

УДК 550.344.42

© В. М. Кайстренко

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск
vict-k@mail.ru**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ
И КАРТЫ ЦУНАМИРАЙОНИРОВАНИЯ**

Статья поступила 29.05.2017, после доработки 26.06.2017.

Приведены сведения о наиболее значительных цунами, произошедших на Дальневосточном побережье России. Критически проанализирован исторический опыт развития методов количественной оценки цунамиопасности побережий. Дан краткий обзор логической цепочки опасность-уязвимость-риск для цунами. Рассмотрены параметры, характеризующие опасность цунами. Дан краткий обзор результатов количественных оценок потерь и разрушений. Рассмотрена вероятностная модель последовательности цунами пуассоновского типа, согласующаяся с данными о проявлениях исторических цунами на Дальневосточном побережье России. Также рассмотрены общие проблемы вероятностного подхода к оценке цунамиопасности. Выявлены параметры такой модели общего вида, определен их физический смысл и описан корректный метод получения их оценок на базе натуральных данных о заплесках исторических цунами. Предложены аналитические зависимости для количественных оценок опасности цунами с использованием параметров вероятностной модели. Особо рассмотрена фаза наката цунами на берег. Для зоны одномерного наката построены зависимости максимальных (минимальных) отклонений уровня и максимальных скоростей наката (отката) от горизонтальной координаты, направленной нормально к берегу. Кратко рассмотрена проблема наката цунами с обрушенным фронтом. Обоснован выбор параметров для построения карт цунамирайонирования и приведен пример карты цунамиопасности побережья Южных Курильских островов по h_{100} .

Ключевые слова: цунами, опасность, риск, карта цунамиопасности, заплеск, вероятностная модель, период повторяемости.

V. M. Kaistrenko

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**QUANTITATIVE ESTIMATES OF THE TSUNAMI HAZARD
AND MAPS OF THE TSUNAMI ZONING**

Received 29.05.2017, in final form 26.06.2017.

The information concerning the most essential tsunami events on the Russian Pacific coast is given. Methods of the quantitative estimates of the tsunami hazard and its historical developing are described. A short sketch on the logic chain hazard-vulnerability-risk is given. The parameters describing tsunami hazard are considered. A short survey on the quantitative estimates of the fatalities and damages is given. Probabilistic model of the Poissonian type for the tsunami sequence on the Far Eastern coast of the Russia is created. Some general problems related to the probabilistic approach to tsunami hazard estimation are also considered. The parameters of this model were determined and their physical meaning is explained. Correct method for the quantitative evaluation of these parameters using observational data of historical tsunamis is created. Process of the tsunami run-up is considered especially. For one-dimensional run-up, some relationships between the maximal (minimal) delevelling and maximal current velocity and horizontal coordinate are created. The problem of the run-up accompanied by wave breaking is described shortly. On the basement of the probabilistic model, some analytical formulae for the quantitative estimates of the tsunami hazard are proposed. Some variants of parameters for tsunami hazard maps are considered. An example of the tsunami hazard map in terms of h_{100} for the coast of the Southern Kuril Islands is given.

Key words: tsunami, hazard, risk, tsunami hazard map, run-up, probabilistic model, recurrence period.

Ссылка для цитирования: Кайстренко В. М. Количественная оценка цунамиопасности и карты цунамирайонирования // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 3. С. 39—55.

For citation: Kaistrenko V. M. Quantitative estimates of the tsunami hazard and maps of the tsunami zoning. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 3, 39—55.

DOI: 10.7868/S2073667317030030.

Цунами на побережье России. Цунами — опасное природное явление, представляющее собой волновой процесс в океане, вызываемый, как правило, сильным подводным землетрясением. Практически все Дальневосточное побережье России в той или иной степени подвержено воздействию цунами.

После катастрофического цунами в ноябре 1952 г., приведшего к гибели нескольких тысяч человек, практически уничтожившего город Северо-Курильск и почти все поселки на побережье Северных Курильских островов и юга Камчатки [1, 2], 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 отмечались 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.

Ближайшие к Курильским островам очаги цунами расположены на материковом склоне Тихоокеанской глубоководной впадины (рис. 1, см. вклейку). Зона очагов в Японском море расположена вдоль его восточного берега (рис. 2, см. вклейку).

В последние годы найдены свидетельства о цунами в акватории Северного Ледовитого океана [5—8] и на побережье Балтийского моря [9].

Цунами нередко обладают огромной разрушительной силой, которая определяется высотой волны и скоростью потока [2, 10, 11]. Пример воздействия цунами 1952 г. приведен на рис. 3.

Данные о цунами собраны в каталоги разной детальности и за разные исторические периоды. Созданы электронные каталоги цунами, доступные в сети интернет [12, 13]. Несмотря на наличие каталогов цунами, содержащих много информации о цунами в целом, недостаточность надежной количественной информации как о слабых, так и сильных событиях заметно сдерживает создание физически обоснованных моделей проявлений цунами на побережье и их тестирование. Слабые цунами происходят почти ежегодно, но вследствие незначительной величины этих волн, они не всегда надежно выделяются на фоне других волновых процессов, особенно в прибрежной зоне, и, соответственно, информация о таких цунами недостаточна. Опасность представляют лишь сильные события, но в этом случае нехватка информации об этой группе событий связана с их редкостью.



Рис. 3. Центральная часть города Северо-Курильск на о. Парамушир, полностью уничтоженная цунами 5 ноября 1952 г.

Снимок сделан Л. Бондаренко спустя два дня после цунами [2].

Fig. 3. The view of the center of Severo-Kurilsk being damaged fully by the tsunami of the November 5, 1952.

Photo was made by L. Bondarenko 2 days after the tsunami [2].

Актуальным поэтому является построение физически обоснованных вероятностных моделей проявлений цунами на побережье, которые согласуются с имеющимися натурными данными, выявление параметров, определяющих характер цунамиактивности и, соответственно, цунамиопасности, а также построение на этой основе карт цунамирайонирования.

Опасность. Риск. Структура функции повторяемости высот цунами. Все Дальневосточное побережье России является цунамиопасным. Очевидно, однако, что уровень этой опасности различен на разных участках. Поэтому дифференцирование побережья по степени опасности является необходимой и важной задачей для строительства, социального планирования, деятельности по уменьшению ущерба от возможных катастроф, для оценок рисков при страховании [14—16]. Важно опираться на объективную оценку цунамиопасности, поскольку ее недооценка может привести к неоправданному ущербу и жертвам, а переоценки связана с излишними дорогими мерами инженерной защиты и/или неадекватными мероприятиями по предупреждению и эвакуации населения.

Опасность цунами характеризуется целым рядом параметров и обстоятельств:

- высота подъема уровня на берегу и в прибрежной части акватории, и величина понижения уровня при откате;
- частота/период повторяемости;
- скорость течений при накате и откате;
- наличие обрушенного фронта волны (бор);
- наличие плавающих предметов (камни, деревья, обломки, автомашины, ...);
- наличие/отсутствие мер инженерной защиты;
- наличие/отсутствие территорий спасения.

Можно привести следующее общее определение опасности, согласующееся с современным подходом к анализу риска [17—20]: *величина опасности, характеризующая заданное пороговое значение некоторого «опасного» параметра, определяется вероятностью превышения этого порога.*

Последние десятилетия принято различать опасность и риск: опасность характеризует объективные параметры, например, заплеск цунами, а риск — это вероятность разрушений и потерь, вызванных опасным явлением или ситуацией. **Цунами-риск** — это риск бедствия, вызываемого цунами и его вторичными вредоносными факторами.

В простейшем случае опасность и риск связаны коэффициентом пропорциональности, который принято называть уязвимостью. Мы можем уменьшить риск, уменьшая уязвимость, и это — основа стратегии управления рисками. Влиять на объективную опасность достаточно затруднительно.

