипова Татьяна Георгиевна, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, ведущий научный сотрудник.

Марчук Андрей Гурьевич, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 06.10.2016 г. в 10-00 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при ФГБУН Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), ФГБУН Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), ФГБУН Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б) и на сайте [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте [www.imgg.ru](http://www.imgg.ru).

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д999.004.03

кандидат физико-математических наук



М.Ю.Андреева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Все Дальневосточное побережье России, как Тихоокеанское, так и окраинных морей (Японского, Охотского и Берингова), неоднократно подвергалось воздействию цунами. Самые сильные цунами сопровождались разрушениями и жертвами. Намного реже цунами проявлялись на побережьях Черного и Каспийского морей. В последние годы найдены свидетельства о проявлениях цунами на побережье Северного Ледовитого океана и Балтийского моря. Данные о цунами собраны в каталоги, имеются их электронные версии, доступные в сети интернет.

Так же, как в сейсмологии, одним из важнейших объектов изучения является функция повторяемости высот цунами. Аналитическая форма этой функции неизвестна, и серьезной проблемой является построение ее адекватной аналитической аппроксимации. Другая проблема связана с редкостью опасных цунами, поэтому недостаточность информации о цунами в целом и о самых сильных событиях в частности не всегда позволяет напрямую использовать стандартные статистические методы.

**Актуальность проблемы** вызвана необходимостью построения физически обоснованных вероятностных моделей проявлений цунами на побережье, которые согласуются с имеющимися натурными данными, выделения параметров, определяющих характер цунамиактивности и, соответственно, цунамиопасности, а также создания на этой основе карт цунамирайонирования.

**Цель работы** – построение и физико-математическое обоснование вероятностной модели повторяемости цунами в целом и разработка на ее основе количественных методов оценки цунамиопасности для ряда участков Дальневосточного побережья России.

### **Задачи исследования:**

1. Сбор данных о проявлениях цунами на побережьях различного типа. Анализ пространственно-временных распределений заплесков исторических цунами на Дальневосточном побережье России.
2. Разработка физически обоснованного и статистически корректного метода построения функции повторяемости высот цунами (ФПЦ) на базе натуральных данных об исторических цунами, и в виде примеров – с применением данных о палеоцунами. Выявление параметров этой функции и их физическая интерпретация. Обоснование асимптотики ФПЦ для малых и умеренных, а также для больших и катастрофических значений высот цунами.
3. Создание асимптотического метода для продолжения волнового поля цунами с искусственной «стенки» на шельфе, стандартно применяемой в линейных численных моделях цунами, до берега.
4. Анализ нелинейной трансформации волн цунами на мелководье и наката на берег. Выявление и анализ параметров, определяющих характер наката на берег.
5. Построение карт цунамиопасности для ряда участков Дальневосточного побережья России.

### **Методы исследования**

В данном исследовании использовался комплекс методов.

Известные методы статистики существенно использовались для получения оценок физических параметров, характеризующих цунами-режим в изучаемом регионе. Теоретически исследовались уравнения, описывающие одномерный накат волн на берег. Большую роль играли экспедиционные работы по сбору данных о современных цунами и палеособытиях, а также архивный поиск материалов об исторических цунами.

В процессе исследования была разработана оригинальная методика построения региональной функции повторяемости цунами.

### Научная новизна работы

Разработана оригинальная вероятностная модель повторяемости цунами Пуассоновского типа, для которой теоретически обоснована структура функции повторяемости цунами и выявлен физический смысл ее параметров: региональный параметр – асимптотическая частота сильных цунами  $f_s$ , и локальный параметр – характеристическая высота цунами  $H^*$ , пропорциональная среднему коэффициенту трансформации высоты цунами при ее распространении из океана к берегу. Предложен корректный метод вычисления оценок этих параметров на базе данных об исторических цунами и палеособытиях.

Впервые выявлена связь двух типов распределений высот цунами: функции повторяемости высот цунами (распределение в точке для разных цунами в течение длительного периода) и вдольберегового распределения высот каждого конкретного цунами. Показано, что вследствие этой связи асимптотика функции повторяемости для слабых и умеренных высот цунами является степенной.

Решена задача коррекции волнового поля цунами, полученного в типичной численной модели с искусственной «стенкой». Полученное аналитическое асимптотическое решение позволяет «продолжить» волновое поле цунами до берега (эмуляция плоского наката).

При анализе нелинейных уравнений, описывающих одномерный накат волны на плоский откос, впервые показано, что характер трансформации цунами при накате на берег определяется единственным безразмерным параметром  $Br = H\omega^2/g\alpha^2$ , где  $H$  и  $T$  – характерные высота и период волны, где  $\omega = 2\pi/T$  – частота,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – уклон дна. В результате анализа получены приближенные формулы для экстремальных значений высот цунами и скоростей течения в близурезной зоне, в зависимости от значений параметра наката  $Br$ , для случая наката волны без разрушения ( $Br < 1$ ), которые, кроме теоретического интереса, могут быть

использованы при расчете гидротехнических и берегозащитных сооружений в цунамиопасных зонах.

На базе физически обоснованной вероятностной модели построены карты цунамирайонирования для ряда участков Дальневосточного побережья России.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Функция повторяемости высот цунами характеризуется двумя параметрами, один из которых  $f$  – региональный и имеет физический смысл асимптотической частоты сильных цунами в регионе, второй параметр  $H^*$  является локальным и  $\propto H^*$  пропорционален среднему коэффициенту трансформации высоты волны цунами при ее распространении из открытого океана к берегу. Корректные оценки этих параметров получены с помощью созданного автором метода на базе данных об исторических цунами и палеособытиях.

2. Формирование функции повторяемости высот цунами в конкретной точке побережья региона и вдольберегового распределения высот каждого конкретного цунами в этом регионе обусловлены одним и тем же процессом – распространением волн цунами в шельфовой и близбереговой акватории с нерегулярной батиметрией. Как следствие, эти функции связаны интегральным соотношением, а именно – функция повторяемости является собственной функцией интегрального оператора, ядро которого – функция, описывающая вдольбереговое распределение высот цунами, с модифицированными коэффициентами.

3. Аналитическое преобразование, полученное автором, эмулирует распространение цунами до берега от искусственной стенки на шельфе, стандартно применяемой в линейных численных моделях цунами.

4. Характер трансформации цунами при накате на берег определяется единственным безразмерным параметром  $Bv = H\omega^2/g\alpha^2$ , где  $H$  и  $T$  –

характерные высота и период волны,  $\omega=2\pi/T$  – частота,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – уклон дна. Экстремальные значения высот цунами и скоростей течения в близурезной зоне даются приближенными формулами, в зависимости от значений параметра  $Br < 1$  (накат волны без разрушения).

5. Карты цунамирайонирования, созданные на базе вероятностной модели последовательности исторических цунами, с применением численного моделирования всех самых значимых цунами в регионе (доведенных до берега методом эмуляции плоского наката), адекватно отражают вдольбереговое распределение высот цунами редкой повторяемости и могут быть использованы для безопасного проектирования объектов в прибрежных районах Дальневосточного региона.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается корректной постановкой задач, воспроизводимостью итоговых формул и оценок, согласованностью теоретических и численных результатов с результатами статистической обработки натуральных данных.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретически обоснована структура функции повторяемости цунами и выявлен физический смысл ее параметров, а также разработан корректный метод вычисления оценок этих параметров на базе данных об исторических цунами и палеособытиях.

Решена задача коррекции волнового поля цунами, полученного в типичной численной модели с искусственной стенкой. Полученное аналитическое асимптотическое решение позволяет «продолжить» волновое поле цунами до берега (эмуляция плоского наката).

Проанализированы нелинейные уравнения, описывающие одномерный накат волны на плоский откос, и показано, что характер трансформации цунами при накате на берег определяется единственным безразмерным параметром  $Br$ .

Кроме теоретического, исследование имеет также выраженный прикладной аспект – построение карт цунамиопасности с физически понятными и вычислимыми параметрами: асимптотической частотой сильных цунами  $f$ , характеристической высотой цунами  $H^*$  и высотой цунами  $h_{100}$  с повторяемостью раз в 100 лет.

Результаты исследований, представленных в диссертации, в последние годы были использованы в ряде проектов:

- «Уточненная оценка опасности волн цунами для урбанизированной территории восточного побережья Камчатки» в рамках Федеральной целевой комплексной программы 057 «Сейсмозащита», 2000 год.

- «Оценка риска цунами морской береговой зоны. Составление карты риска цунами береговой зоны Сахалинской области в масштабе 1:200 000», выполненной по заказу Министерства строительства Сахалинской области в 2006 году.

- «Создание карты цунамиопасности Сахалинского побережья Татарского пролива в масштабе 1:200 000», выполненной по заказу Министерства строительства Сахалинской области в 2008 году.

Результаты использовались также в отчетах по интеграционному проекту ДВО – СО РАН № 12-II-0-08-003 «Фундаментальные проблемы совершенствования оперативного прогноза цунами и создания карты цунамирайонирования Дальневосточного побережья РФ».

Приближенные формулы для экстремальных значений высот цунами и скоростей течения в близурезной зоне, в зависимости от значений параметра наката волны без разрушения ( $Br < 1$ ), полученные в разделе 4.2, могут быть использованы при расчете гидротехнических и берегозащитных сооружений в цунамиопасных зонах.

### **Апробация работы**



Результаты автора докладывались на региональных и всероссийских конференциях, а также на международных симпозиумах по проблеме цунами:

- IUGG / IOC International Tsunami Symposium, Wakayama, Japan, 1993
- International Tsunami Measurements Workshop, Estes Park, Colorado, USA, 1995
- General Assembly of the IUGG, Boulder, Colorado, USA, 1995
- 17th International *Tsunami Symposium*, Melbourne, Australia, 1997
- Okushiri Tsunami / UJNR Workshop, Sapporo – Okushiri, Japan, 1998
- General Assembly of the IUGG, Birmingham, G.Britain, 1999
- “TSUNAMI WARNING Beyond 2000: Theory, Practice and Plans”, Seoul, Korea, 1999
- Submarine Landslides and Tsunamis, Istanbul, Turkey, 2001
- General Assembly of the IUGG, Sapporo, Japan, 2003
- 22nd International Tsunami Symposium, Crete, Greece, 2005
- General Assembly of the EGU, Vienna, Austria, 2008
- Asia-Oceania Geoscience Society, 5th Annual General Meeting, Pusan, Korea, 2008
- 31st General Assembly of the European Seismological Commission, Crete, Greece, 2008
- Earthquake & Tsunami, WCEE-ECCE-TCCE Joint Conference, Istanbul, Turkey, 2009
- International Tsunami Symposium, Novosibirsk, Russia, 2009
- General Assembly of the EGU, Vienna, Austria, 2010
- 5th Tsunami Symposium, Ispra, Italy, 2012
- International Tsunami Symposium 2013, Gocek, Turkey, 2013
- 8<sup>th</sup> Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 22-26 September 2014

### **Публикации**

По теме опубликовано 38 работ, в том числе 21 – в реферируемых журналах из списка ВАК РФ, 6 – в сборниках докладов международных конференций, 2 статьи в продолжающемся издании *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 9 – прочие.

### **Личный вклад автора**

Автором проведены теоретическое обоснование структуры функции повторяемости цунами, выявление физического смысла ее параметров, обоснование характера асимптотики для малых и больших значений высот цунами, а также разработка корректного метода вычисления оценок этих параметров.

Главная роль в совместных исследованиях палеоцунами и в подготовке статей по этой тематике принадлежит коллегам – специалистам в области геологии и географии, в первую очередь д.г.н. Н.Г. Разжигасовой (ТИГ ДВО РАН), к.г.н. Л.А. Ганзей (ТИГ ДВО РАН), к.г.-м.н. А.Я. Ильеву (ИМГиГ ДВО РАН), д.г.-м.н. Т.К. Пинегиной (ИВиС ДВО РАН). В течение нескольких полевых сезонов автор был неперенным участником таких работ на Южных и Северных Курильских островах, Сахалине и в Приморье. Полученные результаты обсуждались совместно. Метод статистического учета данных палеоцунами для построения функция повторяемости высот цунами разработан автором.

Полученное автором аналитическое представление, дающее асимптотическую коррекцию волнового поля цунами на искусственную «стенку» (эмуляция плоского наката, раздел 4.1), использовалось при построении карт цунамирайонирования (глава 5), а также по инициативе проф. Б.Х. Чоя из Республики Корея использовалось для численного моделирования ряда исторических цунами.

Анализ нелинейной трансформации волн цунами на мелководье и наката на берег (раздел 4.2) проведен совместно с д.ф.-м.н. Е.Н. Пелиновским (ИПФ АН) и д.ф.-м.н. К.В. Симоновым (ИВМ СО РАН).

Создание карт цунамирайонирования проводилось коллективом исследователей под руководством автора и на основе разработок автора, связанных с функцией повторяемости высот цунами и вероятностной моделью цунами-режима.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 80 иллюстраций и 10 таблиц. Список цитированной литературы насчитывает 210 источников. Общий объем диссертации – 191 страница.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обсуждаются актуальность работы, ее научная новизна и практическая значимость, обосновывается постановка решаемой научной проблемы, ставятся цели и задачи работы и формулируются положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведено краткое описание проявлений цунами на побережье России и критически проанализирован исторический опыт развития методов количественной оценки цунамиопасности побережий и создания карт цунамирайонирования, что позволило сформировать собственный подход к этой проблеме.

