

Оценка цунамиопасности для тихоокеанского побережья России

*В. М. Кайстренко, В. Н. Храмушин, Д. Е. Золотухин*¹
Южно-Сахалинск

В работе развита вероятностная модель заплесков цунами пуассоновского типа, пригодная для статистического долгосрочного прогноза цунамиопасности. Из анализа натуральных данных о проявлениях исторических цунами получены оценки параметров модели – частот повторяемости цунами и характеристических высот. Распределение этих параметров вдоль побережья Курильских островов и Камчатки является основой построенных карт цунамирайонирования.

Ключевые слова: цунами, высота волны, повторяемость, вероятностная модель, цунамиопасность, цунамирайонирование

Tsunami hazard evaluation for the Pacific coast of Russia. *Victor M. Kaistrenko, Vasily N. Khramushin, Dmitry E. Zolotukhin. Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*

The probabilistic model for tsunami activity of Poissonian type was created. This model was used as the basement for statistical long-periodical tsunami hazard evaluation. Using observational tsunami heights related to historical events the parameters of probabilistic model were estimated. Distribution of these parameters along the Russian Pacific coast are used as the basement for creation of tsunami hazard maps.

Keywords: tsunami, wave height, recurrence, probabilistic model, tsunami hazard, tsunami hazard zoning

Введение. Исторические цунами на дальневосточном побережье России

Цунами – опасное природное явление, представляющее собой волновой процесс в океане, вызываемый, как правило, сильным подводным землетрясением.

После катастрофического цунами в ноябре 1952 г, приведшего к гибели нескольких тысяч человек и практически уничтожившего город Северо-Курильск и почти все поселки на побережье северных Курильских островов и юга Камчатки (Цунами 4-5 ноября, 1958; Kaistrenko and Sedaeva, 2001), до настоящего времени на дальневосточном побережье страны было зарегистрировано более 40 цунами, причем в 10-ти случаях высота волны была более 5 м, а в 1952, 1963, 1969, 1994 и 2006 гг. в отдельных пунктах отмеча-

¹ *Кайстренко Виктор Михайлович, Храмушин Василий Николаевич, Золотухин Дмитрий Евгеньевич, лаборатория цунами Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.*



лись волны высотой до 15 м и выше. Наличие в прибрежной зоне Дальнего Востока России населенных пунктов, портов и производства, а также планов дальнейшего освоения этого региона делает задачу оценки цунамиопасности чрезвычайно актуальной.

Цунами нередко обладают огромной разрушительной силой, которая определяется высотой волны и скоростью потока. Фотография примера воздействия цунами 1952 года приведена ниже.



Рис. 1. Двухэтажный дом в Северо-Курильске, сорванный цунами 1952 года с фундамента и перенесенный на другое место (Kaistrenko and Sedaeva, 2001)

Ближайшие к тихоокеанскому побережью России очаги цунами расположены на материковом склоне Тихоокеанской глубоководной впадины (рис. 2–3).

Методы количественной оценки цунамиопасности

Все дальневосточное побережье России является цунамиопасным. Однако уровень этой опасности различен, что определяется специальным районированием конкретных участков побережья. Первая попытка количественного учета цунамиопасности для побережья России была предпринята в 60-е годы прошлого столетия (Иконникова, 1963). По мере развития представлений о проявлениях цунами совершенствовались и методы цунамирайонирования (Атлас, 1978; Пелиновский, Плинк, 1980; Количественная оценка, 1988; Храмушин, Шевченко, 1994; Kaistrenko et al., 2003, Атлас, 2005).

Первые схемы цунамирайонирования содержали карты вдольберегового распределения так называемых «максимальных» высот цунами. Исходным материалом для таких карт служили грубые оценки максимальных магнитуд землетрясений. Спустя некоторое время стало ясно, что, во-первых, имеется принципиальная неустойчивость оценок максимальных магнитуд землетрясений (Писаренко, Родкин, 2009) и, во-вторых, стохастизация высот цунами при его распространении над неровным дном приводит к сильной изменчивости вдольбереговых распределений как натуральных высот цунами, так и численных (Choi et al., 2002). Таким образом, мы не можем ус-

тойчиво оценить реальные **физические** ограничения для максимальных высот цунами. Кроме того, ряд зафиксированных максимальных высот заплесков при исторических цунами (30 м при цунами 1737 г. на Камчатке, 40 м на о. Кюсю в 1792 г, 38 м на Алеутских островах в 1825 г, 31,7 м при Окусирском цунами 1993 г в Японском море, 34 м при Индонезийском цунами 2004 г) значительно превышает большинство прогнозных оценок.