В общем случае уязвимость — комплексное по своей структуре понятие, зависящая и от параметров, определяющих опасность, и от параметров, характеризующих риск тех или иных потерь [21]. Первые одиночные работы по анализу потерь, вызванных разрушением зданий и сооружений при воздействии цунами, были выполнены достаточно давно [22, 23], причем во второй из этих работ количественная оценка разрушений, вызванных цунами, была сделана на основе параметра $R_{HD} = (a + 0.5b)/(a + b + c)$, где a — число домов, смытых цунами, или полностью разрушенных, b — число частично разрушенных домов, c — число домов, подвергшихся затоплению. На материалах проявлений трех цунами 1986, 1933 и 1960 гг. на побережье Санрику, Япония, в [23] была обнаружена явная корреляция предложенного параметра с максимальной высотой заплеска. Эти исследования были затем развиты Н. Шуто [24].

После катастрофического Индонезийского цунами 2004 г. на базе собранной массы данных начал проводиться интенсивный количественный анализ потерь и разрушений, вызываемых цунами [25—30]. Эти исследования вызвали активное применение нового понятия — функция хрупкости (*tsunami fragility function*), пришедшего из инженерной сейсмологии. Краткий обзор применений этого понятия разными авторами дан в [29].

На рис. 4 приведены примеры функций хрупкости, построенные на материалах разрушений зданий и гибели людей в городе Банда Ачех (о. Суматра), вызванных катастрофическим Индонезийским цунами в 2004 г. [28].

Проведение численного моделирования проявлений цунами в Банда Ачехе [28] позволило провести корреляцию вероятности повреждения зданий и гибели людей в зависимости от различных параметров: глубины потока цунами h , скорости потока u и гидродинамической нагрузки $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D \cdot h \cdot u^2$ [31], где ρ — плотность воды, и C_D — коэффициент трения.

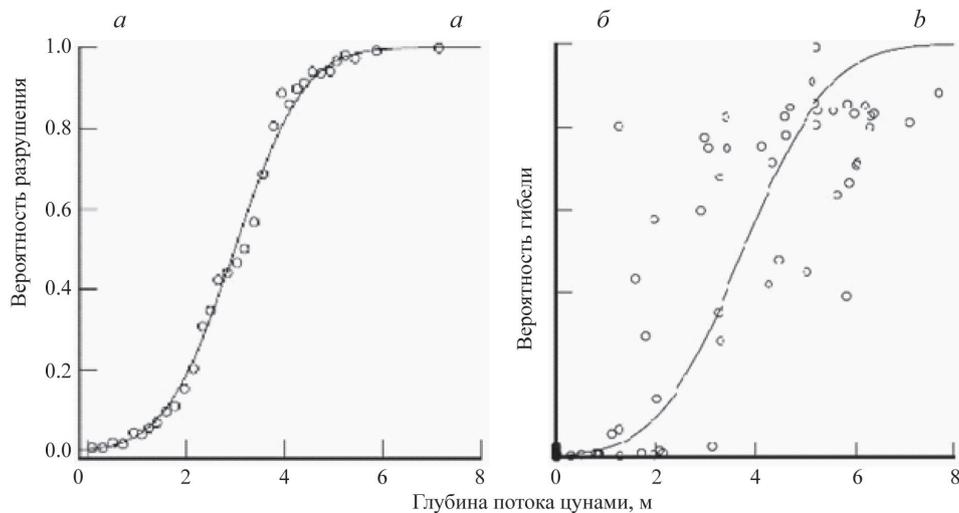


Рис. 4. Функции хрупкости — вероятность повреждения зданий (а) и гибели людей (б) в зависимости от глубины потока цунами [28].

Fig. 4. Fragility curves (probability functions) for structural destruction (a) and for fatality (b) in terms of the inundation depth [28].

Очевидно, что «стартовым» параметром, характеризующим опасность цунами, является величина повышения (понижения) уровня, вызванного цунами.

При накате цунами на берега различных типов максимальные высоты волны могут реализоваться в различных местах, однако известно, что при накате неразрушенной волны на плоский однородный откос максимальные высоты достигаются на максимальном удалении от уреза [32]: **(вертикальные) заплески (run-up heights)** — превышения уровня максимального проникновения цунами (линия заплеска) над уровнем моря (средним или приливом, что обычно уточняется) [33].

Именно заплески чаще всего удается измерять по различного типа следам, оставляемым цунами на побережье, они обычно располагаются намного выше и дальше зоны штормового воздействия, которое оставляет похожие следы в сравнительной близости к урезу. Более того, заплески являются основным количественным материалом, собранным в каталогах цунами. Поэтому в первую очередь развивается вероятностная модель для описания пространственно-временного распределения заплесков цунами, и в пуассоновском варианте такой модели имеется возможность получить аналитически ряд важных оценок и зависимостей.

Поток цунами можно рассматривать как приближенно пуассоновский, заметные отклонения от которого связаны с относительно частыми и слабыми событиями [34]. Соответственно, вероятность того, что за период времени t произойдет n цунами в рассматриваемом месте побережья x с максимальным заплеском, равным или превосходящим пороговую высоту h , дается формулой

$$P_n(x; \text{заплеск} \geq h) = e^{-\varphi(x;h)t} \cdot \frac{[\varphi(x;h) \cdot t]^n}{n!}. \quad (1)$$

Из этой формулы следует, что оценка опасности больших величин заплесков цунами полностью определяется функцией повторяемости высот цунами $\varphi(x;h)$ (ФПЦ). В соответствии с определением, ФПЦ — это средняя частота цунами в заданном месте x с величиной заплеска, равной или превышающей значение h

$$\varphi(x;h) \stackrel{\text{def}}{=} [N(\text{заплеск} \geq h)]/t, \quad (2)$$

где N есть число таких событий, произошедших за период времени t . Эта функция по определению положительная и невозрастающая. Однако прямые методы построения этой функции на основе эмпирического материала о проявлениях цунами редко реализуемы. Даже для отдельных точек побережья данных о цунами немного, а для большинства участков побережья таких данных нет совсем, и в решении данной проблемы существенным становится анализ физики явления.

Также отсутствуют достаточно длинные ряды данных для того, чтобы, разделив их на несколько частей, построить несколько функций повторяемости для заданного места x и провести осреднение согласно (2). Поэтому в лучшем случае мы имеем дело с единственной реализацией эмпирической функции повторяемости в виде ступенчатой функции, согласно определению, но без усреднения.

Более сложная проблема заключается в том, что аналитическая форма функции повторяемости цунами неизвестна и серьезной задачей является построение ее адекватной аналитической аппроксимации. Иными словами, требуется выявить математические свойства функции повторяемости, основываясь на имеющемся эмпирическом материале и заключениях физического характера. Естественно, в полной мере такую задачу решить не удастся.

Аналогичная в полной мере нерешенная проблема имеет место в сейсмологии при построении зависимости магнитуда – повторяемость землетрясений — так называемый закон Гутенберга—Рихтера, которому посвящена обширная литература [35, 36].

Отсутствие надежных и достаточных рядов исторических данных о проявлениях цунами, характерное для многих побережий, стимулирует развитие методов оценки цунамиопасности, базирующихся на (непрямой) информации о сейсмической активности с использованием методов численных расчетов распространения цунами от модельных очагов.

Физически высоты цунами могут быть ограниченными сверху некоторой, пока неизвестной, величиной h_{mp} максимально возможного заплеска цунами. В этом случае функция повторяемости цунами равна нулю при $h > h_{mp}$, то есть ФПЦ — финитная функция с носителем $[0; h_{mp}]$. Однако приходится признавать, что в настоящее время неизвестны *физические причины* лимитирования возможных максимальных высот цунами. Кроме того, ряд зафиксированных максимальных высот заплесков при исторических цунами (30 м при цунами 1737 г. на Камчатке; 85.4 м в 1771 г. на о. Исигаки, Япония; 31.7 м при Окусирском цунами 1993 г. в Японском море, 34 м при Индонезийском цунами 2004 г.; 56 м при цунами Тохоку в 2011 г. на Тихоокеанском побережье о. Хонсю) значительно превышает большинство прогнозных оценок.

Проблема также не решается статистическими методами. В исследовании аналогичной проблемы для «хвоста» закона Гутенберга-Рихтера в сейсмологии показана ограниченная возможность статистических методов вследствие малого количества сильнейших событий, что влечет за собой принципиальную неустойчивость статистических оценок максимально возможных магнитуд землетрясений [37], так что поведение «хвоста» может быть описано различными моделями [38]. В итоге приходится суживать проблему к построению адекватной аналитической аппроксимации функции повторяемости для реально наблюдаемого диапазона значений высот (заплесков) цунами.