**Глава 2** – основная в диссертации и посвящена структуре функции повторяемости высот цунами и методам ее построения на основе данных о заплесках исторических событий, собранных в каталогах цунами.

В **разделе 2.1** подробно обсуждаются характеристики используемого материала. Показано, что требования однородности материала по высотам цунами соблюсти полностью не удастся, и это относится в первую очередь к старым событиям. Несмотря на то, что данные каталогов собирались из различных, достаточно разнородных источников, сделан вывод, что для построения функций повторяемости высот цунами можно использовать данные о заплесках цунами, измеренные по различного типа следам (рисунок ниже), оставляемым цунами на побережье, и высоты цунами порядка 1 м, полученные из мареограмм, как почти однородный материал.



Рисунок 1 – Завал плавучего материала в 170 м от океанского побережья бухты Осьма на высоте 4,4 м над уровнем океана, образованный цунами 15 октября 2006 года в долине ручья на безлесом юге острова Уруп. Фото автора.

**Раздел 2.2** является вводным, в нем приведено определение функции повторяемости высот цунами и рассмотрены ее основные свойства, обоснованию которых посвящены остальные разделы этой главы.

Функция повторяемости цунами (ФПЦ) – важнейшая характеристика цунамиактивности, и знание этой функции позволяет количественно оценивать цунамиопасность. В соответствии с определением, ФПЦ – это средняя частота событий в заданном месте  $x$  с высотой, равной или превышающей значение  $h$

$$\varphi(h) \stackrel{\text{def}}{=} \left\langle \frac{N(\text{заплеск} \geq h)}{T} \right\rangle, \quad (1)$$

где  $N$  есть число таких событий, произошедших за период времени  $T$ .

Эта функция по построению положительная и невозрастающая. Аналитическая форма функции повторяемости цунами неизвестна, и серьезной проблемой является построение ее адекватной аналитической аппроксимации. Аналогичная нерешенная проблема имеет место в

сейсмологии при построении зависимости магнитуда–повторяемость землетрясения – так называемый закон Гутенберга-Рихтера, которому посвящена обширная литература [*Gutenberg, Richter, 1954; Kagan, 1999, 2010; Голицын, 2001; Pisarenko, Sornette, 2003; Родкин и др., 2014*].

Ряд математических свойств функции повторяемости приходится постулировать на основе соображений физического характера. Использование таких свойств функции повторяемости как монотонное убывание, непрерывность и гладкость приходится сопровождать аккуратными физическими доводами. Хотя мы реально не оперируем со сколь угодно большими высотами цунами, но при необходимости используем предельный переход.

Ряд существенных выводов о структуре функции повторяемости цунами удается получить, исходя из представления о подобии физических процессов генерации цунами в разных частях цунамигенной зоны, так что формируемый этими частями вклад в функцию повторяемости представляется масштабированием одной и той же универсальной функции.

**Раздел 2.3** посвящен исследованию структуры функции повторяемости высот цунами. Прежде всего, функция повторяемости цунами и ее основной аргумент  $h$  – физические величины, поэтому по теореме Бэкингема, соотношение (1) должно иметь безразмерную форму [*Седов, 1977*]. В общем случае для этого необходимы два масштабных параметра  $f$  и  $H^*$  частоты и высоты, соответственно. Тогда:

$$\varphi(x; h) = f(x) \cdot \Phi\left(x; \frac{h}{H^*(x)}\right). \quad (2)$$

Возможное наличие меньшего, чем два, или большего количества параметров цунамиактивности рассматривается отдельно. Переменная  $x$  здесь рассматривается как индикатор места (безразмерные широта и долгота).

Физический смысл введенных параметров выясняется при рассмотрении распространения цунами из открытого океана к берегу (рисунок 2).

Распространение цунами в зоне шельфа характеризуется малым параметром – отношением глубин в прибрежной зоне (метры) и в океане (километры), что влечет за собой серьезное упрощение структуры функции повторяемости. Характерная длина волны цунами в открытом океане составляет десятки – первые сотни километров, поэтому волновое поле в океане гладкое и существенно не изменяется на расстояниях порядка первых десятков километров, и, соответственно, высоты цунами в точках  $x'$  и  $x'_0$  **на глубокой воде** практически одни и те же, то есть  $x'$  – медленная переменная. Зато высоты цунами на побережье и в соответствующих близбереговых точках  $x$  и  $x_0$  могут различаться существенно.

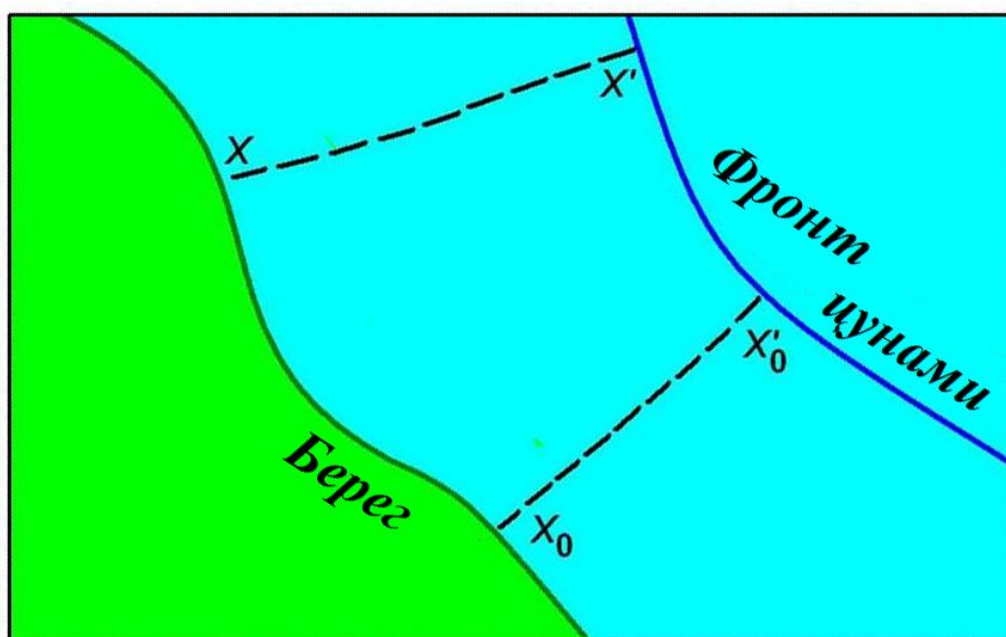


Рисунок 2 – Схема распространения цунами в регионе размером несколько десятков километров.

Каждое цунами, зарегистрированное в близбереговой точке  $x$  с максимальным заплеском  $h$ , имело в открытом океане высоту  $h'$  в точке  $x'$ . Введение среднего коэффициента трансформации (увеличения) высоты

цунами  $K(x', x) = \overline{k(x', x)}$  при его распространении от глубокой воды к берегу позволяет записать соотношение

$$h = K(x', x) \cdot h', \quad (3)$$

выполняемое в среднем, и построить цепочку равенств:

$$\begin{aligned} \varphi(x, h) &= \varphi(x', h') = f(x') \cdot \Phi\left(x', \frac{h'}{H^*(x')}\right) = \left| \text{подстановка : } h = K(x', x) \cdot h' \right| = \\ &= f(x') \cdot \Phi\left(x', \frac{h}{K(x', x) \cdot H^*(x')}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Принимая во внимание факт точного совпадения экстремальных высот волн, даваемых линейной и нелинейной одномерной моделью волнового наката на плоский однородный откос без разрушения волны [Pelinsonsky, Mazova, 1992], мы используем линейную одномерную модель трансформации с коэффициентом  $K$  для двумерной модели с гладкой береговой линией.

Переменная  $x'$  в формулах (3-4) медленная, поэтому зависимостью от нее можно пренебречь для районов размером в первые десятки километров и записать представление для приближенной региональной функции повторяемости:

$$\varphi(x; h) = f \cdot \Phi\left(\frac{h}{H^*(x)}\right), \quad (5)$$

$$H^*(x) = K(x) \cdot H^*(x'). \quad (6)$$

Физический смысл параметра  $f$  – асимптотическая частота сильных цунами в регионе, которая зависит только от медленной переменной  $x'$ , медленно изменяется вдоль берега и может считаться региональной постоянной. Параметр  $H^*$  – характеристическая высота цунами, пропорциональная среднему коэффициенту трансформации  $K(x)$  высоты цунами при ее распространении из океана к берегу. Этот параметр существенно изменяется вдоль берега и в принципе может быть получен в рамках численного моделирования распространения цунами.



**Раздел 2.4** посвящен разработке корректного метода построения функции повторяемости цунами с применением весового метода наименьших квадратов на основе данных о высотах цунами, наблюдаемых в некотором месте, совокупность которых рассматривается как случайный ряд, ранжированный в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \dots \quad (7)$$

Поток цунами можно рассматривать как приближенно Пуассоновский, заметные отклонения от которого связаны с относительно частыми и слабыми событиями [Geist, Parsons, 2008], поэтому вероятность того, что за период времени  $T$  произойдет  $n$  цунами с максимальной высотой, равной или превосходящей пороговую высоту  $h$ , дается формулой

$$P_n(\text{заплеск} \geq h) = e^{-\varphi(h)T} \cdot \frac{[\varphi(h) \cdot T]^n}{n!}. \quad (8)$$

Несмотря на то, что распределение каждой  $k$ -ой по величине высоты цунами  $h_k$  в ряду (7) зависит от номера  $k$ , периода наблюдений  $T$  и от неизвестной функции повторяемости цунами  $\varphi(h)$ , распределения соответствующих частот  $\varphi(h_k)$  оказываются гамма-распределениями, не зависящими от вида неизвестной функции повторяемости  $\varphi(h)$ , поскольку вероятности в (8) зависят от функции  $\varphi(h)$  параметра  $h$ , но не от параметра  $h$  непосредственно. Схематически ситуацию демонстрирует рисунок 3.

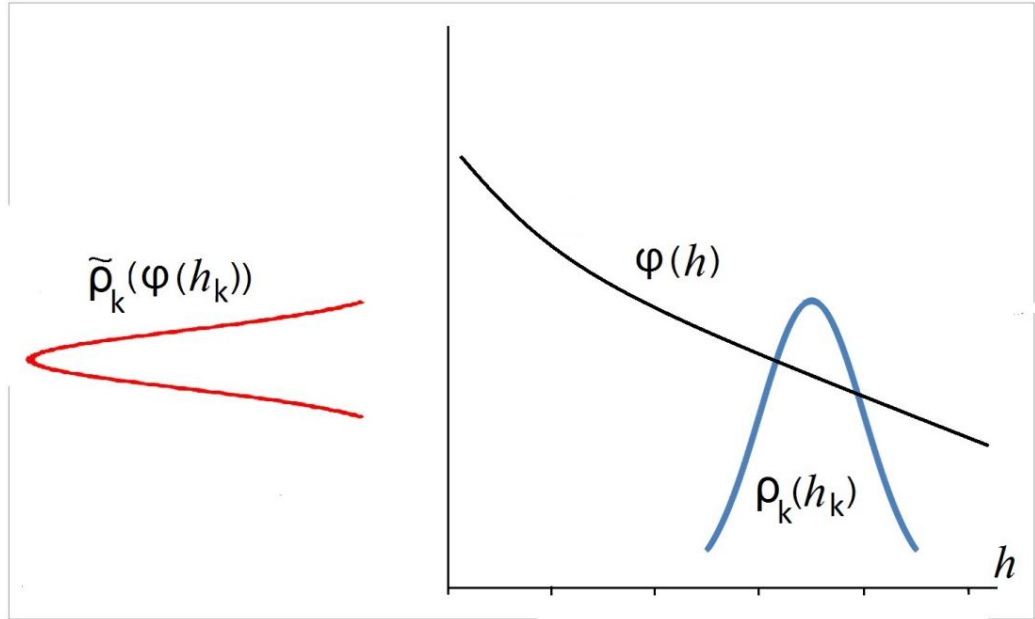


Рисунок 3 – Схематическое соотношение между плотностями распределений ранжированных высот цунами  $\rho_k(h_k)$  и соответствующих частот  $\tilde{\rho}_k(\varphi_k)$ .

Средние величины частот  $\varphi_k$ , логарифмов частот  $\ln(\varphi_k)$ , их дисперсии и стандартные отклонения вычисляются аналитически:

$$D(\varphi_k) = \overline{(\varphi_k)^2} - (\overline{\varphi_k})^2 = \frac{k}{T^2}, \quad (9)$$

$$\overline{\ln \varphi(h_k)} = \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s} - 0.577... - \ln T, \quad (10)$$

$$D_k = D(\ln \varphi(h_k)) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}, \quad (11)$$

$$\sigma(\ln \varphi(h_k)) = \sqrt{\frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}}. \quad (12)$$

Стандартные отклонения  $\sigma(\ln \varphi_k)$  для частот с первыми порядковыми номерами велики, так  $\sigma_1 = \sigma(\ln \varphi_1) = 1.28$  для частоты наибольшего события. Поэтому допустимый диапазон, соответствующий стандартному отклонению  $\sigma_1$ , для периода повторяемости сильнейшего события оказывается чрезвычайно большим  $(T/3.6 - 3.6 \cdot T)$ , где  $T$  – реальный период наблюдений и

$\exp(\sigma_1) \approx 3.6$ . Это означает, например, что максимальное значение высоты цунами, зарегистрированное в некотором месте в течение 30-летнего периода наблюдений, следует соотносить с широким диапазоном периодов повторяемости от 10 до 100 лет, в соответствии со значением стандартного отклонения  $\sigma_1=1.28$ .