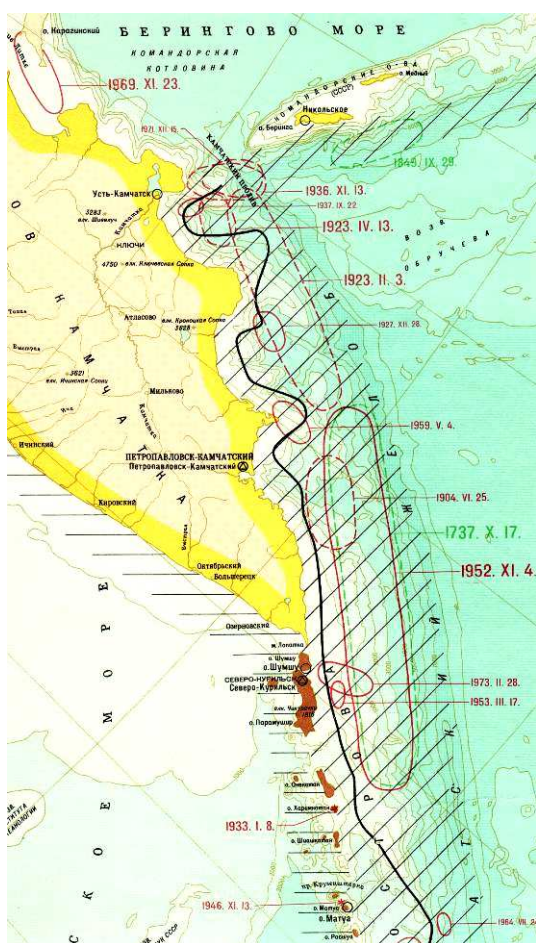


Рис. 2. Очаги цунами у побережья п-ова Камчатка (Геолого-геофизический атлас..., 1987)

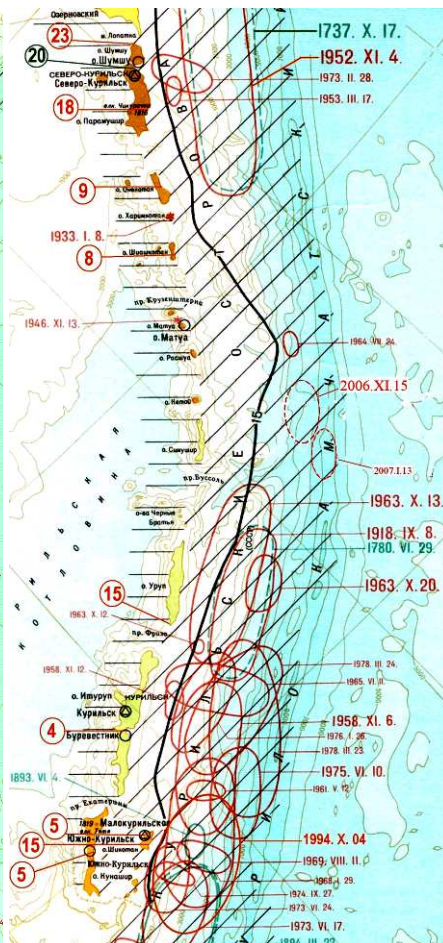


Рис. 3. Очаги цунами у побережья Курильских островов (Геолого-геофизический атлас..., 1987)

Поэтому новые схемы цунамирайонирования стали базироваться на вероятностной модели цунамиактивности (Kaistrenko, 1990, Chung at al., 1993, Kaistrenko at al, 2003; Кайстренко и др., 2009а,б). Такой подход напрямую связан с принятым вероятностным определением опасности и риска. Поскольку последовательность сильных цунами является практически



пуассоновской, в качестве опасности, связанной с уровнем h , следует использовать величину, равную вероятности превышения этого уровня:

$$R(h) = 1 - P_0(> h) = 1 - e^{-\varphi(h) \cdot t}.$$

Нижеприведенная таблица 1 дает представление о характере проявлений некоторых цунами.