Ситуация с заплесками цунами одновременно и сложнее и проще аналогичной в сейсмологии. В дополнение к проблеме максимальных магнитуд землетрясений, являющихся источниками сильнейших цунами, имеется добавочный механизм «расширения» диапазона значений высот цунами — стохастизация распределения высот цунами при его распространении к берегу над нерегулярным профилем дна, которая приводит к сильной изменчивости вдольбереговых распределений высот цунами, как реальных, так и получаемых в численных экспериментах [39]. В то же время существенная стохастизация именно в шельфовой зоне упрощает структуру функции повторяемости, поскольку распространение цунами в этой зоне характеризуется малым параметром — отношением глубин в прибрежной зоне (метры) и в океане (километры).

Наличие твердо установленного эмпирического факта, имеющего теоретическое обоснование [39, 40], что вдольбереговое распределение высот цунами является логнормальным, позволяет утверждать, что функция повторяемости цунами для малых и умеренных значений высот цунами — степенная функция $\varphi(h) = ch^{-1}$ с одним параметром c , имеющим размерность скорости [41].

Известно, что в длительном историческом опыте Японии все катастрофические цунами на северо-восточном побережье Хонсю, начиная с IX в., были связаны только с «близкими» очагами. Из этого факта удается сделать вывод, что функция повторяемости для *больших высот цунами* убывает быстрее степенной функции с любым отрицательным показателем, что делает приемлемой ее экспоненциальную аппроксимацию, хорошо согласующуюся с натурными данными [42], что впервые было отмечено и использовано Д. Коксом [43, 44].

Сама функция повторяемости высот цунами $\varphi(h)$ и ее основной аргумент h — размерные физические величины, поэтому по π -теореме Э. Букингема зависимость $\varphi(h)$ в (2) должна иметь безразмерную

форму [45]. В общем случае для этого необходимы два масштабных параметра f и h^* частоты и высоты соответственно. Кроме того, сама функция повторяемости цунами и ее параметры могут зависеть от точки регистрации x . Тогда:

$$\varphi(x;h) = f(x) \cdot \Phi\left(x; \frac{h}{h^*(x)}\right). \quad (3)$$

Возможное наличие меньшего или большего, чем два, количества параметров цунамиактивности рассмотрены в [42]. Переменная x здесь рассматривается как индикатор места (безразмерные широта и долгота).

Физический смысл параметров, введенных формально, выясняется при рассмотрении распространения цунами из открытого океана к берегу (рис. 5).

Характерная длина волны цунами в открытом океане составляет десятки — первые сотни километров [14], поэтому волновое поле в океане гладкое и существенно не изменяется на расстояниях порядка первых десятков километров, и, соответственно, в таких случаях высоты цунами в точках x' и x'_0 на глубокой воде практически одни и те же, то есть x' — медленная переменная на глубокой воде. Зато высоты цунами на побережье и в соответствующих близбереговых точках x и x_0 могут различаться существенно.

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

$$h = K(x', x) \cdot h', \quad (4)$$

выполняемое в среднем, и построить цепочку равенств:

$$\varphi(x, h) = \varphi(x', h') = f(x') \Phi\left(x', \frac{h'}{h^*(x')}\right) \stackrel{\text{подстановка: } h = K(x', x) \cdot h'}{=} f(x') \Phi\left(x', \frac{h}{K(x', x) \cdot h^*(x')}\right). \quad (5)$$

Принимая во внимание факт точного совпадения экстремальных высот волн, даваемых линейной и нелинейной одномерной моделью волнового наката на плоский однородный откос без разрушения волны [46], мы используем линейную одномерную модель пропорциональной трансформации высоты волны с коэффициентом K для двумерной модели с гладкой береговой линией.

Переменная x' в (4), (5) медленная, поэтому зависимостью от нее можно пренебречь для районов размером в первые десятки километров и записать представление для приближенной региональной функции повторяемости:

$$\varphi(x;h) = f \cdot \Phi\left(\frac{h}{h^*(x)}\right), \quad (6)$$

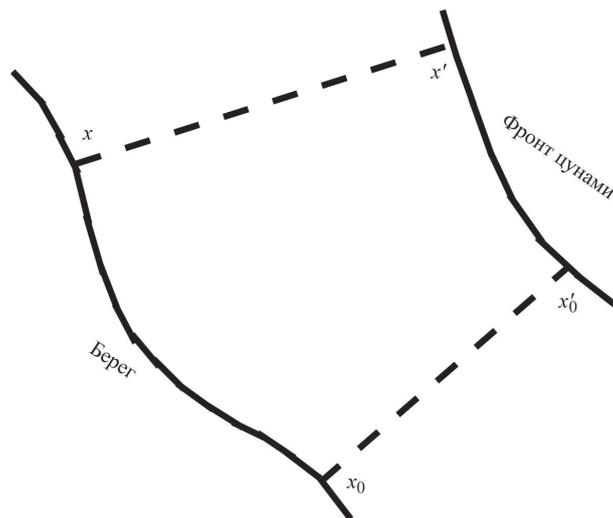


Рис. 5. Схема распространения цунами в регионе размером несколько десятков километров.

Fig. 5. A scheme of the tsunami propagation in a region with a size of a few tens of kilometers.

$$h^*(x) = K(x', x) \cdot h^*(x'). \quad (7)$$

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. В следующем разделе будет показано, что реальный размер региона, в котором параметр f может считаться постоянным — первые сотни километров. Параметр h^* — характеристическая высота цунами, пропорциональная среднему коэффициенту трансформации $K(x', x)$ 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.

Причина появления упрощающих формул (5), (6) — неявное наличие малого параметра в задаче распространения цунами в шельфовой зоне — отношения глубин в прибрежной зоне (m) и в океане (km).

Анализ данных показывает, что функции повторяемости для больших заплесков цунами (цунами с малыми высотами не опасны) можно аппроксимировать экспонентой [42]:

$$\varphi(x, h) = f \cdot e^{-\frac{h}{h^*(x)}}. \quad (8)$$

Общий вид структуры региональной функции повторяемости высот цунами выявлен на основе анализа данных реальных цунами, поэтому структура ФПЦ, получаемая при использовании не прямых данных, например, параметров сейсмичности, также должны удовлетворять виду (6)—(8) для больших значений высот заплесков h .

Соответственно, при $n = 0$, формула (1) вместе с (8) дает аппроксимацию (для больших заплесков) функции вероятности P_0 для максимального события

$$P(\text{макс.заплеск} < h) = P_0(\text{заплеск} \geq h) = \exp\left(-f \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{h}{h^*(x)}\right)\right), \quad (9)$$

которая соответствует закону двойной отрицательной экспоненты для экстремальных величин [47].

На основе формулы (8) можно оценить величину заплеска цунами с периодом повторяемости t лет

$$h_t = h^* \cdot \ln(tf), \quad (10)$$

и в частности, с периодом повторяемости 100 лет

$$h_{100} = h^* \cdot \ln(100 \cdot f). \quad (11)$$

Очевидно, что обращение последней формулы позволяет вычислить параметр h^* по известным параметрам f и h_{100} .

Поскольку заплеск цунами — главный «опасный» параметр, естественно дать следующее определение опасности цунами: опасность цунами Z для территории, расположенной на высоте h над уровнем моря, измеряется вероятностью того, что в данном месте x за время t произойдет хотя бы одно цунами с высотой вертикального заплеска, превышающей значение h :

$$Z = 1 - P_0(\text{заплеск} \geq h) = 1 - e^{-\varphi(x;h)t} \quad (12)$$

Использование характеристик h_t и h_{100} в качестве оценок уровня цунамиопасности связаны с серьезной опасностью Z их превышения, поскольку этот уровень будет превзойден хотя бы одним цунами в 63 % соответствующих периодов повторяемости, что легко оценить, используя формулы (9) и (10):

$$Z = 1 - P_0(\text{заплеск} > h) = 1 - e^{-1} \approx 0.63. \quad (13)$$

Разумнее наоборот, исходить из допустимого значения опасности Z для данного периода t , задаваемых нормативами, и по нему оценивать соответствующий «безопасный» уровень $h_{t,Z}$ над невозмущенной поверхностью океана, который может быть превышен в течение t лет с достаточно малой вероятностью Z :

$$h_{t,Z} = h^* (\ln(ft) - \ln(-\ln(1 - Z))). \quad (14)$$

Интересно, что следствием экспоненциального характера асимптотики ФПЦ (8) величины $h_{t,Z}$ и h_t отличаются добавкой $-h^* \ln(-\ln(1 - Z))$, независимой от периода времени t и частоты сильных цунами f . Формулы (8)—(14) пригодны для оценок параметров цунамиопасности для заплесков, превышающих 0.5 м и на период времени t лет, удовлетворяющий условию $3/f < t < 300$ лет.