Пример функции повторяемости высот цунами для Южно-Курильска приведен на рисунке 4.

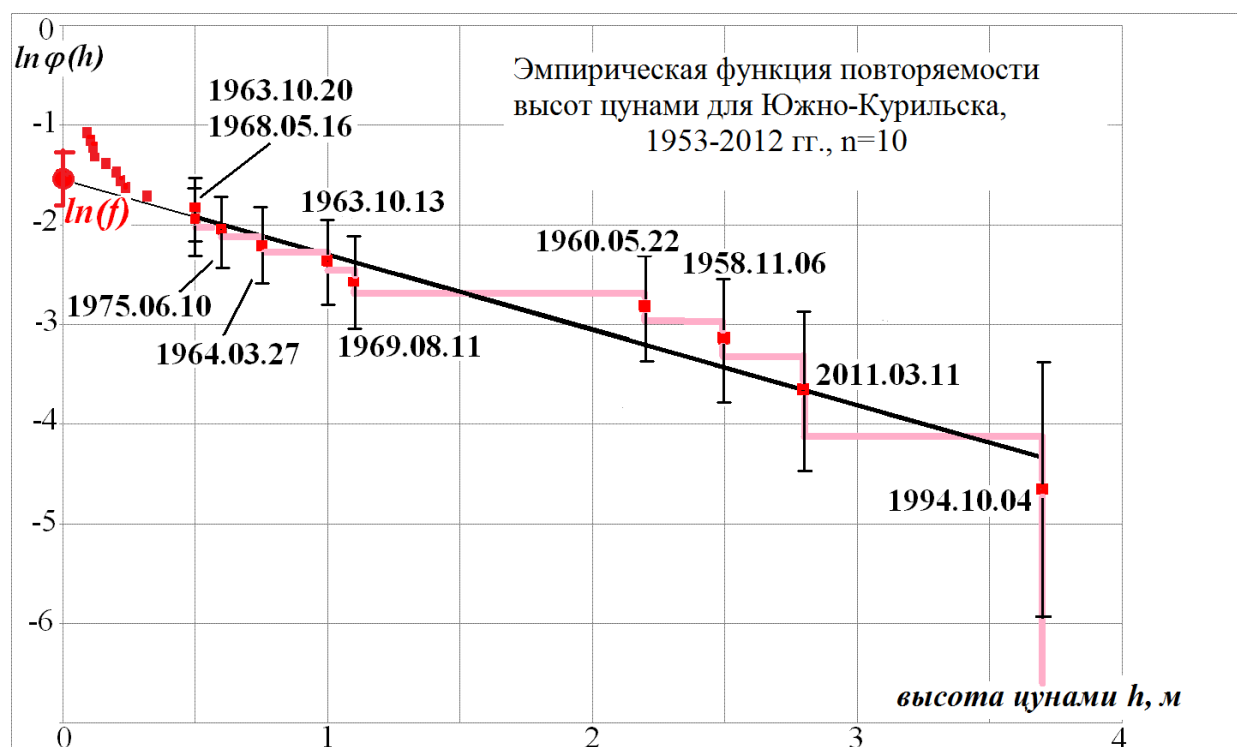


Рисунок 4 – Эмпирическая функция повторяемости для Южно-Курильска, построенная по высотам исторических цунами с  $h \geq 0.5$  м за период времени 1953–2012 гг. и ее аппроксимация. Всем величинам  $\ln \varphi(h_k)$  (красные кубики) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений. Асимптотическая частота больших цунами для Южно-Курильска  $f = 0.16 \pm 0.24$  1/год отмечена красным кружком на оси ординат. Характеристическая высота цунами в Южно-Курильске равна  $H^*=1,5$  м и  $1/H^*=0,7 \pm 0,2$  1/м.

Анализ данных показывает, что функции повторяемости для больших высот цунами (цунами с малыми высотами не опасны) можно аппроксимировать экспонентой:

$$\varphi(x, h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*(x)}}. \quad (13)$$

Величина стандартного отклонения  $\sigma(\ln f)$  асимптотической частоты сильных цунами  $f$  существенно зависит от количества наблюдаемых высот цунами, используемых при построении функции повторяемости, и приемлемое количество данных должно быть не менее 4–5.

Параметры функции повторяемости  $f$  и  $H^*$  могут быть определены с помощью взвешенного метода наименьших квадратов [Химмельблау, 1973; Айвазян и др., 1983], либо методом максимального правдоподобия [Крамер, 1975] с использованием параметров гамма-распределений частот  $\varphi_k$ , с просто вычисляемыми модами, средними и дисперсиями (9-12).

На примере Южных Курильских островов (рисунок 5) показано, что реальный размер региона, в котором можно считать постоянной асимптотическую частоту больших цунами  $f$  (данные в таблице 1), значительно больше теоретически ожидаемого (первые десятки километров).



Рисунок 5 – Район Южных Курильских островов.

В таблице 1 приведены параметры цунамиактивности для четырех пунктов в регионе Южных Курильских островов.

Таблица 1 – Параметры цунамиактивности  $f$  и  $H^*$  и их стандартные отклонения для четырех пунктов в регионе Южных Курильских островов

Место	$\ln f$	$f$ , 1/год	$\sigma(\ln(f))$	$1/H^*$ , $m^{-1}$	$\sigma(1/H^*)$	$H^*$ , м	$\delta H^*/H^*$
Буревестник	<b>-1.7</b>	0.14	0.3	0.6	0.19	1.6	0.3
Курильск	<b>-1.4</b>	0.24	1.4	3.3	2	0.3	0.6
Мало-курильское	<b>-1.6</b>	0.15	0.2	0.5	0.15	2.0	0.3
Южно-Курильск	<b>-1.6</b>	0.16	0.2	0.7	0.2	1.5	0.3

Видно, что частоты сильных цунами, с учетом погрешности, одни и те же для региона размером около 250 км. Таким образом, реальный размер региона, в котором можно считать постоянной асимптотическую частоту больших цунами, измеряется первыми сотнями километров.

Слабые цунами не являются опасными, но данные о них представляют собой ценную информацию, и в **разделе 2.5** получены асимптотические формулы для средних логарифмов частот повторяемости  $\overline{\ln \varphi(h_k)}$  и соответствующих дисперсий, лучше проявляющие аналитическую структуру зависимости этих величин от больших значениях рангов  $k$ .

В **разделе 2.6** рассмотрена общая проблема параметризации функции повторяемости цунами. На основе представления о подобии физических процессов генерации цунами в разных частях цунамигенной зоны сделан вывод о том, что вклады в функцию повторяемости разных частей полной цунамигенной зоны могут быть представлены масштабированием некоторой универсальной функции  $\Psi$  с помощью наборов масштабных параметров  $\{f_k\}$  и  $\{H_k^*\}$ :

$$\varphi(x, h) = \sum_{k=1}^m f_k \Psi \left( \frac{h}{H_k^*(x)} \right). \quad (14)$$

Формула (14) детализует структуру зависимости (2) и формально обобщает «региональную» зависимость (5) на весь океан.

Ряд свойств функции  $\Psi$  постулируются, это положительность, убывание, гладкость и, возможно, финитность.

Важные аналитические свойства функции  $\Psi$  в (14) могут быть установлены из поведения относительного вклада двух частичных функций повторяемости, как функции пороговой высоты цунами  $h$ :

$$\psi_{12}(h) \stackrel{def}{=} \frac{f_1 \Psi\left(\frac{h}{H_1^*}\right)}{f_2 \Psi\left(\frac{h}{H_2^*}\right)}. \quad (15)$$

Прежде всего, если функция  $\Psi$  – степенная, то относительный вклад разных частей цунамигенной зоны **не зависит от пороговой высоты волны  $h$** :

$$\psi_{12}(h) = \frac{f_1 \Psi\left(\frac{h}{H_1^*}\right)}{f_2 \Psi\left(\frac{h}{H_2^*}\right)} = const. \quad (16)$$

Верно и обратное: если  $\Psi_{12}(h)$  постоянна, то функция  $\Psi$  – степенная.

Если  $\Psi_{12}(h)$  убывает к нулю ( $\lim_{h \rightarrow \infty} \Psi_{12}(h) = 0$ ) с увеличением высоты цунами  $h$ , то при необременительном условии  $H_1^* < H_2^*$  (цунами, приходящие в исследуемое место из зоны  $S_1$  проявляются в среднем слабее таковых из зоны  $S_2$ ) и при произвольном действительном  $\beta$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \Psi(z) \cdot z^\beta = 0, \quad (17)$$

то есть  $\Psi(z)$  стремится к нулю на бесконечности быстрее любой степени.

В разделе 2.7 на основе эмпирического факта, имеющего теоретическое обоснование, состоящего в том, что вдольбереговое распределение высот цунами является логнормальным, получена формула

$$\Phi(Y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{H^*(x)}{\lambda \cdot H^*(x')} \frac{Y}{y} \right)^2 \right] \cdot \Phi(y) \frac{dy}{y}, \quad (18)$$

связывающая «региональную» функцию повторяемости высот цунами с вдольбереговым распределением высот цунами в регионе.

Собственные функции такого интегрального оператора с ядром, зависящим от отношения аргументов  $Y/y$  хорошо известны – это степенные функции с произвольным показателем  $\alpha$ :  $\Phi(z) = C \cdot z^\alpha$  [Полянин, Манжиров, 2003], откуда следует, что аналитическое представление степенной функции повторяемости высот цунами будет

$$\varphi(h) = c \cdot h^\alpha, \quad c = f \cdot C \cdot (H^*)^{-\alpha}. \quad (19).$$

Анализ натурального материала показывает, что приближенные эмпирические значения  $\alpha$  попадают в диапазон значений  $(-1,3; -0,6)$  в окрестности значения  $\alpha = -1$  для всех исследованных регионов [Okada, Tada, 1983; Wigen, 1983; Burroughs, Tebbens, 2005]. Этот параметр следует считать универсальным и равным  $\alpha = -1$ . При этом параметр  $c$  имеет физическую размерность скорости, и его значения, отличающиеся на побережьях различных регионов, имеют порядок нескольких сантиметров в год. Следует отметить, что никаким другим значениям параметра  $\alpha$  в окрестности  $\alpha = -1$  не отвечают разумные физические размерности параметра  $c$ . Поскольку высоты цунами на глубокой воде примерно на порядок меньше, чем у берега, величина параметра  $c$  для глубокой воды составляет несколько миллиметров в год – таков же порядок средних величин скоростей деформации земной коры в тектонически активных зонах. Обнаруженное совпадение вряд ли случайно, поскольку именно такие зоны являются очаговыми зонами цунами.

Таким образом, следует утверждать, что функция повторяемости – степенная функция  $\varphi(h) = ch^{-1}$  с одним параметром  $c$ , имеющим размерность скорости.

Тем не менее, диапазон применимости полученного степенного представления  $\varphi(h) = ch^{-1}$  – слабые и умеренные цунами. Причин таких

ограничений две. Первая заключается в приближенном характере логнормального распределения заплесков вдоль побережья региона, который заставляет рассматривать уравнение (18) тоже как приближенное. Поэтому выводы об аналитическом характере функции  $\Phi$  остаются справедливыми только для малых и умеренных значений высот цунами, при которых функция  $\Phi$  принимает большие значения (частые цунами). Более жесткими являются энергетические ограничения: функция повторяемости при больших значениях высот цунами должна убывать быстрее степенной функции  $\sim h^\alpha$  с показателем степени  $\alpha < -2$ .

Целью **раздела 2.8** является получение адекватной аналитической аппроксимации для функции повторяемости при больших значениях высот цунами на материале наиболее полных и длительных рядов о заплесках цунами на побережье Санрику в Японии. Для шести пунктов побережья Санрику показано, что относительный вклад  $\psi_{12}(h)$  в функцию повторяемости от удаленной части цунамигенной зоны (расстояние  $L \geq 600$  км до эпицентра цунамигенного землетрясения) по сравнению с ближней ( $L < 600$  км) частью быстро убывает с увеличением пороговой высоты  $h$  цунами (рисунки 6 и 7) и при больших значениях высот цунами становится ничтожно малым.

Поскольку в длительном историческом опыте Японии **все катастрофические цунами на этом побережье, начиная с IX века, были связаны только с «близкими» очагами**, можно считать, что вероятность катастрофы от очага, удаленного от побережья Санрику, стремится к нулю, и относительный вклад удаленных источников  $\psi_{12}(h) \rightarrow 0$  при увеличении пороговой высоты цунами  $h$ . Отсюда следует, что  $\Psi(z)$  стремится к нулю на бесконечности быстрее любой степени. Поэтому функция повторяемости цунами для больших высот цунами убывает быстрее любой степени, что делает приемлемой ее экспоненциальную аппроксимацию (13) [Kaistrenko, 2014].