Таблица 1
Проявления наиболее значительных цунами на
дальневосточном побережье России за период с 1952 года

Дата и время	Широта ° Долгота °	Магнитуда /глубина, км	Районы проявления цунами	Высота заплеска, м
1952.11.04, 16:58:22	52.75 с.ш., 159.5 в.д.	8.2 / 30	Северо-Курильск Китовый	15 18,4
1958.11.07, 22:58:12	44.5 с.ш., 148.5 в.д.	8.2 / 90	о. Кунашир о. Итуруп о. Шикотан	– 2–3 – 3–4 – 4
1960.05.22, 19:11:17	41.0 ю.ш., 73.5 з.д.	8.3	побережье Чили бух. Русская Северо-Курильск Малокурильское	до 22,6 6–7 4,7 4,0
1963.10.13, 05:17:57	44.8 с.ш., 149.5 в.д.	8.1 / 60	о. Итуруп о. Уруп	4 – 5 4 – 5
1963.10.20, 00:53:11	44.8 с.ш., 150.2 в.д.	7.5 / 20	о. Итуруп м. Ван-дер-Линда	7 – 8 10-15
1969.08.12, 08:27	43.6 с.ш., 147.8 в.д.	8.2 / 40	бух. Димитрова бух. Церковная г. Корсаков	4 5 0,25
1969.11.23	57.8 с.ш., 163.6 в.д.	7.7 / 30	Устье р.Ольховая	10–15
1971.09.05, 18:35	46°33'6 с.ш., 141°11'4 в.д.	7.1 / 17	г. Горнозаводск п. Шебунино г. Холмск	2,0 2,0 0,4
1993.07.13, 01:19	38.8 с.ш., 139.5 в.д.	7.7 / 17	о. Окусири бух. Кит г. Холмск	31,7 4 0,29
1994.10.05, 00:24	43.0 с.ш., 148.0 в.д.	8.3 / 14	о. Шикотан Малокурильское бух. Церковная о. Кунашир 15 км к северу от Ю-Курильска	2,0-3,8 3,0-15,6 8,7
2006.11.15	46.607° с.ш., 153.23° в.д.	8.3 / 30	о. Симушир, бух. Душная о. Магуа, Сарычево	4–20 6,1–21,9

Функция $\varphi(h)$ в экспоненте носит название функции повторяемости цунами $\varphi(h) = \frac{N(\text{высота} \geq h)}{T}$, которая по определению равна средней частоте



те цунами с высотой волны в данном месте, равной или превышающей заданное пороговое значение h . Эта функция является монотонно убывающей и при $h > 0,5$ м хорошо аппроксимируется экспонентой (Kaistrenko, 1990):

$$\varphi(h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*}}$$

Функция повторяемости цунами зависит от двух эмпирических параметров. Параметр f имеет физический смысл частоты сильных цунами и является региональным, медленно изменяющимся от одной до другой точки побережья, поскольку все сильные цунами проявляются во всех пунктах региона.

Параметр H^* – так называемая характеристическая высота цунами, имеющая размерность длины. Она характерна для каждого конкретного пункта побережья и имеет сильную вдольбереговую изменчивость.

Ранжируем по величине ряд высот цунами, наблюдавшихся в некотором пункте в течение времени T : $h_1 \geq h_2 \geq \dots \geq h_k \geq \dots \geq h_n$. Использование метода наименьших квадратов вместе с априорными величинами логарифмов ранговых частот и их дисперсий

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

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

позволяет получить корректные оценки параметров f и H^* , а также оценки дисперсии получаемых параметров модели $D(f)$ и $D(H^*)$ для каждого пункта с достаточно представительным рядом данных о высотах исторических цунами. Ниже на рис. 4 приведена эмпирическая функция повторяемости для Южно-Курильска, построенная по историческим данным с 1952 г.

При этом получились следующие значения параметров и стандартные отклонения: $f=0,19$ 1/год; $\sigma(\ln(f))=0,31$; $H^*=1,3$ м; $\sigma(H^*)/H^*=0,36$.

Прежние цунамиопасности создавались достаточно давно, они носят обзорный характер и недостаточны детализованы для практического использования. По этой причине требуется построение новых, более точных и детальных карт, отвечающих современным требованиям.