Как было отмечено выше, накат цунами на берег может происходить с обрушением волны и образованием бора (фронта волны в виде водяной стены).

Критерий обрушения Br при накате волны на плоский откос по нормали к берегу (одномерный накат) имеет следующий вид [32]:

$$Br = \frac{h\omega^2}{g\alpha^2}, \quad (15)$$

где h и T — характерные заплеск и период волны; $\omega = 2\pi/T$ — частота; g — ускорение силы тяжести; α — уклон откоса.

Показано, что при $Br < 1$ накат волн на береговой откос происходит без обрушения, при $Br \geq 1$ при накате цунами происходит образование бора. При использовании прогнозной оценки заплеска в качестве характерной $h = h_p$, или $h = h_{t,z}$ приведенная выше формула позволяет прогнозировать тип наката.

Использование параметра Br позволяет в целом описать поведение цунами без обрушения вблизи берега. При этом максимальные обезразмеренные уровни $h_{max}(x)/h$ при накате цунами и минимальные $h_{min}(x)/h$ при откате, относительно невозмущенного уровня, связанные с прогнозируемым значением заплеска h , могут быть вычислены на основе номограммы, приведенной на рис. 6, в зависимости от значения параметра Br и от обезразмеренной горизонтальной координаты $\tilde{x} = \frac{\alpha x}{h}$, где x — горизонтальная координата, отсчитываемая от невозмущенного уреза (положительные значения от уреза в море, отрицательные — в сторону берега).

Аналогичные результаты могут быть получены для экстремумов скорости потока при цунами вблизи берега (рис. 7).

Статистическое исследование [48] показало, условие $Br < 1$ нарушается редко, и накат волн цунами на берег происходит большей частью без обрушения переднего склона. В этом случае максимальные скорости потока при накате и откате совпадают по абсолютному значению и отличаются только знаком (направлением потока). Кроме того, максимальное абсолютное значение скорости потока $u = \omega h/\alpha$ достигается на подвижном урезе в мористой части на расстоянии $x = \frac{1}{2} \frac{h^2 \cdot \omega^2}{g \cdot \alpha^3}$ от берега, а не на сухом

берегу, причем на этой глубине наиболее сильно проявляются как накат, так и откат волн цунами.

В целом же учет опасности цунами связан с комплексом еще нерешенных проблем [49]. В частности, необходимо обосновать стратегию оценок «допустимых» рисков в качестве стартовых параметров при создании нормативов всех видов по учету цунами и соответствующей практике страхования.

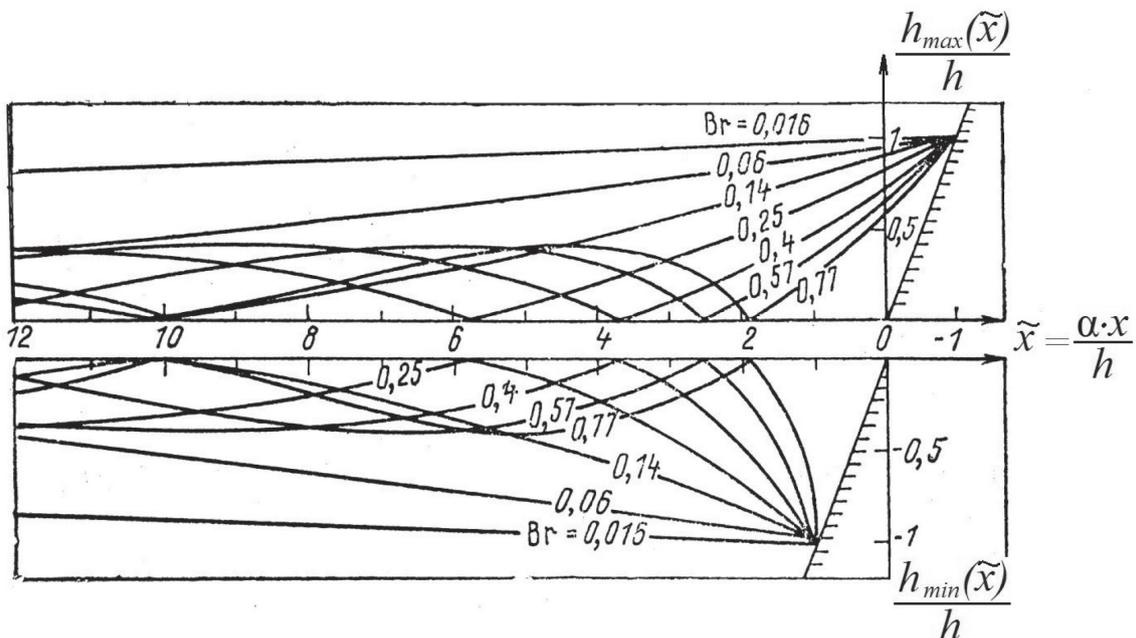


Рис. 6. Зависимость максимальных и минимальных относительных отклонений уровня от безразмерной координаты \tilde{x} [32].

Fig. 6. Relationship between the maximal (minimal) dimensionless delevelling and dimensionless coordinate \tilde{x} [32].

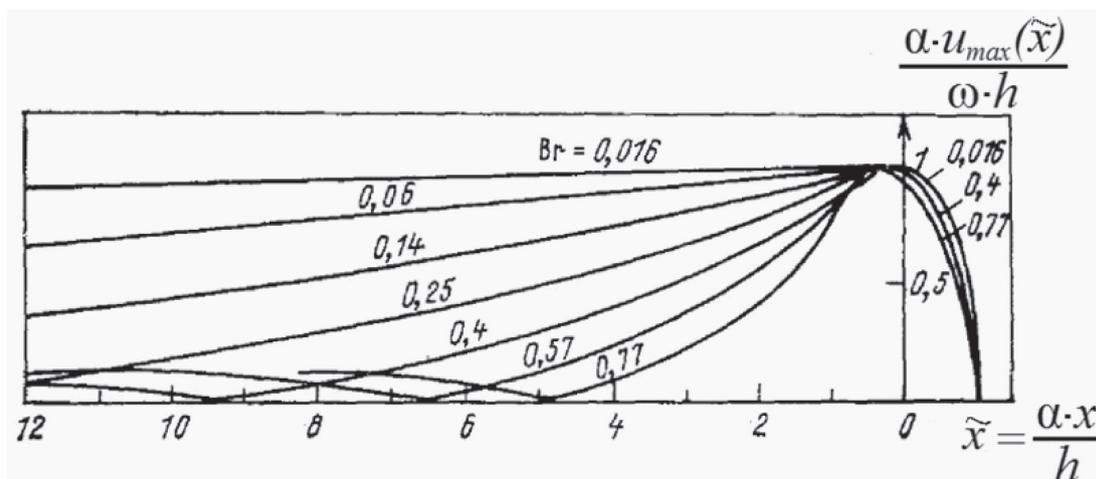


Рис. 7. Зависимость максимальной безразмерной скорости потока от безразмерной координаты \tilde{x} [32].

Fig. 7. Relationship between the maximal dimensionless current velocity and dimensionless coordinate \tilde{x} [32].

Корректная оценка цунамиопасности имеет исключительно важное значение при проектировании особых объектов, таких как атомных электростанций на побережье, подвергающемуся воздействию цунами. Атомным электростанциям требуется большой объем водных резервуаров для охлаждения реактора, так что опасным является как непосредственное воздействие каких-либо явлений на зону реактора, так и возможное разрушение или осушение водозабора в результате таких явлений. Поэтому не удивительно то внимание, которое всегда уделялось цунамибезопасности АЭС, а в последние годы также и анализу трагических последствий аварии АЭС «Фукусима» в результате атаки цунами 2011 г. [50—53].