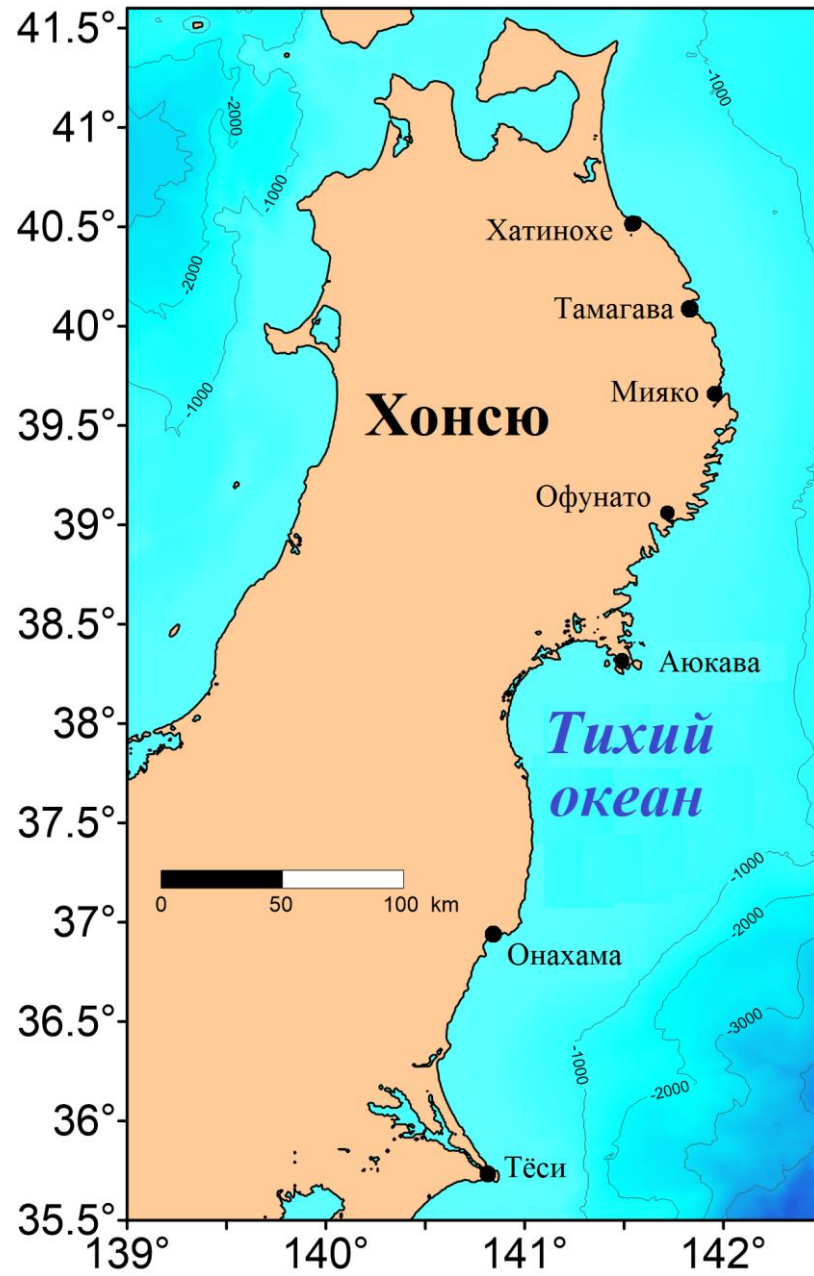


Рисунок 6 – Побережье Санрику, Япония.

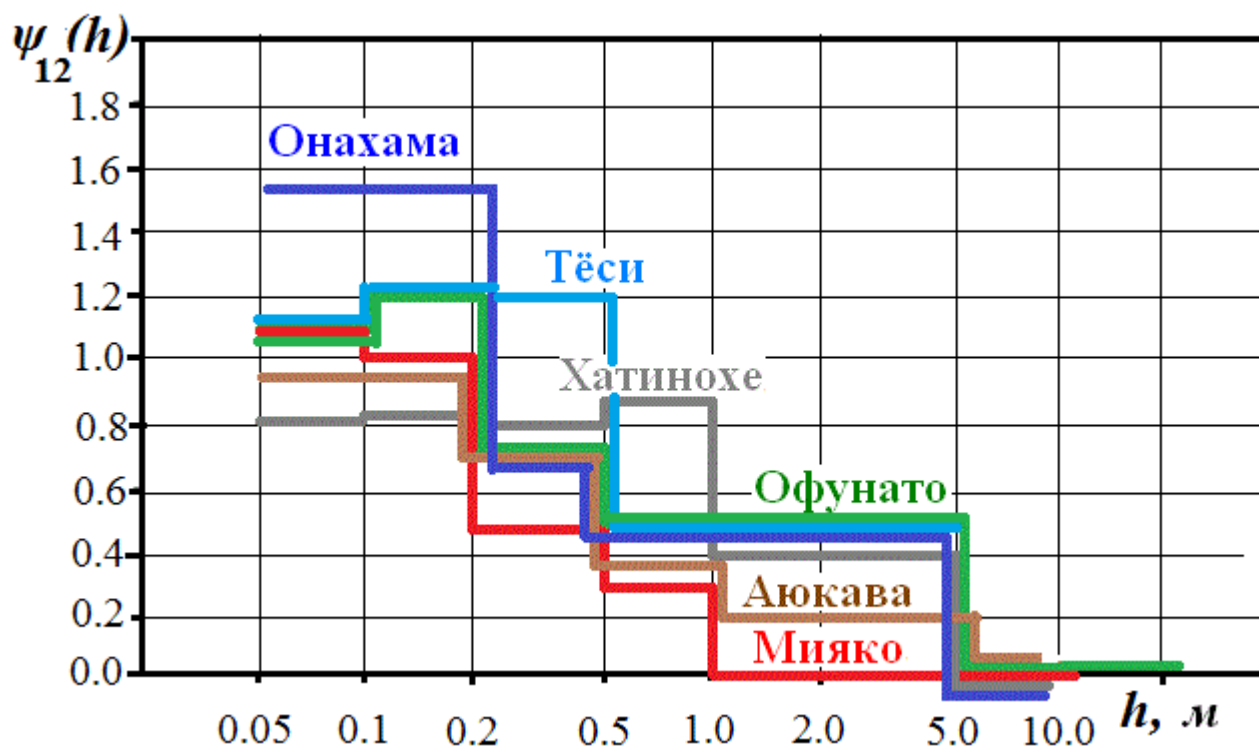


Рисунок 7 – Функции  $\psi_{12}(h)$  относительного вклада в функцию повторяемости от удаленной и ближней частей цунамигенной зоны, построенные для нескольких пунктов побережья Санрику, С-В Хонсю.

Заключительный **раздел 2.9** второй главы содержит выводы, важнейшие из которых следующие:

- обоснована структуры функции повторяемости высот цунами и выяснен физический смысла ее параметров, это: региональный параметр – асимптотическая частота сильных цунами  $f$ , и локальный параметр – характеристическая высота цунами  $H^*$ ;
- создан корректный метод получения оценок параметров  $f$  и  $H^*$  функции повторяемости для больших высот цунами, с их дисперсиями, являющимися оценками погрешности.

**Глава 3** посвящена развитию методов использования данных палеоцунами для оценок цунамиопасности.

В **разделе 3.1** дано описание воздействия цунами на берега и кратко описана история исследований этой проблемы.

**Раздел 3.2** содержит краткий очерк исследований осадков современных цунами и их особенностей, целью которых было выявление ключевых черт осадконакопления исторических цунами для последующего использования в изучении палеоцунами.

В **разделе 3.3** дано описание проявлений палеоцунами в Южно-Курильском регионе в голоцене.

Краткий **раздел 3.4** содержит ряд выводов о проявлениях доисторических цунами на Южных Курильских островах.

В **разделе 3.5** проанализированы особенности статистического учета данных о палеоцунами. Главная особенность данных о максимальных заплесках цунами, собранных в каталогах – это данные о высотах, которые были достигнуты при цунами. Наличие же отложений палеоцунами, обнаруженных на некотором уровне над океаном, свидетельствует о том, что цунами превысило данный уровень. Каков же при этом был максимальный заплеск – неизвестно. Несомненно, что очень перспективные, хотя и достаточно проблемные, данные о палеоцунами и традиционные данные о заплесках цунами – это два разных типа данных, которые надо научиться использовать совместно. Именно эта задача решается в данном разделе.

Ситуации, когда отложениям  $n$  палеоцунами, с которыми ассоциирована высота  $h_{(n)}$  над уровнем океана, превышенная ими при накате, отвечает вероятность (8) превышения уровня  $h_{(n)}$  при  $n$  цунами

$$P_{(n)} = e^{-\varphi(h_{(n)})T} \cdot \frac{[\varphi(h_{(n)}) \cdot T]^n}{n!} \quad (20)$$

в течение периода времени  $T$  с неизвестным значением  $\varphi(h_{(n)})$  неизвестной функции  $\varphi(h)$ . При этом вероятность  $P_{(n)}$  принимает наибольшее значение при  $\varphi(h_{(n)}) = n / T$ . Это и есть максимально правдоподобное [Крамер, 1975] значение функции повторяемости высот цунами для данной ситуации. Следует отметить, что максимальное значение вероятности при этом достаточно мало и зависит только от числа отложений цунами  $n$ . Подставляя

максимально правдоподобное значение функции повторяемости высот цунами в формулу (20), получим

$$\max P_{(n)} = e^{-n} \cdot \frac{n^n}{n!}. \quad (21)$$

При  $n = 1$   $\max P_{(n)} = e^{-1}$ . Используя формулу Стирлинга для факториала, получим асимптотику искомого значения для больших значений  $n$

$$\max P_{(n)} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \left(1 - \frac{1}{12n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)\right). \quad (22)$$

Из этой формулы видно, что ситуации с находками большого количества отложений цунами, относящихся к какому-либо уровню, весьма редки априори.

Для использования данных палеоцунами при построении функции повторяемости при  $n \geq 3$  с применением весового метода наименьших квадратов можно воспользоваться медленной монотонной изменчивостью средних логарифмов частот  $\overline{\ln \varphi(h_n)}$  и дисперсий  $D_n$  при изменении  $n$  и использовать интерполяцию формул, полученных в разделе 2 для этих величин.

В **разделе 3.6** приведены два конкретных примера построения функции повторяемости цунами на базе данных об исторических событиях и палеоцунами.

Исследование палеоцунами в районе Халактырки на Тихоокеанском побережье Камчатки (рисунок 8) выявил отложения 13 палеоцунами в разрезах, расположенных вдоль двух профилей, один из которых вместе со схемами разрезов приведен на рисунке 9.

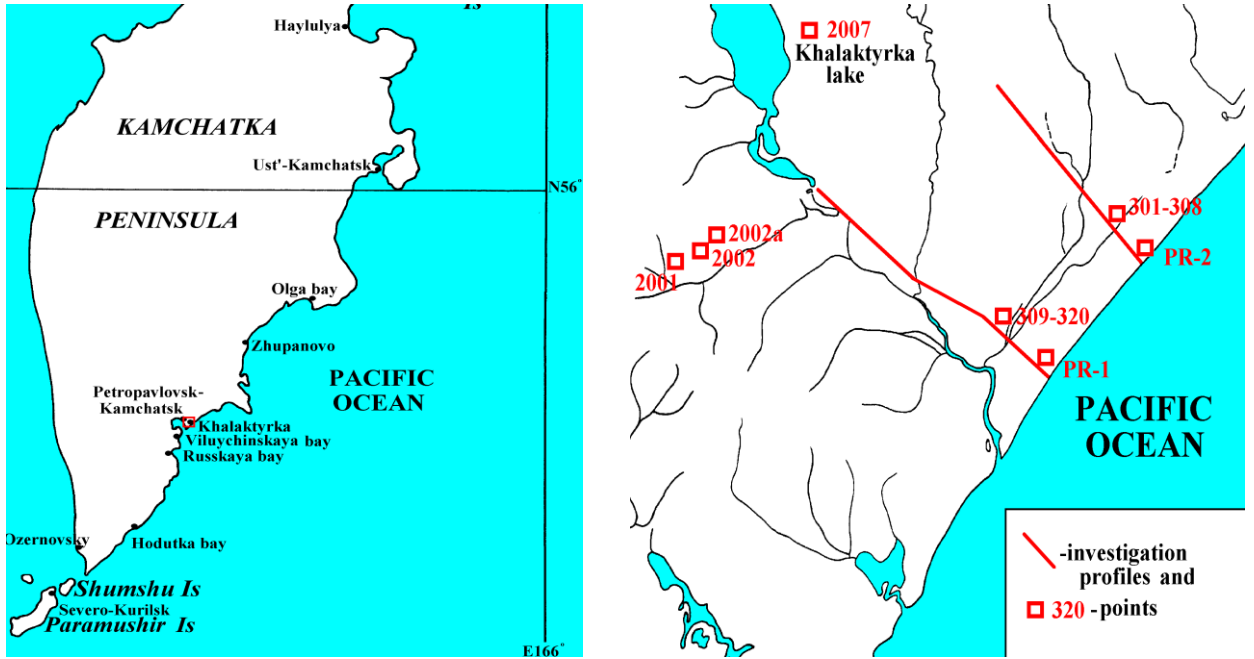


Рисунок 8 – Район исследований на Тихоокеанском побережье Камчатки и местоположение профилей и шурфов [Kaistrenko et al, 2003].