Метод построения новых карт содержит два этапа. Сначала на основе натурального материала о заплесках цунами в нескольких базовых пунктах строится региональная функция повторяемости. При этом и оценивается частота сильных цунами f в регионе и характеристическая высота цунами

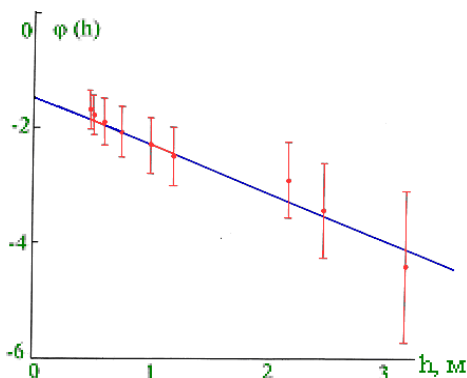


Рис. 4. Эмпирическая функция повторяемости для Южно-Курильска, с указанием стандартных отклонений $\sigma_k=(d_k)^{1/2}$ в качестве априорных погрешностей



H^* для всех базовых пунктов. Затем проводится численное моделирование цунами с наиболее значительными проявлениями, которые согласно натурному материалу определяют цунамиопасность региона. При хорошей сопоставимости натуральных и численных высот цунами в базовых пунктах результаты численного моделирования можно распространить на весь регион и использовать их для построения функций повторяемости в каждом пункте численной модели при известной из натуральных данных частоте сильных цунами f в регионе.

Вероятностная модель цунамиактивности для района Южных Курильских островов

Известно, что качество исторических материалов о проявлениях цунами сильно различается для различных районов, и наиболее представительные данные относятся к району Южных Курильских островов (рис. 5). Сводные данные о проявлениях цунами приведены в табл. 1.



Рис. 5. Южные Курильские острова. Красными точками отмечены места замеров высоты цунами, использованных при расчете эмпирических функций повторяемости

Для некоторых пунктов (Южно-Курильска, Буревестника, Курильска и Малокурильского) достаточно данных для построения функций повторяемости. Поскольку слабые цунами не представляют опасности, функции повторяемости строились для событий с высотой волны в данном месте, равной или превышающей 0,5 м (рис. 6).

Видно, что частота сильных цунами практически одна и та же в пределах региона. Это же иллюстрирует и рис. 6: все графики практически сходятся в одну точку оси ординат со значением логарифма частоты сильных цунами.

Поскольку частоту сильных цунами можно считать одной и той же для всего района Южных Курильских островов, этот факт позволяет создать и проанализировать сводную модель для Южно-Курильского региона, включающую 18 пунктов с общей для них частотой сильных цунами f . Результаты анализа приведены в табл. 3.

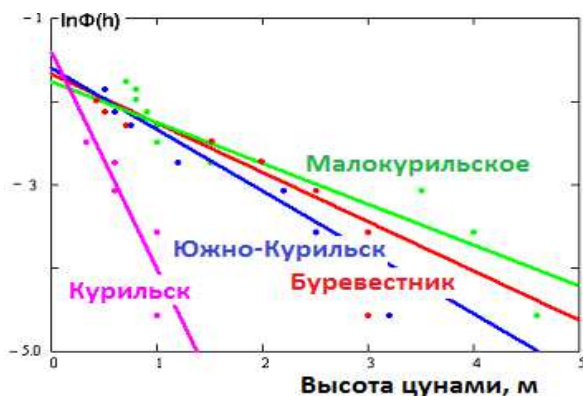


Рис. 6. Примеры эмпирических функций повторяемости высот цунами для региона Южных Курильских островов

2

Таблица 2. Параметры локальных функций повторяемости

	$\ln f$	f , 1/год	$\sigma(\ln(f))$	H^* , м	$\sigma(H^*)/H^*$
Малокурильское	-1,77	0,17	0,23	2,1	0,34
Южно-Курильск	-1,65	0,19	0,31	1,32	0,36
Буревестник	-1,71	0,18	0,30	1,74	0,37

Таблица 3. Параметры цунамиактивности для 18 пунктов Южных Курильских островов с единым для региона значением частоты сильных цунами $f = 0,17$ 1/год с «относительной погрешностью» $\sigma(\ln(f)) = 0,13$

№	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
9	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

Данная модель-18 позволила вычислить частоту сильных цунами f для всего региона с заметно меньшей относительной погрешностью $\sigma(\ln(f))=0,13$ по сравнению со значениями этого же параметра, полученными в частных моделях.



Построение карт цунамирайонирования для района Южных Курильских островов

На большей части побережья данные о проявлениях цунами отсутствуют, поэтому для определения характеристической высоты цунами необходимо привлечение методов численного моделирования цунами. Для этого нужно промоделировать исторические цунами, заплески которых использовались при создании базовой модели на основе натуральных данных.

На сеточной модели с пространственным шагом 0,5' (около 1 км) было проведено численное моделирование пяти сильнейших цунами, определяющих цунамиактивность этого региона в течение второй половины столетия: 1958.11.06, 1960.05.22, 1963.10.13, 1969.08.11, 1994.10.04. Для численного моделирования цунами в данной работе был использован интерактивный программный комплекс, разработанный В. Н. Храмушиным [Поплавский и др., 1997].