Согласно нормативам для приемлемого уровня риска ядерной безопасности, принятым Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в отношении вероятности повреждений активной зоны реактора, частота такого события не должна превышать 1/10.000 в год для существующих станций и 1/100.000 в год для будущих станций [54]. Также важным является международный контроль, осуществляемый МАГАТЭ.

Построение функции повторяемости высот цунами. Первые эмпирические функции повторяемости цунами были построены в 1960-80 гг. прошлого столетия [43, 44, 55—60] на основе рядов наблюденных высот заплесков цунами, собранных в каталогах. До недавнего времени заплески цунами, собранные в каталогах, были единственным видом материала для построения ФПЦ. В последние годы для этой цели стали также привлекаться данные о палеоцунами [61] и данные о сейсмичности. Однако, при любом подходе к проблеме количественной опасности цунами референтной базой, позволяющей протестировать развиваемые методики, являются данные о реально произошедших цунами, исторических и палеособытиях.

Данные об исторических цунами, объединенные в первых каталогах, были собраны из различных, достаточно разнородных источников, и, соответственно, эти данные не удалось вполне стандартизировать. По мере развития международной кооперации в исследованиях цунами вопрос о стандартизации сбора данных о цунами стал очень важным. В результате специального международного экспертного семинара в Эстес-Парке, США, появилось руководство по проведению обследования проявлений цунами, изданное позже под эгидой МОК ЮНЕСКО [62].

Требования однородности материала по высотам цунами соблюсти полностью не удается. Это относится в первую очередь к старым событиям: заплески, отнесенные в каталогах к одному месту (населенный пункт, мыс, бухта, порт, ...), реально были замерены в некоторой окрестности данного места, и лишь часть данных о старых событиях удается привязать к достаточно точным координатам.

Для построения функции повторяемости высот цунами (ФПЦ) наиболее значимы большие и опасные высоты, поэтому в первую очередь используются инструментально замеренные заплески в заданном месте, по возможности скорректированные на прилив.

Высоты цунами порядка одного метра и менее редко удается оценить по следам, потому что следы слабых цунами часто попадают в зону штормового воздействия и на фоне штормовых следов не выделяются. Основная часть исторических цунами с такими амплитудами зарегистрирована уровнями самописцами — мареографами. Поскольку главное назначение мареографов — регистрация приливов, то цунами регистрируются с искажениями, которые для волн цунами с амплитудами порядка одного метра и меньше обычно незначительны. В случае необходимости, истинные колебания уровня при цунами могут быть восстановлены по мареограмме [63]. Поэтому для построения функций повторяемости высот цунами можно использовать данные заплесков цунами и амплитуды цунами порядка 1 м, полученные из мареограмм, как почти однородный материал.

Данные о заплесках/амплитудах цунами для каждого пункта следует рассматривать как случайный ряд и ранжировать в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \dots \quad (16)$$

Каждому значению h_k в ряду (16) соответствует частота повторяемости $\varphi_k = \varphi(x; h_k)$, где функция повторяемости φ априори неизвестна.

Случайный ряд в (16) формально похож на стандартный объект теории порядковых статистик [47], однако развитая классическая теория напрямую здесь неприменима. Тем не менее, как и в классической теории, возможно получить аналитические выражения (19), (21), (22) для статистических моментов частот, не зависящие от вида неизвестной функции $\varphi(x; h)$ повторяемости высот цунами в фиксированном месте x , поскольку вероятности (1) и (12) зависят от функции $\varphi(x; h)$, но не от переменной h непосредственно.

Для построения линейной регрессионной модели в полулогарифмическом масштабе

$$\overline{\ln \varphi_k} = a + b \cdot h_k + e_k, \quad (17)$$

где e_k — центрированные случайные отклонения; a — точка пересечения ординаты; b — наклон линии регрессии. Требуется найти средние логарифмы частот $\overline{\ln \varphi_k}$, и дисперсии $D(\ln \varphi_k)$, соответствующие ранжированным высотам цунами. В дальнейшем вместо формальных параметров a и b , в соответствии с представлением (17), мы будем использовать физические параметры f и h^* , связанные с ними: $a = \ln f$ и $b = -1/h^*$. Использование обычного метода наименьших квадратов (МНК) некорректно, поскольку дисперсии частот $\ln \varphi_k$ не равны друг другу, $D(\ln \varphi_k) \neq D(\ln \varphi_i)$ для $k \neq i$, к тому же они не коррелированы, и поэтому должен использоваться весовой МНК [64].

Рассмотрим кумулятивную функцию вероятности $P(k; h)$ для каждой ранжированной высоты цунами h_k . Ситуация $\{h_k \leq h\}$ реализуется, если число цунами с высотой, превышающей пороговое значение h не будет превосходить $(k - 1)$. Тогда искомая вероятность есть сумма:

$$P(k; h) = P(h_k \leq h) = \sum_{s=0}^{k-1} P_s(\text{заплеск} \geq h) = e^{-\varphi(h)T} \sum_{s=0}^{k-1} \frac{[\varphi(h) \cdot T]^s}{s!}. \quad (18)$$

Функцию $P(k; h)$ можно рассматривать в качестве кумулятивной функции вероятности для частоты $\varphi_k = \varphi(h_k)$, соответствующей замене переменной $h_k \rightarrow \varphi(h_k)$. Итоговая формула для статистических моментов такова:

$$\overline{\varphi(h_k)^m} = \int (\varphi(h_k))^m \cdot d(P(k; h_k)) = M_m(k, T), \quad (19)$$

с дифференциалом

$$d(P(k; h_k)) = -e^{-\varphi(h_k)T} \frac{[\varphi(h_k) \cdot T]^{k-1}}{(k-1)!} T \cdot d(\varphi(h_k)). \quad (20)$$

Независимость распределений частот и их статистических моментов от неизвестной функции $\varphi(h)$ связана со структурой формул (1) и (12), поэтому $P(k; h)$ зависит от $\varphi(h)$, но не зависит непосредственно от высоты цунами h . Поэтому неизвестную функцию $\varphi(h)$ можно использовать при вычислениях статистических моментов (19) и (21), (22), как параметр интегрирования.

Для реализации весового метода наименьших квадратов требуется вычислить средние величины логарифмов частот φ_k и их дисперсий:

$$\overline{\ln \varphi(h_k)} = - \int \ln \varphi(h_k) e^{-\varphi(h_k)T} \frac{[\varphi(h_k)T]^{k-1}}{(k-1)!} T d(\varphi(h_k)) = \left| \text{подстановка: } y = \varphi(h_k), 0 < y < \infty \right| = \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s} - 0.577\dots - \ln T, \quad (21)$$

$$D_k = D(\ln \varphi(h_k)) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}. \quad (22)$$

Из структуры дифференциала вероятности (20) видно, что частоты повторяемости ранжированных высот цунами $\varphi_k = \varphi(h_k)$ имеют гамма-распределение. Все интегралы с дифференциалом (20), представляющие средние величины логарифмов частот $\ln(\varphi_k)$ и их дисперсии, являются трансформантами Лапласа элементарных функций и вычисляются аналитически [65].

Стандартное отклонение $\sigma(\ln \varphi_k)$ по смыслу похоже на дифференциал $\ln \varphi_k$ и может быть использовано в качестве априорной относительной ошибки для значений функции повторяемости $\sigma(\ln \varphi_k) \approx \sigma(\varphi_k) / \varphi_k$. При этом

$$\sigma(\ln \varphi(h_k)) = \sqrt{\frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}}. \quad (23)$$

Следует отметить, что средние логарифмы частот $\overline{\ln \varphi(h_k)}$ монотонно и медленно возрастают, а дисперсии D_k монотонно и медленно убывают с ростом k .

Кроме того 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. Такие большие значения первых дисперсий D_1, D_2, \dots означают, что оценки логарифмов эмпирических частот, соответствующих максимальным событиям, неустойчивы, и соответствующие оценки периодов повторяемости максимальных событий не вполне корректны. Поэтому допустимый диапазон, соответствующий стандартному отклонению σ_1 , для периода повторяемости сильнейшего события оказывается чрезвычайно большим ($T/3.6 - 3.6T$), 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 рис. 8.