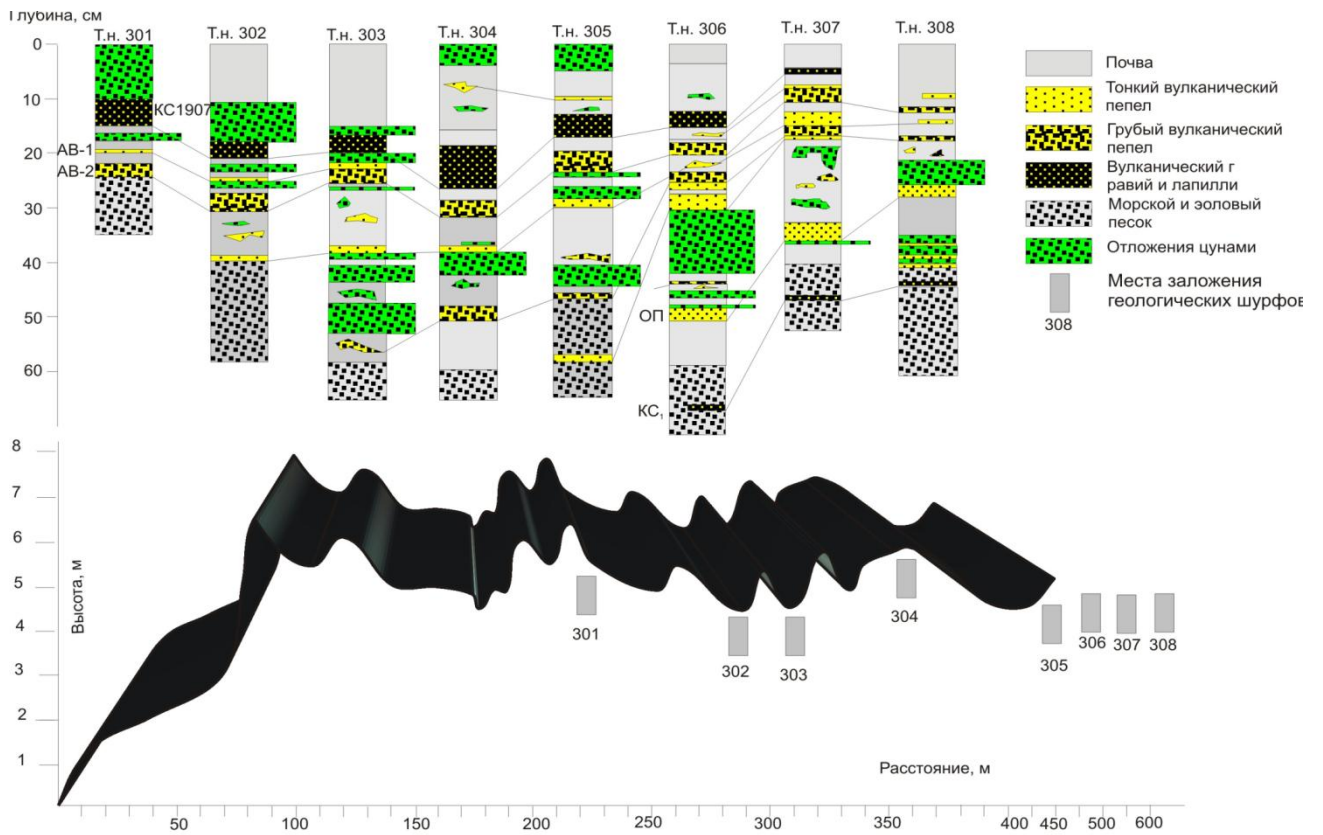


Рисунок 9 – Геоморфологический профиль 2 и схемы разрезов.

Последний рисунок демонстрирует типичные черты отложений цунами. Пятнистость отложений цунами при их формировании приводит к тому, что каждый разрез содержит свой набор отложений, с частичным перекрытием наборов из соседних разрезов. Отложения вулканических пеплов, как видно из рисунка, прослеживаются вдоль профиля гораздо отчетливее, и, соответственно, при корреляции и датировке отложений палеоцунами широко использовался метод тефростратиграфии и тефрохронологии, позволяющий определять стратиграфическое положение, относительный и абсолютный возраст цунамигенных горизонтов в геологических разрезах, опираясь на изученные ранее состав и возраст голоценовых маркирующих горизонтов вулканических пеплов для Камчатки.

Для учета палеоцунами при построении функции повторяемости использовался **однородный** материал по первым 11 событиям, произошедшим в интервале времени от извержения вулкана Ксудац в 236 г. КС<sub>1</sub> до наших дней. Уровень, с которым ассоциируются отложения этих цунами, – 8-метровая высота берегового вала (рисунок 9), который данные цунами превысили.

Ниже, на рисунке 10, приведена функция повторяемости высот цунами для Халактырки, построенная по историческим (цунами 1841, 1952 и 1960 гг.) и палеоданным  $\overline{\ln \varphi(h_{(11)})} = -5,03$ ;  $\sigma_{(11)} = 0.3$ ). Эта функция – часть общей для Южной Камчатки вероятностной модели цунамиактивности (раздел 5.5).

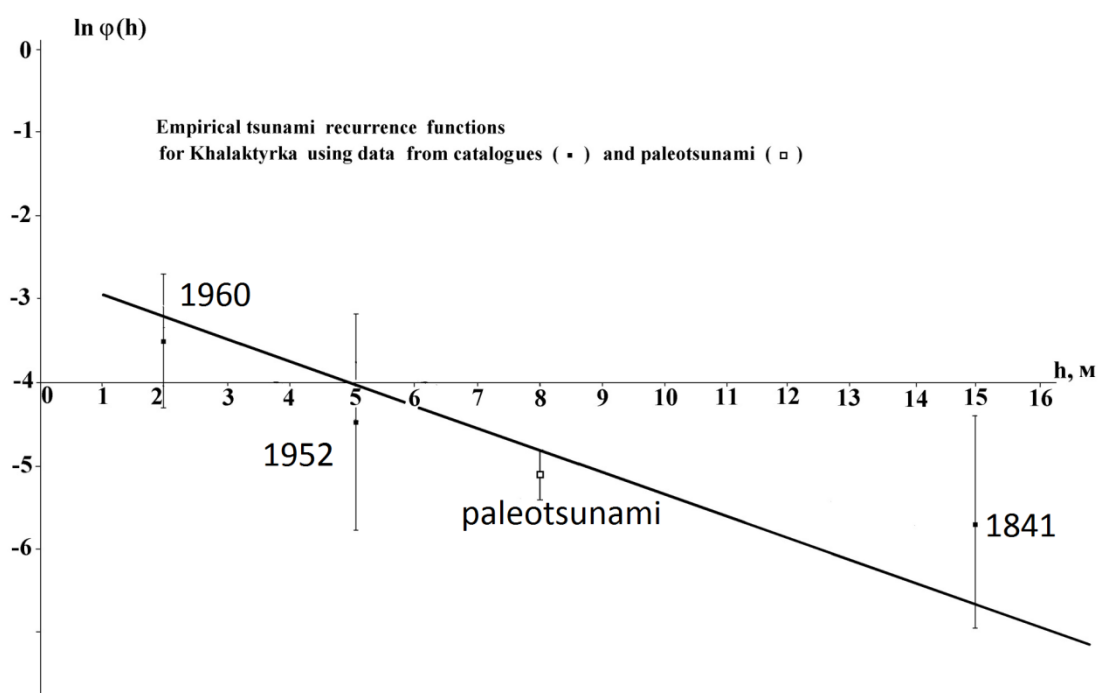


Рисунок 10 – Эмпирическая функция повторяемости высот цунами для Халактырки  
[Kaistrenko et al., 2003]

Рисунок 10 демонстрирует значимость данных палеоцунами – именно многочисленным данным палеоцунами соответствует минимальное значение дисперсии.

Аналогичная работа по совместному использованию исторических и палеоданных о цунами была проведена на материалах, относящихся к району Жупаново, Камчатка [Доисторические цунами, 2000].

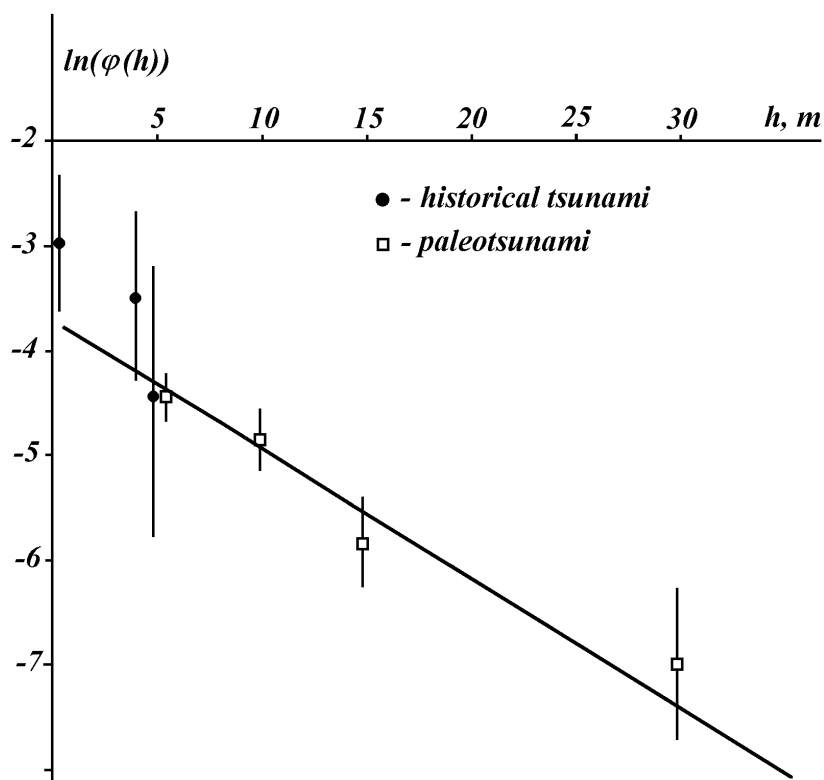


Рисунок 11 – Эмпирическая функция повторяемости высот цунами для Жупаново [Kaistrenko, Pinegina, 2001].

В **главе 4** рассмотрены особенности поведения цунами вблизи берега.

В **разделе 4.1** описан разработанный автором приближенный аналитический метод коррекции высоты волны на берегу, использующий результаты численного распространения цунами в рамках линейной модели (23) вплоть до некоторой искусственной «стенки» на глубинах порядка 5-10 м (рисунок 12).

$$(gkx \cdot \eta_x)_x = \eta_{tt}. \quad (23)$$

Здесь  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\eta$  – смещение уровня относительно равновесного. Обрезание зоны мелководья при расчетах по линейной модели (23) на однородной сетке – вынужденная мера, поскольку приведенное выше уравнение вырождается у берега. Для ухода от этой проблемы обычно



используются комбинированные сетки и учет нелинейности. При этом возникают другие, не меньшие проблемы.

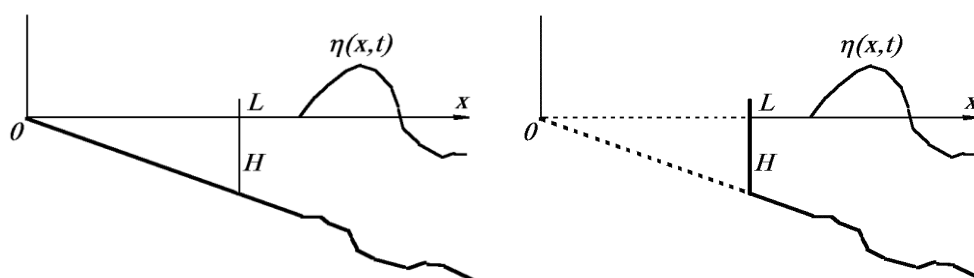


Рисунок 12 – Две модели распространения цунами в прибрежной зоне: реалистичная (слева) и с искусственной «стенкой» (справа).

Оказывается, численную мареограмму, полученную на искусственной «стенке» в одномерной линейной модели наката цунами на берег, можно аналитически преобразовать в мареограмму на берегу для модели без «стенки»:

$$\eta_1(t)|_0 = \int_0^{t-T} \sqrt{(t-\tau)^2 - T^2} \eta''(\tau)|_L d\tau, \quad (24)$$

где единственный параметр  $T = 2\sqrt{\frac{L}{kg}} = \frac{2 \cdot L}{g \cdot H}$  – есть время задержки распространения волны от точки  $x = L$  до берега,  $t > T$ .

Данное преобразование можно использовать для эмуляции прибрежной части акватории, обычно «отбрасываемой» в расчетах сеточными методами.

Формула (24) существенно использовалась в расчетах цунами при построении карт цунамирайонирования в главе 5. Кроме того ее использование продемонстрировано группой проф. Чоя Б.Х. (Республика Корея) на примерах моделирования двух цунами – Окусирского 12 июля 1993 года и Чилийского 27 февраля 2010 года. Из рисунков 13 и 14 следует, что такой аналитический метод «продолжения» волнового поля до берега существенно улучшает соответствие между модельными и реально наблюдаемыми на берегу высотами цунами.