После чего, сравнив модельные и реально наблюдавшиеся заплески для тех точек побережья, где последние известны, внести корректировку (откалибровать) результаты численного моделирования и рассчитать модельные H^* и h_{100} для всего интересующего нас побережья.

Коэффициент калибровки вычислялся по формуле $k_k = \frac{h_{набл}^2}{h_{эксп}^2}$, он име-

ет физический смысл амплитуды волны в очаге цунами, поскольку в проведенных вычислительных экспериментах использовались источники с единичной (1 м) амплитудой, умножение величины модельного заплеска на коэффициент k_k позволяет приблизить его к реально наблюдавшемуся. После этого откорректированные модельные заплески использовались для расчета модельных характеристических высот цунами аналогично тому, как они вычислялись на основе только натуральных данных.

Таблица 4. Сопоставление рассчитанных и натуральных (жирный шрифт) данных и коэффициенты корреляции пар таких рядов для Южных Курильских островов

	События				
	6.11.58	22.5.60	13.10.63	8.11.69	6.10.94
Кэфф. корреляции	0.89	0.98	0.94	0.85	0.86
Кэфф. калибровки	1.7	0.6	0.9	0.6	1.6

Такой «линейный» подход для максимальных заплесков оправдан наличием точного результата для нормального наката волн на плоский откос: величины локальных максимумов для наката в нелинейной модели совпадают с таковыми для колебаний уровня на урезе в линейной модели (Pelipovsky and Mazova, 1992).

Коррелированность натуральных и рассчитанных рядов данных оказалась достаточно высокой.



чение амплитуды цунами, вычисленное в узле сетки, может относиться к любому из натуральных данных в пределах шага сетки (~ 1 км), имеющих обычно значительный разброс.

Для карт цунамирайонирования любого пункта побережья удобно наряду с H^* или вместо нее использовать, по аналогии с картами сейсмоопасности, уровень h_{100} , который высота цунами превышает в среднем 1 раз в столетие.

$$h_{100} = H^* \cdot \ln(100 \cdot f)$$

На рис. 7 приведена карта цунамирайонирования побережья Южных Курильских островов по h_{100} .

Построение карт цунамирайонирования для района Северных Курильских островов

Модель цунами-режима для Северных Курильских островов построена по той же схеме, что и модель для Южных Курильских островов.

Район Северных Курильских островов значительно беднее натурными данными о проявлениях цунами. За вторую половину столетия достаточно подробно представлены данные по самому сильному цунами 1952 года с катастрофическими последствиями. Им заметно уступают данные, связанные со следующим по уровню проявлений Чилийскому цунами 1960 г. Данные по всем остальным цунами относятся практически только к мареографным пунктам на островах Парамушир (Северо-Курильск) и Матуа и отчасти – к пункту Бабушкино на о. Шумшу.

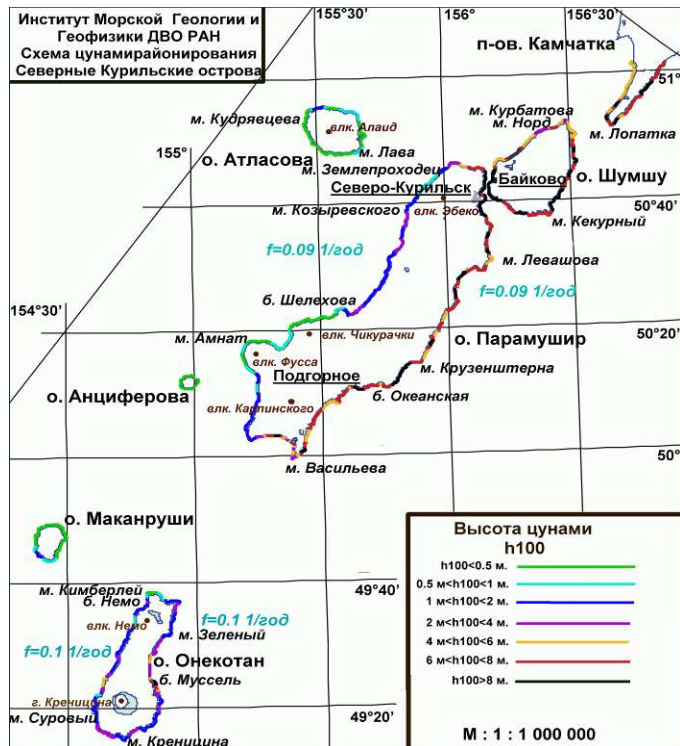
Для островов Парамушир и Шумшу частота сильных цунами $f = 0.09$ 1/год; для о. Онекотан и южнее $f = 0.1$ 1/год. Цунами-режим сильных событий для Северо-Курильска (а также островов Парамушир, Шумшу и Онекотан) определяется всего двумя событиями – цунами 1952 и 1960 годов, которые и требуется промоделировать. Тем более что все остальные цунами, отмеченные на этих островах, – довольно слабые и, соответственно, описаны фрагментарно, что не позволит калибровать высоту волны в источнике по таким натурным данным.