Величина стандартного отклонения $\sigma(\ln f)$ асимптотической частоты сильных цунами f существенно зависит от количества используемых наблюдаемых высот цунами. Анализ показал, что для получения корректной оценки частоты сильных цунами f по ряду данных о сильных цунами, наблюдаемых в некотором пункте, количество данных должно быть более 4—5. В противном случае относительная ошибка $\sigma(\ln f)$ близка к 1 [42].

Развиваемая здесь технология является ответом на проблему априорных ошибок для значений функции повторяемости цунами, давно поставленную Ф. Камфилдом [66]. Важно, оценки частоты f и характеристической высоты цунами h^* получаются вместе с их дисперсиями (оценками погрешности), что позволяет контролировать их корректность.

Реальный размер региона, в котором медленно изменяющуюся асимптотическую частоту больших цунами f можно считать постоянной, значительно больше теоретически ожидаемого (первые десятки километров). На рис. 9 для четырех пунктов в регионе Южных Курильских островов приведены функции повторяемости высот цунами (рис. 10, см. вклейку).

На оси ординат видно, что частоты сильных цунами, с учетом их погрешностей, 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.

О картах цунамирайонирования. Очевидно, что для решения многих практических задач, и, в частности, для систематизации данных о цунамиопасности, наиболее удобной формой представления информации являются карты. Первые попытки в мире создания обзорных карт цунамиопасности для больших участков побережья были предприняты в 1960-е и 1970-е гг. для Дальневосточного побережья России [67] и Гавайских островов [43, 44, 68].

В процессе создания таких карт понадобилось выработать четкое определение понятия «количественной характеристики» опасности цунами. Некоторые первые схемы цунамирайонирования содержали карты вдольберегового распределения так называемых «максимальных» высот цунами. Такой подход на самом деле был очень критичным, вследствие принципиальной неустойчивости этих оценок, что было показано в аналогичной проблеме максимальных магнитуд землетрясений [37], и новые карты

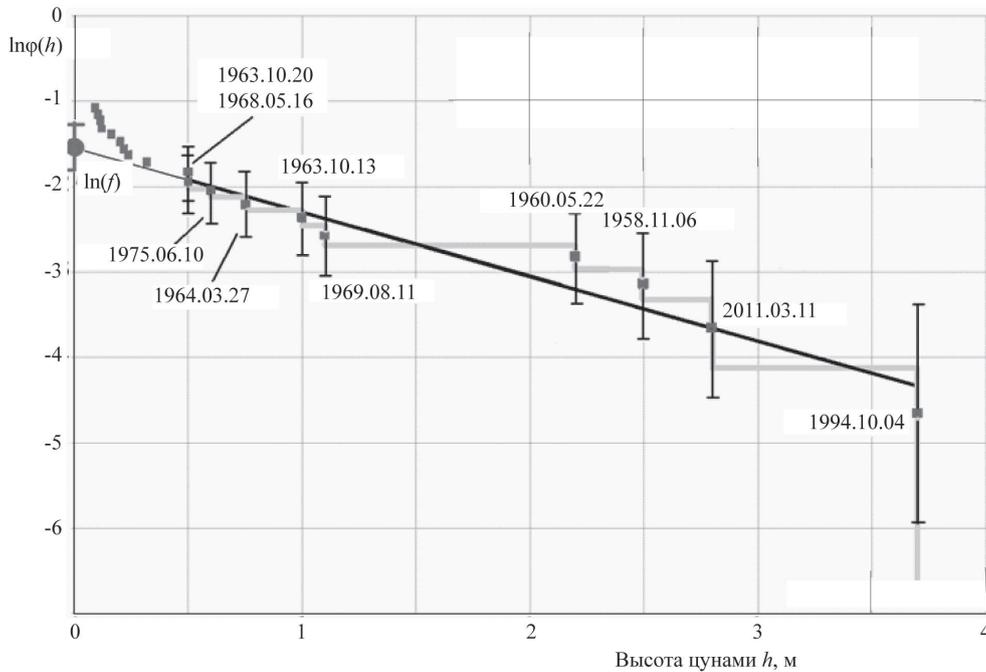


Рис. 8. Ступенчатая эмпирическая функция повторяемости для Южно-Курильска, построенная по высотам исторических цунами с $h \geq 0.5$ м за период времени 1953—2012 гг. и ее аппроксимация ($n = 10$). Всем величинам $\ln \varphi(h_k)$ (кубики) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений. Асимптотическая частота больших цунами для Южно-Курильска $f = 0.16 \pm 0.24$ 1/год отмечена 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.

Fig. 8. Empirical cumulative tsunami recurrence function for Yuzhno-Kurilsk created using tsunami observational data with height $h \geq 0.5$ m during the time period 1953–2012, and its approximation ($n = 10$). All the values $\ln \varphi(h_k)$ are accompanied by corresponding standard deviations. Asymptotical frequency of big tsunamis for Yuzhno-Kurilsk is $f = 0.16 \pm 0.24$ 1/year and its position is indicated by circle in the crossing point of the ordinate axis by the regression straight line. Characteristic tsunami height for Yuzhno-Kurilsk is $h^* = 1.5$ m and $1/h^* = 0.7 \pm 0.2$ 1/m.



Рис. 9. Район Южных Курильских островов.

Fig. 9. Region of the Southern Kuril Islands.

цунамирайонирования стали базироваться на вероятностных моделях сейсмо- и цунамиактивности, что связано с принятым вероятностным определением опасности и риска [18—21]. Потому с 1980-х гг. базовыми параметрами таких карт стали величины заплеска цунами h_t с периодом повторяемости t лет [69], либо уровень $h_{t,Z}$ над невозмущенной поверхностью океана, который может быть превышен в течение t лет с достаточно малой вероятностью Z : [68], и который в этом смысле рассматривается в качестве «безопасного», соответствующего допустимому уровню опасности Z . Допустимый уровень опасности Z в значительной степени диктуется уровнем развития экономики и должен задаваться соответствующими нормативами.

По мере развития представлений о проявлениях цунами совершенствовались также методы оценки цунамиопасности и цунамирайонирования как в России [3, 17, 69—77], так и в других странах [78—80].

Естественно, что оценки цунамиопасности и создание карт цунамиопасности базируется на имеющемся натурном материале, и в зависимости от используемого доминантного материала, развиваемые методы несколько условно подразделяются на две группы.

Работы первой группы существенным образом опираются на исторические данные о заплесках цунами в каталогах [12, 13] и базируются на анализе функций повторяемости. Пионерские работы в этом направлении были выполнены группой американских исследователей, в основном сотрудниками Гавайского института геофизики при Гавайском университете в 1960—1970 гг. Для ряда пунктов на побережье, для которых имелись достаточно длинные ряды надежных данных о заплесках исторических цунами в течение нескольких десятков лет, удалось построить функции повторяемости цунами (ФПЦ), и затем реализовать локальный долгосрочный прогноз высот цунами чисто статистическими методами, используя экстраполяцию ФПЦ на нужный период повторяемости опасных высот цунами.

Д. Кокс [43, 44] обнаружил линейную связь между максимальными высотами больших цунами h , зарегистрированных в некотором месте, и логарифмом частоты их повторяемости F в виде $h = B + A \log F$, аналогичном (8), где A и B — некоторые формальные коэффициенты, зависящие от места. Продолжая исследования Д. Кокса, группа Дж. Хьюстона [56] построила распределение этих коэффициентов для побережья главных гавайских островов. По сути дела, для побережья главных Гавайских островов были построены достаточно детализованные карты цунамирайонирования. В работе Дж. Костелло [68] карты, построенные группой Дж. Хьюстона, приобрели уже удобную для использования форму.

Пример карты, построенной для района Южных Курильских островов в рамках этого подхода, приведен на рис. 11 (см. вклейку).