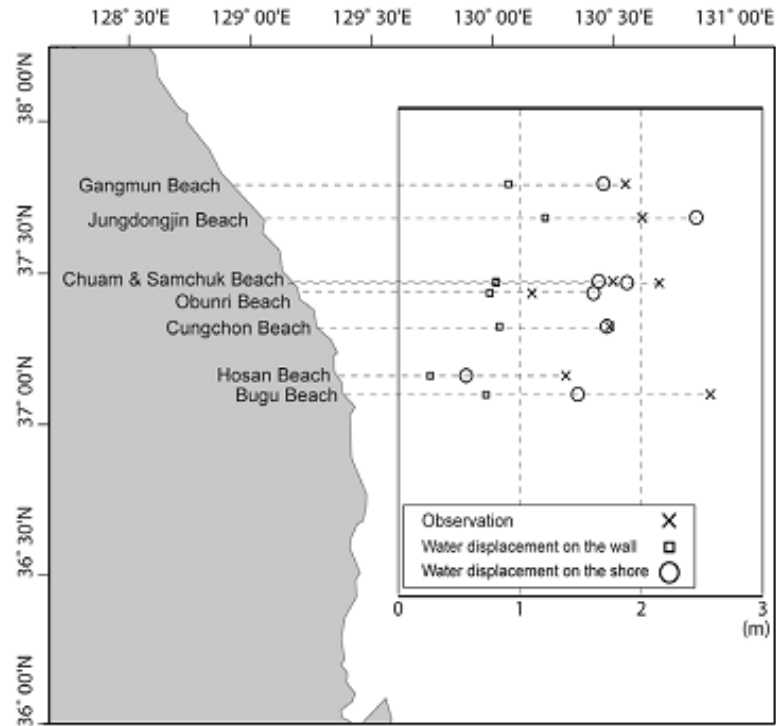


Рисунок 13 – Сравнение натуральных высот цунами 1993 года на побережье Кореи с численными на «стенке» и пересчитанными по вышеприведенной формуле [Rapid forecasting..., 2011].

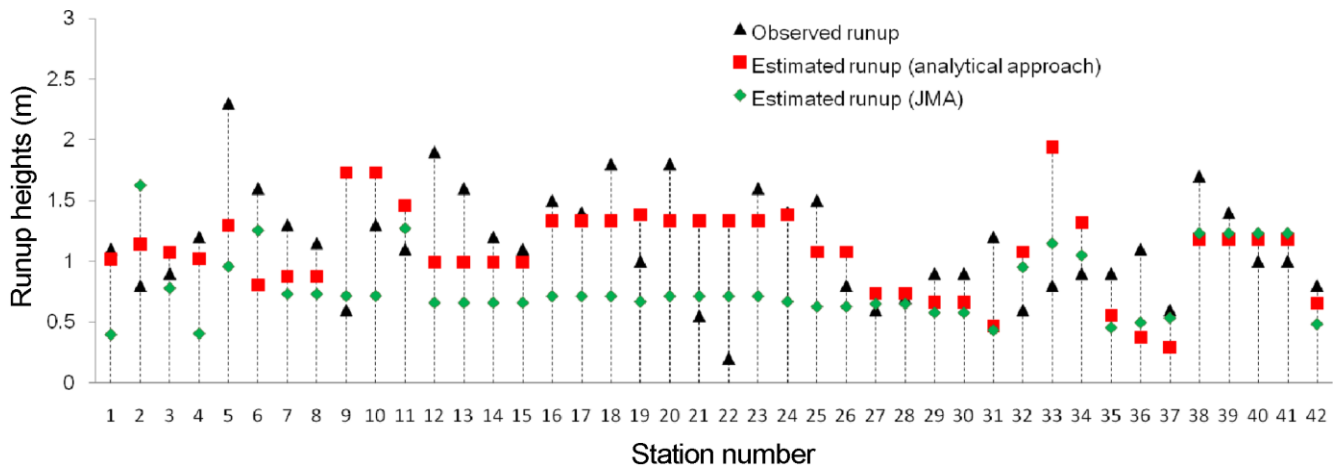


Рисунок 14 – Сравнение наблюдаемых и вычисленных высот Чилийского цунами 27 февраля 2010 года на Восточном побережье Японии [Analytical Rapid Prediction..., 2015].

**Раздел 4.2** посвящен аналитической теории нелинейной трансформации волн цунами на мелководье и наката на плоский однородный откос в рамках одномерной модели мелкой воды (рисунок 12, слева):

$$\begin{aligned} u_t + u \cdot u_x + g \cdot \eta_x &= 0 \\ \eta_t + [(\alpha \cdot x + \eta)u]_x &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь  $\eta$  – смещение уровня воды,  $u$  – средняя по глубине скорость потока воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h(x)$  – переменная глубина бассейна, причем будем считать  $h(x) = -ax$ ,  $a = \text{const}$ ,  $t$  – время,  $x$  – пространственная координата. Ось  $Ox$  направлена в сторону моря.

Теоретический анализ наката цунами на берег показал, что трансформации волны в окрестности уреза характеризуется единственным безразмерным параметром  $Br = H\omega^2/g\alpha^2$ , где  $H$  и  $T$  – типичные высота и период волны,  $\omega = 2\pi/T$  – частота,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – уклон дна. При  $Br < 1$  волна накатывается на берег без разрушения, а при  $Br \geq 1$  накат сопровождается образованием бора. Для случая наката волны без разрушения ( $Br < 1$ ) получены приближенные формулы для безразмерных экстремальных значений высот цунами  $\eta_{\max}/H$  и  $\eta_{\min}/H$  и скоростей течения  $u_{\max}/\omega H$  в близурезной зоне, графически представленные на рисунках ниже.

Завершает главу 4 **раздел 4.3** об аналитической структуре преобразований нелинейной системы (25) в соответствующую линеаризованную, впервые введенных Дж. Кэрриером и Х. Гринспеном.

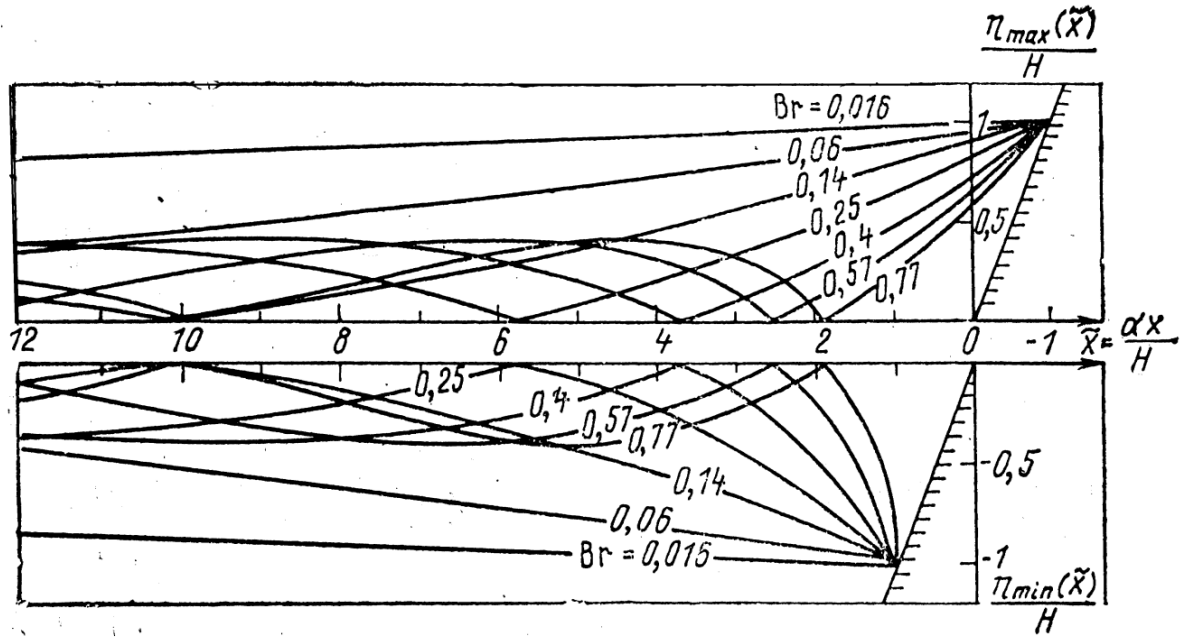


Рисунок 15 – Зависимость максимальных и минимальных относительных отклонений уровня от безразмерной координаты  $\bar{x} = \alpha x/H$ .

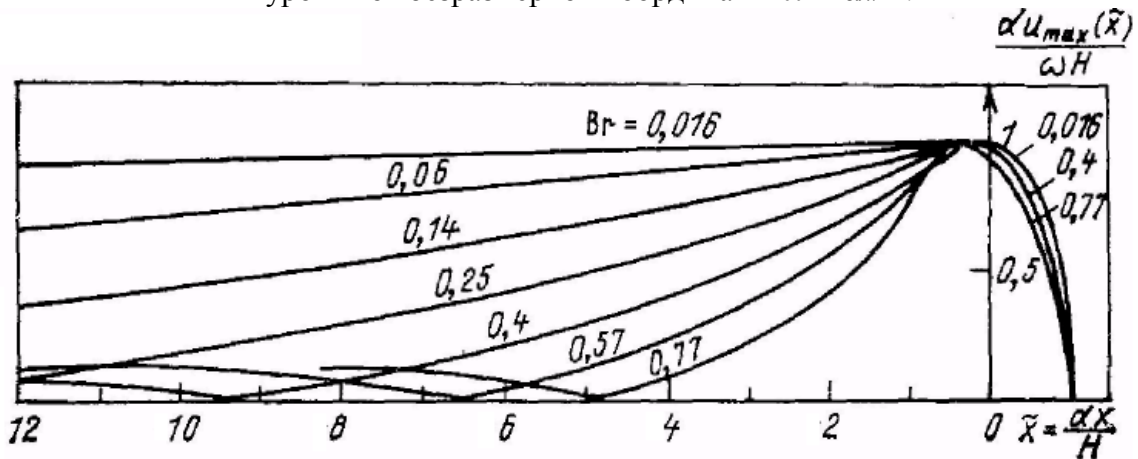


Рисунок 16 – Зависимость максимальной безразмерной скорости потока от безразмерной координаты  $\bar{x} = \alpha x/H$ .

**Глава 5** посвящена приложениям результатов, приведенных в главах 2-4 к построению вероятностных моделей цунамиактивности и карт цунамирайонирования.

В **разделах 5.1-5.3** достаточно подробно рассмотрены этапы технологии создания карты цунамирайонирования побережья Южных Курильских островов. На начальном этапе создается вероятностная модель цунамиактивности для исследуемого региона на базе надежных рядов данных о заплесках цунами в 18 пунктах побережья. Полученные при этом

значения региональной частоты сильных цунами  $f = 0,17$  1/год с «относительной погрешностью»  $\sigma(\ln(f))=0,13$  и 18 значений характеристических высот цунами  $H^*$  со средней 30 %-ной относительной погрешностью рассматривается в качестве «скелета» карты цунамирайонирования побережья Южных Курильских островов (таблица 2)

Таблица 2 – Значения характеристических высот цунами для 18 пунктов Южных Курильских островов

№	Пункт	$H^*$ , м	$\sigma(H^*)/H^*$
1	Сентябрьский	2,69	0,26
2	Буревестник	1,87	0,27
3	Курильск	0,57	0,31
4	м. Ловцова	1,58	0,30
5	Винай	2,18	0,35
6	Космодемьянское	1,15	0,29
7	Южно-Курильск	1,54	0,26
8	Серноводск	1,42	0,26
8	Головнино	0,67	0,29
10	Малокурильское	2,14	0,27
11	б. Отрадная	1,10	0,27
12	Крабовое	2,12	0,30
13	м. Край Света	2,21	0,33
14	б. Димитрова	3,06	0,34
15	б. Церковная	4,23	0,32
16	о. Зеленый	1,82	0,26
17	о. Юрий	1,24	0,35
18	о. Полонского	1,46	0,47

Следующим этапом является численное моделирование наиболее значительных исторических цунами, заплески которых использовались при создании базовой «скелетной» модели. В итоге заплески, полученные в результате численного моделирования, после калибровки по высоте использовались для расчета характеристических высот цунами  $H^*$  для всего побережья, аналогично тому, как характеристические высоты цунами вычислялись на основе только натуральных данных. По аналогии с картами сейсмоопасности, на карту цунамирайонирования побережья Южных Курильских островов выносились значения высот заплесков  $h_{100}=H^*\cdot\ln(100\cdot f)$  с повторяемостью раз в 100 лет (рисунок 17).

Аналогичным образом поэтапно в **разделах 5.4-5.5** были построены карты цунамирайонирования побережья Северных Курильских островов и восточного побережья Камчатки.

В **разделах 5.6-5.7** построены «скелеты» карт цунамирайонирования побережья о. Сахалин и Японского моря. На «скелете» карты цунамирайонирования побережья Японского моря (рисунок 18) обращает на себя внимание наличие участков побережья с увеличенными значениями  $H^*$ , которым отвечают особенности акватории, способствующие усилению цунами. Таковы участки Кит – Рудная Пристань на побережье Приморья, район Кангвондо в Корее и побережье Акита на о. Хонсю. Эти участки побережья следует считать наиболее опасными.