Таблица 5. Корреляция натуральных и расчетных вертикальных заплесков цунами для Северных Курильских островов

Пункты	4 ноября 1952 г	23 мая 1960 г
Кoeff. корреляции	0.89	0.88
Амплитуда в источнике k_k	2.7	0.65

Поскольку в проведенных вычислительных экспериментах использовались источники с единичной (1 м) амплитудой, умножение величины модельного заплеска на коэффициент k_k позволяет приблизить его к реально наблюдавшемуся (при моделировании Чилийского цунами использовалась входящая волна единичной амплитуды). На заключительном этапе, после этого, откорректированные модельные заплески использовались для расчета

модельных характеристических высот H^* и уровней h_{100} (высоты цунами, ожидаемой в среднем 1 раз в столетие) для всего побережья при известной частоте сильных цунами f . Результаты представлены ниже на рис. 8 в виде карты цунамирайонирования (карты вдольберегового распределения уровня h_{100} цунами) Северных Курильских островов.



2

Рис. 8. Карта цунамиопасности побережья Северных Курильских островов по h_{100} (Кайстренко и др., 2009б).

Обращает на себя внимание то, что одним из наиболее цунамиопасных районов северных Курильских островов являются берега Второго Курильского пролива – самый густонаселенный район Северных Курил (что с катастрофическими последствиями подтвердилось во время цунами 05.11.1952 г).

Построение карт цунамирайонирования для Камчатки

Цунами на Камчатке не раз приводили к катастрофическим последствиям. Однако, несмотря на примерно 250-летнюю летописную историю, надежно и достаточно полно описаны цунами только начиная с 1952 г. Остальные цунами описаны фрагментарно.

Анализ указанных выше данных по описанной схеме позволил оценить частоту сильных цунами для исследуемого побережья Камчатки с не-



высокой относительной погрешностью: $f=0,07$ 1/у, $\sigma(\ln(f))=0,2$ и характеристические высоты H^* для 27 пунктов (Kaistrenko at al., 2003). Оценки этих параметров и их стандартные отклонения приведены в таблице ниже. Видно, что частота сильных цунами оценивается достаточно надежно ($\sigma(\ln(f))=0,2$), но априорные погрешности характеристических высот H^* достаточно велики.

Таблица 6. Параметры однородной вероятностной модели цунами-режима для побережья Камчатки и близлежащих островов по историческим данным с 1952 г

$\ln(f)$	$\sigma(\ln(f))$	f_1 , 1/год	f , 1/год	f_2 , 1/год
-2.65	0.2	0.06	0.07	0.09