Данная карта содержит два базовых параметра — частоту сильных цунами f , единую для всего региона Южных Курильских островов, и вдольбереговое распределение заплеска цунами h_{100} с периодом повторяемости 100 лет. Карта построена на основе региональной вероятностной модели для 18 пунктов рассматриваемого региона, в рамках которой удалось вычислить частоту сильных цунами $f = 0.17$ 1/год для Южных Курильских островов с относительно малой относительной погрешностью $\sigma(\ln(f)) = 0.13$. Вычисленные при этом характеристические высоты цунами h^* для 18 пунктов явились «скелетом» карты цунамирайонирования региона.

Численное моделирование исторических цунами, с контролем качества расчетов по заплескам, известным для 18 базовых пунктов, позволило «продолжить» распределение заплесков на все побережье Южных Курильских островов. В итоге модельные заплески по всему побережью региона использовались для расчета характеристических высот цунами h^* аналогично тому, как характеристические высоты цунами вычислялись на основе только натуральных данных.

Использование линейных уравнений мелкой воды для вычисления максимальных заплесков оправдано наличием точного результата для нормального наката волн на плоский откос без обрушения: величины максимальных заплесков при накате в нелинейной модели совпадают с таковыми для колебаний уровня на урезе в соответствующей линейной модели [46].

Несколько особняком стоит интересная работа [72], в которой использован своеобразный прием решения проблемы пробелов в локальных рядах данных. Авторы построили ряды данных, относящиеся к проявлениям каждого конкретного цунами на фиксированных достаточно протяженных участках Тихоокеанского побережья Южной Америки. Применение методов экстремальной статистики к полученным достаточно длинным и представительным «региональным» рядам позволило получить статистически надежные региональные оценки для побережья Перу и северного Чили. Но региональность в данном случае означает пространственную неопределенность, поскольку полученные оценки опасности

цунами не являются локально конкретными и относятся к возможному событию, при котором эта опасность может реализоваться где-то на изучаемом достаточно большом участке побережья.

Иной подход к проблеме вызван нехваткой надежной и полной информации о заплесках исторических цунами, характерной для большинства цунамиопасных побережий, что заставило развивать методы оценки цунамиопасности на базе статистики землетрясений [74—80]. Указанные статьи содержат обширную библиографию. Следует заметить, что подходы авторов довольно различны, и предпочтительнее выглядят работы, основанные на предварительном создании разумного синтетического каталога цунамигенных землетрясений. Например, так построены обзорные карты цунамирайонирования побережья Канады [79].

Согласно Национальной программе США по смягчению последствий стихийных бедствий [81], с 1995 г. в стране создаются карты эвакуации и карты возможного затопления заселенных участков побережья при цунами с повторяемостью раз в 100 и 500 лет, например [67]. Обзорные карты цунамирайонирования не создаются.

Подход к проблеме цунамирайонирования на базе сейсмической информации несомненно важен и перспективен, а для зон с недостаточной информацией об исторических событиях цунами он является единственно возможным. Но пока он обладает существенным недостатком, поскольку отсутствуют методы корректной оценки погрешности.

В зависимости от степени детализации и числа учитываемых параметров карты цунамирайонирования подразделяется на три уровня:

- общее цунамирайонирование — M1:5.000.000 до M1:1.000.000;
- детальное цунамирайонирование — M1: 1.000.000 до M1:25.000;
- цунамимикрорайонирование — масштаб менее 1:25.000.

Последний тип карт с расчетными зонами затопления при цунами с различной повторяемостью требуется для территорий прибрежных населенных пунктов и мест особо ответственного строительства.

Основываясь на данных о проявлении исторических цунами на Дальневосточном побережье России, критически проанализирован исторический опыт развития методов количественной оценки цунамиопасности побережий. Это позволило создать базу для развития оригинального подхода к решению этой проблемы, развиваемого в ряде академических НИИ.

Основой этого подхода является вероятностная модель повторяемости цунами Пуассоновского типа, для которого 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. Разработан корректный метод вычисления оценок этих параметров вместе с оценками дисперсии на основе данных об исторических цунами. Описана методика построения обзорных карт цунамирайонирования на базе данных об исторических цунами и приведен пример такой карты для района Южных Курильских островов. Для случая наката волны без разрушения ($Br < 1$) предлагается использовать формулы и графические зависимости для экстремальных значений высот цунами и скоростей течения в близурезной зоне. Кратко описан подход к получению оценок цунамиопасности на базе статистики землетрясений.

Обсуждается необходимость привлечения данных о палеоцунами для количественной оценки цунамиопасности с приемлемой точностью, что позволит восполнить недостаточность данных в каталогах исторических цунами.

Автор выражает искреннюю благодарность рецензенту доктору технических наук, проф. К. В. Симонову, ведущему научному сотруднику Института вычислительного моделирования СО РАН за замечания, учет которых способствовал более логичному построению раздела об опасности и риске цунами.

Литература

1. Саваренский Е. Ф. и др. Цунами 4-5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии. № 4. М.: АН СССР, 1958. 62 с.
2. *Kaistrenko V., Sedaeva V.* 1952 North Kuril Tsunami: New Data from Archives // *Tsunami Research at the End of a Critical Decade* / ed. G. T. Hebenstreit. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 91—102 (*Advances in Natural and Technological Hazards Research*, V. 18).

3. *Кайстренко В. М.* и др. Цунами // Атлас Курильских островов / Под ред. академика РАН В. М. Котлякова. М., Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. С. 132—137.
4. *Тихонов И. Н.* Сильные землетрясения в Сахалинской области: исследования и прогнозы // Вестник ДВО РАН, 2006. № 1. С. 67—80.
5. *Никонов А. А., Субетто А. А.* Историческое цунами на Соловецких островах // Известия РГО. 2007. Т. 139, Вып. 6. С. 24—31.
6. *Годзиковская А. А.* и др. Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке. М.: ГС РАН, 2010. 132 с.
7. *Евзеров В. Я.* Цунами в Белом море (о событии 5 января 1888 года) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геологическая. 2013. № 2. С. 181—183.
8. *Евзеров В. Я.* и др. Геодинамика беломорской котловины в голоцене // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2. С. 51—58.
9. *Никонов А. А.* Необычный «взрыв» сейсмической активности в Восточной Пруссии в начале XIV в. и его значение для выяснения сейсмологического потенциала Калининградской обл. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 2. С. 43—58.
10. Проявления конкретных цунами. Цунами 1993 и 1994 годов на побережье России / Под ред. К. Ф. Сергеева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 175 с. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией, Т. VIII).
11. *Kaistrenko V.* et al. Manifestation of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Coast of the Kuril Islands: A Tsunami with Ice // Pure Appl. Geophys. 2013. V. 170. P. 1103—1114.
12. NGDC: Tsunami Data and Information. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml> (Дата обращения: 15.05.2017).
13. HTDB/WLD: Historical Tsunami Database for the World Ocean. URL: <http://tsun.sssc.ru/htdbpac/> (Дата обращения: 15.09.2014).
14. *Левин Б. В., Носов М. А.* Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: «Янус-К», 2005. 360 с.
15. *Dominey-Howes D., Goff J.* Tsunami Risk Management in Pacific Island // Countries and Territories (PICTs): Some Issues, Challenges and Ways Forward, 2013. V. 170, Iss. 9—10. P. 1397—1413.
16. *Preuss J.* et al. Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Areas // Urban Regional Research for the National Science Foundation, Arlington, V.A., 1988. 246 p.
17. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации. М.: ИПЦ «ДИК», 2005. 271 с.
18. *Wisner B.* et al. AT RISK. Natural hazards, people's vulnerability and disasters / 2nd ed. New York, 2005. 447 p.
19. *Crichton D.* The Risk Triangle // Natural Disaster Management / ed. by Ingleton J., Tudor Rose, London-Leicester, UK, 1999. P. 102—103.
20. *Proske D.* Catalogue of Risks. Natural, Technical, Social and Health Risks, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 509 p.
21. *Porter K.* A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. Boulder: University of Colorado, 2017. 101 p. URL: <http://spot.colorado.edu/~porterka/Porter-beginners-guide.pdf> (Дата обращения: 20.06.2017).
22. *Magoon D. T.* Structural Damage by Tsunamis // Proc. of the ASCE Coastal Engineering Specialty Conference, Santa Barbara, California, 1965. New York: ASCE, 1966. P. 35—68.
23. *Hatori T.* On the damage to houses due to tsunamis // Bull. Earthq. Res. Inst., 1984. V. 59. P. 433—439 (In Japanese).
24. *Shuto N.* Tsunami intensity and disasters // Tsunami in the World. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1993. P. 197—216.
25. *Peiris N., Pomonis A.* December 26, 2004 Indian Ocean tsunami: Vulnerability functions for loss estimation in Sri Lanka // Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation: Proceedings of the International Conference, Chu, Phoon & Yong (eds), Singapore: World Scientific Publishing Company, 2005. P. 411—416.
26. *Saatcioglu M.* et al. Performance of structures in Indonesia during the December 2004 great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami // Earthquake Spectra. 2006. V. 22 (S3). P. 295—319.
27. *Dias W.P.S.* et al. Tsunami vulnerability functions from field surveys and Monte Carlo simulation // Civil Engineering and Environmental Systems. 2009. V. 26, Iss. 2. P. 181—194. doi:10.1080/10286600802435918.
28. *Koshimura S.* et al. Tsunami fragility — a new measure to identify tsunami damage // Journal of Disaster Research. 2009. V. 4, Iss. 6. P. 479—488.
29. *Nanayakkara I., Dias P.* Fragility curves for tsunami loading // Special Session on Loading Effects, 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy, Sri Lanka, 2013. P. 23—30.
30. *Macabuag J.* A proposed methodology for deriving tsunami fragility functions for buildings using optimum intensity measures // Natural Hazards. 2016. V. 84, Iss. 2. P. 1257—1285.
31. *Yeh H.* Maximum fluid forces in the tsunami runup zone // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2006. V. 132, Iss. 6. P. 496—500.
32. *Кайстренко В. М.* и др. Накат и трансформация волн цунами на мелководье // Метеорология и гидрология. 1985. № 10. С. 68—75.
33. Tsunami Glossary / Technical Series 85, Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO, 2016. 45 p.
34. *Geist E. L., Parsons T.* Distribution of tsunami interevent times // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L02612.
35. *Golitsyn G. S.* The place of Gutenberg-Richter law among other statistical laws of nature // Problems of dynamics of the lithosphere and seismicity. Vychislitel'naya Seismologia. Iss. 32. P. 138—161.
36. *Родкин М. В.* и др. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 893—904.
37. *Писаренко В. Ф., Родкин М. В.* Неустойчивость параметра M_{max} и альтернатива его применению // Физика Земли. 2009. № 12. С. 48—59.