Завершается глава 5 **разделом 5.8**, в котором содержатся выводы и замечания о «допустимых» рисках. Именно обоснованные оценки рисков должны стать отправной точкой создания любого норматива по учету цунами и карт цунамирайонирования, в частности.

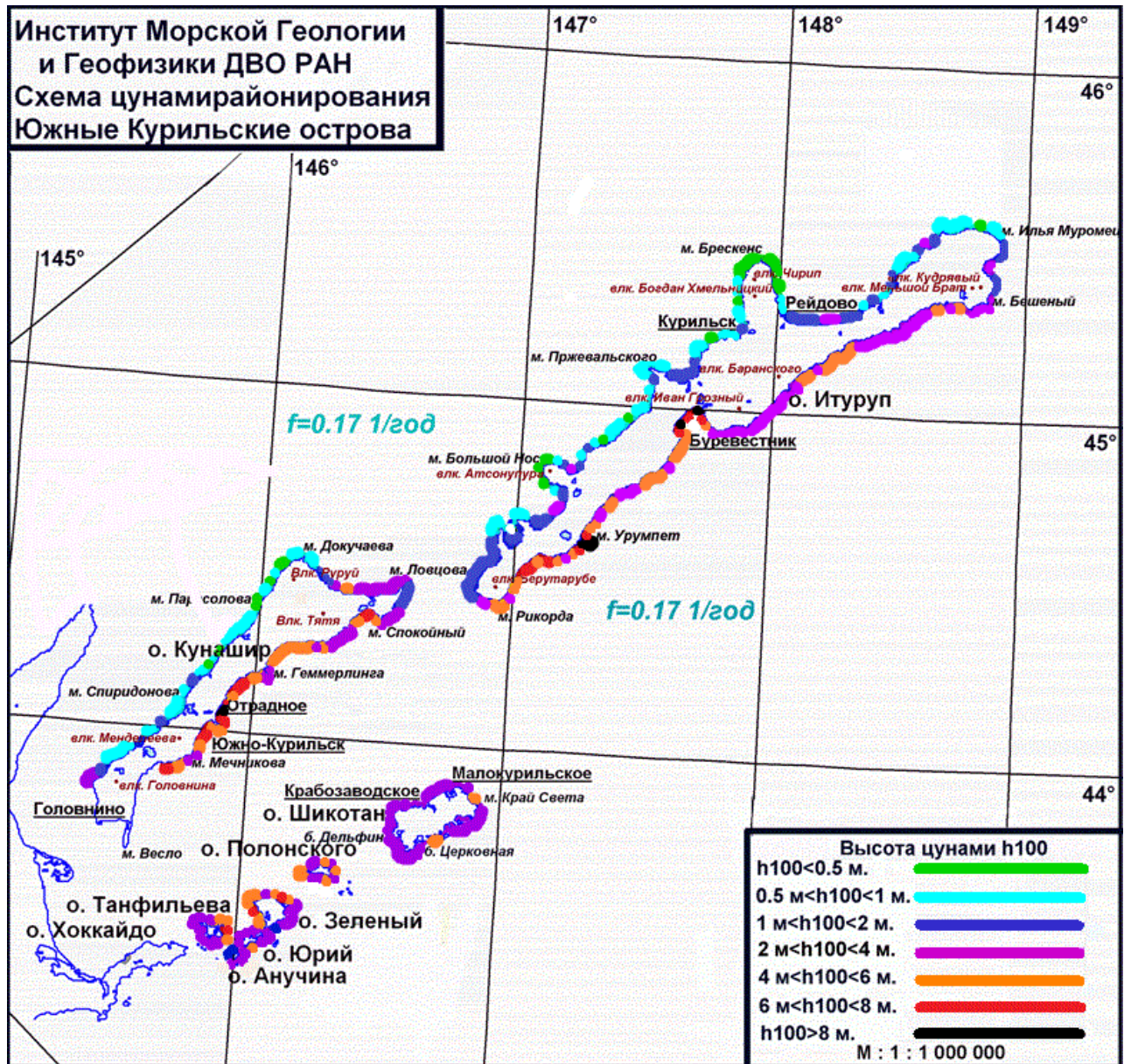


Рисунок 17 – Карта цунамиопасности побережья Южных Курильских островов по  $h_{100}$  [Цунамиопасность Южных и Средних Курил..., 2009; Оценка цунамиопасности..., 2014].

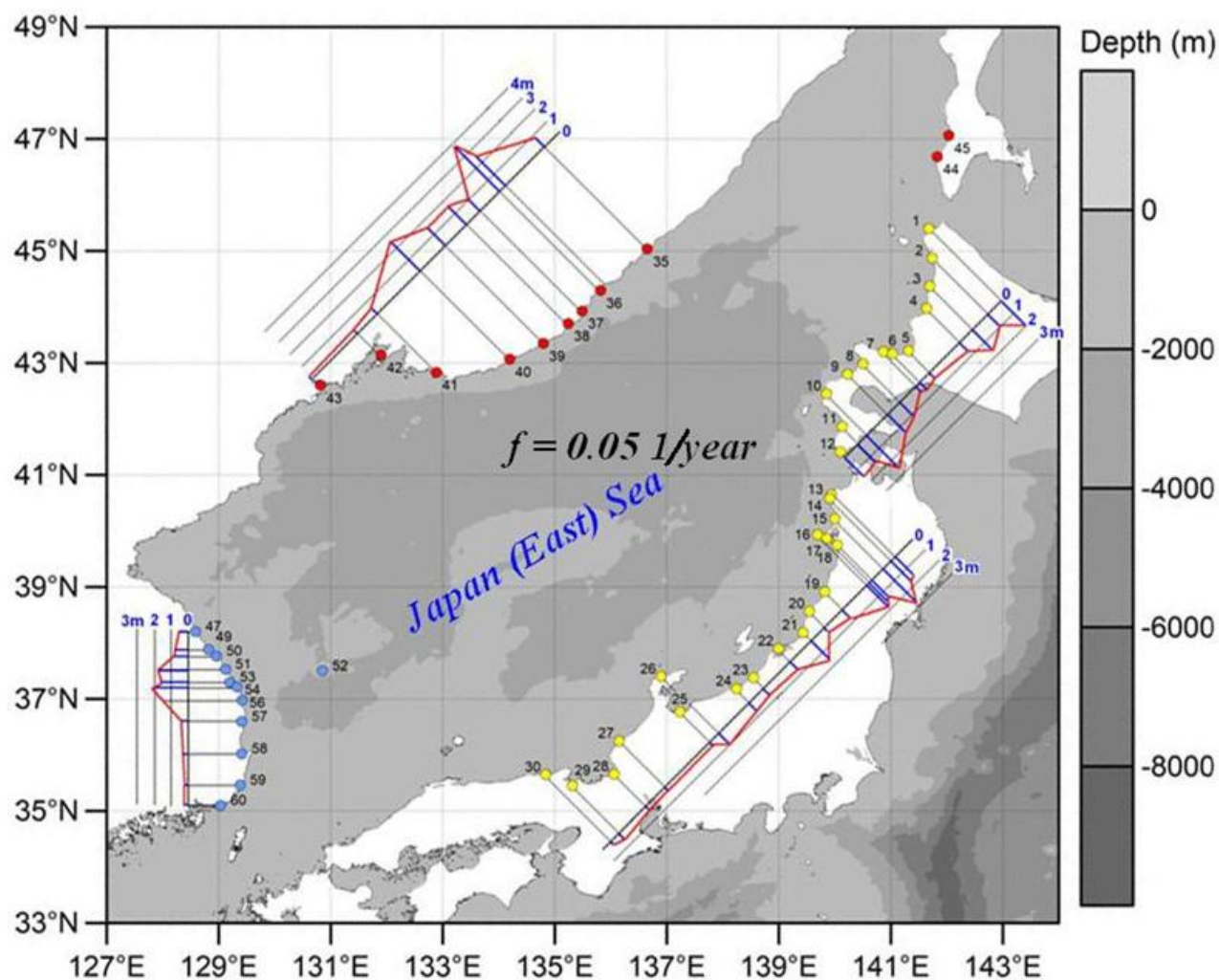


Рисунок 18 – «Скелет» карты цунамирайонирования побережья Японского моря по  $H^*$ .

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. Критически проанализирован исторический опыт развития методов количественной оценки цунамиопасности побережий, что позволило сформировать собственный подход к этой проблеме.

Главными результатами представленной диссертации являются следующие:

1. Разработана вероятностная модель повторяемости цунами Пуассоновского типа. Теоретически обоснована структура функции повторяемости цунами общего вида и выявлен физический смысл ее параметров: региональный параметр – асимптотическая частота сильных цунами  $f$ , и локальный параметр – характеристическая высота цунами  $H^*$ ,



пропорциональная среднему коэффициенту трансформации высоты цунами при ее распространении из океана к берегу. Предложен корректный метод вычисления оценок этих параметров на основе данных об исторических цунами и палеособытиях. Сделан вывод, что функция повторяемости для больших высот цунами убывает быстрее степенной функции с любым отрицательным показателем, что делает приемлемой ее экспоненциальную аппроксимацию.

2. Показано, что функция повторяемости высот цунами (распределение в точке для разных цунами в течение длительного периода) и вдольбереговое распределение высот каждого конкретного цунами в регионе формируются одним и тем же процессом – распространением волн в близбереговой и шельфовой акватории с нерегулярной батиметрией. Математически эта взаимосвязь выражается соотношением, в котором функция повторяемости является собственной функцией интегрального оператора, ядро которого – функция, описывающая вдольбереговое распределение высот цунами с модифицированными параметрами.

3. Обосновано аналитическое представление функции повторяемости цунами для малых и умеренных высот волн – это степенная функция вида  $ch^{-1}$ , с единственным параметром  $c$ , имеющим размерность скорости.

4. Сравнительная редкость масштабных и, соответственно, наиболее опасных цунами влечет за собой нехватку данных в каталогах исторических цунами, и для количественной оценки цунамиопасности с приемлемой точностью необходимо привлечение данных о палеоцунами. Разработана и продемонстрированная на примере методика корректного использования палеоданных при построении функции повторяемости высот цунами наряду с данными о заплесках исторических цунами.

5. Разработан аналитический метод коррекции высоты волны на берегу, использующий результаты численного распространения цунами, доведенного в линейной модели до некоторой искусственной «стенки» на

глубинах порядка 5-10 м. Продемонстрировано на примерах моделирования двух цунами – Окусирского 12 июля 1993 года и Чилийского 27 февраля 2010 года, что такой метод «продолжения» волнового поля до берега существенно улучшает соответствие между модельными и реально наблюдаемыми на берегу высотами цунами.

6. Теоретический анализ наката цунами на берег показал, что трансформации волны в окрестности уреза характеризуются единственным безразмерным параметром  $Bv = H\omega^2/g\alpha^2$ , где  $H$  и  $T$  — типичные высота и период волны,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  частота,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – уклон дна. Для случая наката волны без разрушения ( $Bv < 1$ ) получены приближенные формулы для экстремальных значений высот цунами и скоростей течения в близурезной зоне.

7. Построены вероятностные модели цунами-режима для ряда протяженных участков побережья Дальнего Востока России и получены оценки определяющих параметров  $f$  и  $H^*$ . Показано, что асимптотическая частота цунами  $f$  в южной части Курильской гряды наиболее высокая (0,17 случая в год). В северно-восточном направлении величина данного параметра уменьшается и составляет 0,09 – 0,1 случая в год для Северных Курильских островов и 0,07 случая в год для южного побережья Камчатки.

8. На базе вероятностной модели разработана методика построения карт цунамирайонирования, и создан ряд карт пространственного распределения вероятной высоты цунами с периодом повторяемости  $T = 50$  и 100 лет для побережья Южных и Северных Курильских островов, восточного побережья Камчатки, Сахалина и Приморья, а также Республики Корея и западного побережья Японии.

## Список цитируемой литературы

1. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
2. Голицын, Г.С. Место закона Гутенберга-Рихтера среди других статистических законов природы / Г.С. Голицын // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 138-161 (Вычислительная сейсмология; Вып. 32.)
3. Доисторические цунами на побережье Кроноцкого залива, Камчатка, Россия / Т.К. Пинегина, Л.И. Базанова, И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, А.В. Сторчеус, В.К. Гусяков // Вулканология и сейсмология. – 2000. – № 2. – С. 66-74.
4. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер; под ред. академика А.Н. Колмогорова. – Изд. 2-е. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
5. Полянин, А.Д. Справочник по интегральным уравнениям / А.Д. Полянин, А.В. Манжиров. – М.: Физматлит, 2003. – 608 с.
6. Родкин, М.В. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений / М.В. Родкин, В.Ф. Писаренко, Н. Лы, Т.А. Рукавишникова // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 4. – С. 893-904.
7. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 439 с.
8. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
9. Burroughs, S.M. Power-law scaling and probabilistic forecasting of tsunami runup heights / S.M. Burroughs, S.F. Tebbens // Pure and Applied Geophysics. – 2005. – Vol. 162. – P. 331-342.