Пункт	$-1/H^*$	$\sigma(1/H^*)$	H_1 , м	H^* , м	H_2 , м	h_{100} , м	$\sigma(H^*)/H^*$
Усть-Камчатск (город)	-1.99	1.4	0.29	0.5	1.7	0.98	0.7
Усть-Камчатск (коса)	-0.43	0.26	1.46	2.35	6.01	4.58	0.61
б. Ольга	-0.15	0.09	4.14	6.67	17.14	13.02	0.61
Жупаново	-0.26	0.17	2.35	3.86	10.69	7.53	0.64
б. Моржовая	-0.15	0.1	4.12	6.79	19.4	13.25	0.65
м. Шипунский	-0.16	0.1	3.77	6.14	16.47	11.98	0.63
Налычево	-0.25	0.19	2.28	3.95	14.83	7.71	0.73
Халактырка	-0.36	0.22	1.7	2.75	7.15	5.36	0.62
м. Безымянный	-0.35	0.26	1.63	2.82	10.52	5.5	0.73
б. Раковая	-0.59	0.43	0.98	1.69	6.27	3.29	0.73
Петропавловск-Камчатский	-1.38	0.88	0.44	0.72	1.98	1.41	0.63
б. Тарья	-0.63	0.39	0.98	1.58	4.11	3.08	0.62
м. Маячный	-0.33	0.2	1.88	3.04	7.94	5.93	0.62
б. Вилючинская	-0.19	0.12	3.26	5.32	14.31	10.37	0.63
б. Саранная	-0.25	0.19	2.28	3.95	14.83	7.71	0.73
б. Жировая	-0.22	0.16	2.6	4.51	16.8	8.8	0.73
б. Русская	-0.15	0.1	3.97	6.64	20.36	12.95	0.67
м. Поворотный	-0.18	0.13	3.26	5.64	21.11	11.01	0.73
б. Асача	-0.25	0.19	2.28	3.95	14.84	7.71	0.73
б. Ходутка	-0.26	0.28	1.87	3.87	∞	7.56	1.07
о. Уташуд	-0.21	0.15	2.8	4.85	18.19	9.47	0.73
м. Лопатка (вост.)	-0.21	0.13	2.96	4.84	13.27	9.44	0.64
м. Лопатка (зап.)	-0.35	0.26	1.63	2.82	10.52	5.5	0.73
п. Озерновский	-0.35	0.26	1.63	2.82	10.52	5.5	0.73
Северо-Курильск	-0.13	0.08	4.84	7.87	21.08	15.36	0.63
о. Медный	-0.77	0.83	0.62	1.3	∞	2.53	1.07
Никольское	-0.3	0.21	1.97	3.35	11.12	6.53	0.7

За последнее столетие на побережье Камчатки проявились только три события с заплесками опасной величины. Это Камчатское цунами 4 ноября 1952 г, Чилийское цунами 22 мая 1960 г и Озерновское цунами 22 ноября 1969 г. Поэтому проявление именно этих цунами изучалось на численных моделях.

Коэффициенты корреляции натуральных и численных высот цунами для указанных цунами оказались равны соответственно 0,96, 0,92 и 0,83.

Обращает на себя внимание, что численная модель повторяет особенность натурального очага (локальный аномальный максимум у устья р. Ольховая) и также формирует несколько сдвинутый к югу локальный аномальный максимум вблизи устья р. Озерная. Без этой особенности коэффициент корреляции становится равным 0,98.

На рис. 9 приведена карта цунамирайонирования побережья полуострова Камчатка, построенная на основе натуральных данных и вдольбереговых распределений скорректированных высот цунами, полученных при моделировании трех вышеуказанных цунами

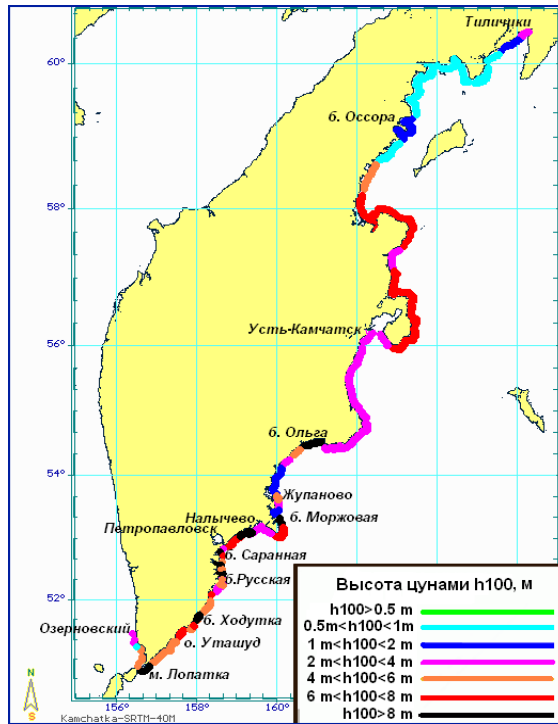


Рис. 9. Карта цунамиопасности побережья для тихоокеанского побережья полуострова Камчатка по h_{100} [Кайстренко и др., 2009б]

Заклучение

Построены модели цунами-режима для Южных, Северных Курильских островов и Камчатки. Показано, что средняя частота цунами в южной части Курильской гряды наиболее высока (0,17 случая в год). В северном направлении величина данного параметра уменьшается и составляет 0,09 – 0,1 случая в год для Северных Курил и 0,07 случая в год – для Камчатки.

На основе численного моделирования всех сильнейших цунами для каждого из районов построены карты цунамиопасности для периода повторяемости 100 лет на основе формулы $h_{100} = H * \ln(100 \cdot f)$. Данная характеристика, однако, связана с серьезным риском, поскольку этот уровень будет превзойден цунами в 63 % столетних периодов.

Разумнее, наоборот, исходить из допустимого уровня опасности R для данного периода t , и по нему оценивать соответствующий «безопасный» уровень.

$$H_{t,R} = H * (\ln(ft) - \ln(-\ln(1-R)))$$



Литература

1. Атлас максимальных заплесков волн цунами. Под ред. *Соловьева С. Л.* Владивосток: ДВНИГМИ, МГИ АН УССР, 1978 с.
2. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации, МЧС России, 2005. 271 с.
3. Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы // Под ред. *К. Ф. Сергеева, М. Л. Красного.* Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 36 листов
4. *Иконникова Л. Н.* Атлас цунами. М.: ДВНИГМИ, 1963.53.
5. *Кайстренко В. М., Пелиновский Е. Н., Симонов К. В.* Накат и трансформация волн цунами на мелководье / Метеорология и гидрология, 1985, № 10. С. 68–75.
6. *Кайстренко В. М., Иващенко А. И., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Цунамиопасность Южных и Средних Курил. Карта. Масштаб 1:1 000 000 / Атлас Курильских островов / Редкол. 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. –516 с.: ил., карт. –С. 134–135.
7. *Кайстренко В. М., Иващенко А. И., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Цунамиопасность Южных и Средних Курил. Карта. Масштаб 1:1 000 000 // Атлас Курильских островов /Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009а. –С. 134–135.
8. *Кайстренко В. М., Иващенко А. И., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Цунамиопасность Северных Курил. Карта. Масштаб 1:1 000 000 // Атлас Курильских островов. / Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009б. – С. 137.
9. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования тихоокеанского побережья СССР / *Ч.Н. Го, В.М. Кайстренко, Е.Н. Пелиновский, К.В. Симонов* // Тихоокеанский ежегодник.- Владивосток, 1988. –С. 9–17. –Библиогр.: с. 17: рус., есть англ. изд.
10. *Пелиновский Е. Н., Плинт Н. Л.* Предварительные схемы цунамирайонирования побережья Усть-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг). Горький: ИПФ АН СССР, 1980. 16 с.
11. *Писаренко В. Ф., Родкин М. В.* Неустойчивость параметра $M_{тах}$ и альтернатива его применению / Физика Земли, 2009, № 12, с. 48–59.
12. *Поплавский А. А., Храмушин В. Н., Непон К. И., Королев Ю. П.* Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. – Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. –272 с.
13. *Храмушин В. Н., Шевченко Г. В.* Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. – 1994. – Т.34, № 2. – С. 218–223.
14. Цунами 4–5 ноября 1952 г. / *Е. Ф. Саваренский, В. Г. Тищенко, А. К. Святловский, А. Д. Добровольский, А. В. Живаго* // Бюллетень Совета по сейсмологии, № 4, 1955
15. *Choi B. H., Pelinovsky E., Ryabov I., Hong S. J.* Distribution Functions of Tsunami Wave Heights / Natural Hazards 25: 1–21, 2002.
16. *Chung J. Y., Go C. N., Kaistrenko V. M.* Tsunami hazard estimation for eastern Korean coast // Tsunami '93, Wakayama, Japan, August 23–27, 1993. – Wakayama, Japan, 1993. – P. 409–422. – (Proceedings of the IUGG / IOC International Tsunami Symposium).
17. *Kaistrenko V.* Probability model of tsunamis runup and long-term prediction of tsunami heights // Tsunamis : Their Science and Hazards Mitigation Proceedings International Tsunami Symposium (July 31 – August 3, 1989). – Novosibirsk, 1990. – P. 249–253
18. *Kaistrenko, VM, and VM Sedaeva,* 1952 North Kuril tsunami: new data from archives , in: Tsunami research at the end of a critical decade, Kluwer, 2001, p.91–102.
19. *Kaistrenko V.M., Pinegina T.K. and Klyachko M.A.* Evaluation of tsunami hazard for the Southern Kamchatka coast using historical and paleotsunami data Underwater Ground Failures on Tsunami Generation, Modelling, Risk and Mitigation. Yalciner A.C., Pelinovsky E., Synolakis C.E., Okal E. (Eds.), Kluwer, 2003, p. 225–235.
20. *Pelinovsky E, and Mazova R.* Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave runup on slopes with different profiles. Natural Hazards, 227–249, 1992.