10. Geist, E.L. Distribution of tsunami interevent times / E.L. Geist, T. Parsons // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – Vol. 35, L02612. – DOI: 10.1029/2007GL032690.
11. Gutenberg, B. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena* / B. Gutenberg, C.F. Richter. – 2nd ed. – Princeton: Princeton University Press, 1954. – 310 p.
12. Kagan, Y.Y. Earthquake size distribution: Power-law with exponent / Y.Y. Kagan // *Tectonophysics.* – 2010. – Vol. 490, No 1/2. – P. 103-114.
13. Kagan, Y.Y. Universality of the seismic-moment-frequency relation / Y.Y. Kagan // *Pure and Applied Geophysics.* – 1999. – Vol. 155. – P. 537-573.
14. Okada, M. Historical study of Tsunami at Miyako, Japan / M. Okada, M. Tada // *Tsunamis-Their Science and engineering.* – Tokyo: TERRAPUB, 1983. – P. 121-130.
15. Pelinovsky, E. Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave runup on slopes with different profiles / E. Pelinovsky, R. Mazova // *Natural Hazards.* – 1992. – Vol. 5. – P. 227-249.
16. Pisarenko, V.F. Characterization of the frequency of extreme earthquake events by the generalized Pareto distribution / V.F. Pisarenko, D. Sornette // *Pure and Applied Geophysics.* – 2003. – Vol. 160, No 12. – P. 2343-2364.
17. Wigen, S.O. Historical Study of Tsunamis at Tofino, Canada / S.O. Wigen // *Tsunamis-Their Science and Engineering.* – Tokyo: TERRAPUB, 1983. – P. 105-119.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

### **Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК**

1. **Кайстренко, В.М.** Накат и трансформация волн цунами на мелководье / В.М. Кайстренко, Е.Н. Пелиновский, К.В. Симонов // Метеорология и гидрология. – 1985. – № 10. – С. 68-75.
2. Go, Ch.N. A Two - Parameter Scheme for Tsunami Hazard Zoning / Go Ch.N., **V.M. Kaistrenko**, K.V. Simonov // Marine Geodesy. – 1985. – Vol. 9, No 44. – P. 469-476.
3. Прогноз цунамиопасности для побережья Камчатки / Ч.Н. Го, **В.М. Кайстренко**, Е.Н. Пелиновский, К.В. Симонов // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 7. – С. 74-81.
4. The 1994 Shikotan Earthquake Tsunamis / H.Yeh, V.Titov, V. Gusyakov , E. Pelinovsky ,V.Khramushin, **V. Kaistrenko** / Pure and Applied Geophysics. – 1995. – Vol. 144, No 3/4. – P. 855-874.
5. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. / А.И. Иващенко, В.К. Гусяков В.А. Джумагалиев, Г. Йех, Л.Д. Жукова, Н.Д. Золотухина, **В.М. Кайстренко** и др. // ДАН. – 1996. – Т. 348, № 4. – С. 532-538.
6. Проявление цунами 26 декабря 2004 г. на побережье севера Индонезии (по результатам международной экспедиции) / **В.М. Кайстренко**, Н.Г. Разжигаева, Ю.П. Королев и др. // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 1. – С. 123-130.
7. Особенности осадконакопления во время цунами 26 декабря 2004 года на севере Индонезии (о. Симелу, побережье в районе г. Медана о. Суматра) / Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, Е.Д. Иванова, **В.М. Кайстренко** // Океанология. – 2006. – Т. 46, № 6. – С. 929-945.
8. Осадки цунами Шикотанского землетрясения 1994 г. / Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, А.А. Харламов, А.Я. Ильев, **В.М. Кайстренко** // Океанология. – 2007. – Т. 47, № 4. – С. 622-630.

9. Проявления цунами 15.11.2006 г. на Центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б.В. Левин, **В.М. Кайстренко**, А.В. Рыбин и др. // ДАН. – 2008. – Т. 419, № 1. – С. 118-122.
10. Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril tsunami in the middle Kuril Islands / В.Т. MacInnes, Т.К. Pinegina, J. Bourgeois, N. Razjigaeva, **V. Kaistrenko**, E. Kravchunovskaya // Pure and Applied Geophysics. – 2009. – Vol. 166, No 1/2. – P. 3-36.
11. Кайстренко, В.М. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. На Тихоокеанском побережье России / **В.М. Кайстренко**, Г.В. Шевченко, Т.Н. Ивельская // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2011. – Т. 38, № 1. – С. 41-64.
12. Rapid Forecast of Tsunami Runup using Shallow-water Modeling of Tsunami Propagation in the East (Japan) Sea / Min B.I., **V.M. Kaistrenko**, E.N. Pelinovsky, Choi B.H. // Journal of Coastal Research. – 2011. – Vol. 64. – P. 1135-1139.
13. Rapid forecasting of tsunami runup heights from 2-D numerical simulations / Choi B.H., **V. Kaistrenko**, Kim K.O. et al. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2011. – Vol. 11. – P. 707-714.
14. Палеоцунами в Южно-Курильском регионе в голоцене: особенности проявления, осадки, возраст, повторяемость, воздействие на геосистемы / Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, **В.М. Кайстренко** и др. // Вестник ДВО РАН. – 2011. – № 2. – С. 59-69.
15. **Kaistrenko, V.** Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast / V. Kaistrenko // Pure and Applied Geophysics. – 2011. – Vol. 168, No 11. – P. 2065-2069.
16. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice / **Victor Kaistrenko**, Nadezhda Razjigaeva, Andrey Kharlamov, Alexander Shishkin // Pure and Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 170, No 6/8. – P. 1103-1114.

17. Coastal Sedimentation Associated with the Tohoku Tsunami of 11 March 2011 in South Kuril Islands, NW Pacific Ocean / N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, E. D. Ivanova, A. A. Kharlamov, **V. M. Kaistrenko**, A. A. Shishkin // *Pure and Applied Geophysics*. – 2013. – Vol. 170, No 6/8. – P 1081-1102.

18. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The Key Event to Understanding Tsunami Sedimentation on the Coasts of Closed Bays of the Lesser Kuril Islands / N.G. Razjigaeva, L.A. Ganzey, T.A. Grebennikova, E. D. Ivanova, A. A. Kharlamov, **V. M. Kaistrenko** et al. // *Pure and Applied Geophysics*. – 2014. – Vol. 171, No 12. – P. 3307-3320.

19. Хронология цунами, оставивших следы в разрезах береговых низменностей Восточного Приморья / Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Ю. Нишимура, **В.М. Кайстренко** и др. // *ДАН*. – 2014. – Т. 459, № 5. – С. 635-638.

20. **Kaistrenko, V.** Tsunami Recurrence Function: Structure, Methods of Creation, and Application for Tsunami Hazard Estimates / V. Kaistrenko // *Pure and Applied Geophysics*. – 2014. – Vol. 171. – P. 3527-3538.

21. Analytical Rapid Prediction of Tsunami Run-up Heights: Application to 2010 Chilean Tsunami / Byung Ho Choi, Kyeong Ok Kim, Jin-Hee Yuk, **Victor Kaistrenko**, Efim Pelinovsky // *Ocean and Polar Research*. – 2015. – Vol. 37, No 1. – P. 1-9.

### Статьи в трудах международных конференций

1. **Kaistrenko, V.** Probability model of tsunami runup and long - term prediction of tsunami heights / V. Kaistrenko // *Tsunamis: Their Science and Hazards Mitigation Proceedings International Tsunami Symposium (July 31 - August 3, 1989)*. – Novosibirsk, 1990. – P. 249-253.

2. Chung, J.Y. Tsunami hazard estimation for eastern Korean coast / Chung J.Y., Go C.N., **V.M. Kaistrenko** // *Tsunami'93, Wakayama, Japan, August 23-27,*

1993.- Wakayama, Japan, 1993. – P. 409-422. – (Proceedings of the IUGG / IOC International Tsunami Symposium).

3. Kaistrenko, V. A Tsunami hazard parameter for Zhupanovo, Kamchatka calculated using historical and paleotsunami data / **V. Kaistrenko**, T. Pinegina // Proceedings, International Tsunami Symposium, Seattle, Washington, 7–10 August 2001. – Seattle, 2001. – P. 349-353.

4. A new paradigm of tsunami safety solution / **V. Kaistrenko**, M. Klyachko, I. Nudner, E. Pelinovsky // Proceedings, International Tsunami Symposium, Seattle, Washington, 7–10 August 2001. – Seattle, 2001. – P. 303-313

5. Kaistrenko, V.M. Evaluation of tsunami hazard for the Southern Kamchatka coast using historical and paleotsunami data / **V.M. Kaistrenko**, T.K. Pinegina, M.A. Klyachko // Submarine Landslides and Tsunamis: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Istanbul, Turkey, 23-26 May 2001 / eds.: A.C. Yalciner, E. Pelinovsky, C.E. Synolakis, E. Okal. – Kluwer Publ., Springer, 2003. – P. 217-228.

6. **Kaistrenko, V.M.** Exact solutions for wave run-up description on a sloping beach / V.M. Kaistrenko // Избранные вопросы современной математики: тезисы международной научной конференции, приуроченной к 200-летию со дня рождения великого немецкого математика К.Г. Якоби и 750-летию со дня основания г. Калининграда (Кёнигсберга), (4-8 апр. 2005 г., Калининград) / Калинингр. гос. ун-т; ред. С.И. Ишанов. – Калининград: Издательство КГТУ, 2005. – С. 83-86.

#### **Статьи в продолжающихся изданиях**

1. Kaistrenko, V. 1952 North Kuril Tsunami: New Data from Archives / **V. Kaistrenko**, V. Sedaeva // Tsunami Research at the End of a Critical Decade / ed. G.T. Hebenstreit. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 91-102 (Advances in Natural and Technological Hazards Research. Vol. 18).



2. Holocene Tsunami Traces on Kunashir Island, Kurile Subduction Zone / A.Ya. Iliev, **V.M. Kaistrenko**, E. Gretskeya et al. // *Tsunamis. Case Studies and Recent Developments* / ed. Kenji Satake. – Kluwer Publ., Springer, 2005. – P. 171–192 (*Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Vol. 23).

### Прочие публикации

1. Цунами на тихоокеанском побережье СССР / Го Чан Нам, А.И. Иващенко, **В.М. Кайстренко**, А.А. Поплавский, К.В. Симонов // *Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы* / ред.: К.Ф. Сергеев, М.Л. Красный. – Ленинград: ВСЕГЕИ, 1987. – С. 36-37.

2. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР / Го Чан Нам, **В.М. Кайстренко**, Е.Н. Пелиновский, К.В. Симонов // *Тихоокеанский ежегодник*. – Владивосток: ДВО АН, 1988. – С. 9-16.

3. Analytical theory for tsunami run up on a smooth slope / **V.M. Kaistrenko**, E.N. Pelinovsky, R.Kh. Mazova, K.V. Simonov // *Sci. of Tsunami Hazards*. – 1991. – Vol. 9, No 2. – P. 115-127.

4. Проявление цунами 4 октября 1994 года на Шикотане / **В.М. Кайстренко**, В.К. Гусяков и др. // *Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России*. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – Т. VIII. – С. 55-73. – (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией).

5. Следы цунами в отложениях Южных Курил / Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей, Т.А. Гребенникова, А.А. Харламов, А.Я. Ильев, **В.М. Кайстренко**, Е.В. Тихончук // *Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы* / под общ. ред. Н.П. Лаверова. – Том 1. Сейсмические процессы и катастрофы / отв. ред. тома А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 86-104.

6. **Кайстренко, В.М.** Цунами. Карта. Масштаб 1:5 000 000 / В.М. Кайстренко, А.И. Иващенко // Атлас Курильских островов / ред. кол.: академик РАН В.М. Котляков (председатель), академик РАН П.Я. Бакланов, Н.Н. Комедчиков (гл. ред.) и др.; отв. ред.-картограф Е.А. Федорова; Российская академия наук, Институт географии РАН, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. – М.; Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. – С. 132.

7. Цунамиопасность Северных Курил. Карта. Масштаб 1:1 000 000 / **В.М. Кайстренко**, А.И. Иващенко, В.Н. Храмушин, Д.Е. Золотухин // Атлас Курильских островов / ред. кол.: академик РАН В.М. Котляков (председатель), академик РАН П.Я. Бакланов, Н.Н. Комедчиков (гл. ред.) и др.; отв. ред.-картограф Е.А. Федорова; Российская академия наук, Институт географии РАН, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. – М.; Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. – С. 137.

8. Цунамиопасность Южных и Средних Курил. Карта. Масштаб 1:1 000 000 / **В.М. Кайстренко**, А.И. Иващенко, В.Н. Храмушин, Д.Е. Золотухин // Атлас Курильских островов / ред. кол.: академик РАН В.М. Котляков (председатель), академик РАН П. Я. Бакланов, Н.Н. Комедчиков (гл. ред.) и др.; отв. ред.-картограф Е.А. Федорова; Российская академия наук, Институт географии РАН, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. – М.; Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. – С. 134-135.

9. Оценка цунамиопасности и построение карт цунамирайонирования для побережья Сахалинской области. Проблема нормативов / **В.М. Кайстренко**, М.А. Клячко, В.Н. Храмушин, Д.Е. Золотухин // Строительная индустрия Сахалина. – 2014. – № 19. – С. 38-43.