38. *Pisarenko V. F., Sornette D.* Characterization of the frequency of extreme earthquake events by the generalized Pareto distribution // *Pure Appl. Geophys.* 2003. V. 160, No 12. P. 2343—2364.
39. *Choi B.H.* et al. Distribution Functions of Tsunami Wave // *Natural Hazards.* 2002. V. 25. P. 1—21.
40. *Го Ч. Н.* Статистические свойства заплесков цунами на побережье Курильских островов и Японии; ИМГиГ ДВНЦ АН СССР. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1987. 41 с.
41. *Kaistrenko V.* Tsunami recurrence versus tsunami height distribution along the coast // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168, No 11. P. 2065—2069.
42. *Kaistrenko V.* Tsunami Recurrence Function: Structure, Methods of Creation, and Application for Tsunami Hazard Estimates / V. Kaistrenko // *Pure Appl. Geophys.* 2014. V. 171. P. 3527—3538.
43. *Cox D. C.* Tsunami height-frequency relationship at Hilo // *Informat. Report: Hawaii, Hawaii Inst. Geophys., University of Hawaii,* 1964. 4 p.
44. *Cox D. C.* Frequency Distributions of Tsunami Runups in Hawaii. Honolulu (HI): Environmental Center, University of Hawaii at Manoa, 1978.
45. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 439 с.
46. *Pelinovsky E., Mazova R.* Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave runup on slopes with different profiles // *Natural Hazards.* 1992. V. 5. P. 227—249.
47. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений / Пер. с англ. М.: Мир, 1965. 451 с.
48. *Мазова Р. Х.* и др. Статистические данные о характере наката волн цунами // *Океанология.* 1983. Т. 23, № 6. С. 932—937.
49. *Kaistrenko V.* et al. A new paradigm of tsunami safety solution // *Proc. Int. Tsunami Symp. Seattle, Washington,* 2001. P. 303—313.
50. *Cho Y. S.* Safety analysis of Ulchin nuclear power plant against Nihonkai-Chubu earthquake tsunami // *Nuclear engineering and design.* 2004. V. 228. Is. 1—3. P. 393—400.
51. *Uri ten Brink* et al. Evaluation of Tsunami Sources with the Potential to Impact the U.S. Atlantic and Gulf Coasts // Report “The Current State of Knowledge Regarding Potential Tsunami Sources Affecting U.S. Atlantic and Gulf Coasts”, submitted to the Nuclear Regulatory Commission on September 30, 2007. 322 p.
52. *Noggerath J.* et al. Fukushima: The myth of safety, the reality of geosciences // *Bulletin of the Atomic Scientists.* 2011. V. 67(5). P. 37—46.
53. *Seo J-W.* et al. Safety Analysis against Tsunami Attacks at a Nuclear Power Plant Site // *J. Appl. Math.* 2013. V. 2013. Article ID 984038.
54. Безопасность атомных электростанций: проектирование / Конкретные требования безопасности № SSR-2/1. Нормы МАГАТЭ по безопасности. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1534r_web.pdf (дата обращения: 15.05.2017).
55. *Магун О. Т., Арно Н. Л.* Долгосрочный прогноз затопления от цунами для Кресент-Сити. Калифорния, США // *Волны цунами.* Южно-Сахалинск: Труды САХКНИИ, Вып. 32. 1973. С. 168—182.
56. *Houston J. R.* et al. Tsunami-wave elevation frequency of occurrence for the Hawaiian Islands // *Tech. Rpt. H-77-16U.S.: Vicksburg, Miss., Army Engineer Waterways Expt. Sta. Hydraulics Lab.,* 1977. 63 p.
57. *Okada M., Tada M.* Historical study of Tsunami at Miyako, Japan // *Tsunamis — Their Science and engineering.* Tokyo: TERRAPUB, 1983. P. 121—130.
58. *Rascon O. A., Villarreal A. G.* On a Stochastic Model to Estimate Tsunami Risk // *J. Hydraulic Res.* 1975. V. 13, No. 4. P. 383—403.
59. *Wiegel R. L.* Protection of Crescent City, California, from Tsunami Waves // *Report for the Redevelopment Agency of the City of Crescent City, 5 March 1965: Berkeley, California.* 1965. 114 p.
60. *Wigen S.O.* Historical Study of Tsunamis at Tofino, Canada // *Tsunamis - Their Science and engineering.* Tokyo: TERRAPUB, 1983. P. 105-119.
61. *Пинегина Т. К., Разжигалева Н. Г.* Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // *Мировой океан / Под общ. ред. Л. И. Лобковского. Т. I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / Н. П. Лаверов, Н. В. Короновский, Л. И. Лобковский и др. М.: Научный мир, 2013. С. 488—498.*
62. *Post-Tsunami Survey Field Guide / IOC Manuals and Guides No. 30.* Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 1998. 45 p.
63. *Satake K.* et al. Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan // *Journal of Marine Research.* 1988. V. 46, No 3. P. 557—571.
64. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 957 с.
65. *Бейтмен Г., Эрдейи А.* Таблицы интегральных преобразований: Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина / Пер. с англ. М.: Наука, 1969. 344 с.
66. *Camfield F.* Insufficient Data Effect on Tsunami Flood Level Predictions – Summary // *Proc. Int. Tsunami Symp., Seattle, August 17—19.* Seattle, 1987. P. 247—251.
67. *Иконникова Л. Н.* Атлас цунами. М.: ДВНИГМИ, 1963. 53 с.
68. *Costello J. A.* Tsunamis: Hazard Definition and Effects on Facilities // *file report 85-533.* Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 1985.
69. *Го Ч. Н.* и др. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР // *Тихоокеанский ежегодник.* Владивосток: ДВО АН, 1988. С. 9—16.
70. *Пелиновский Е. Н., Плинка Н. Л.* Предварительные схемы цунамирайонирования побережья Курило-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг). Препринт № 5. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. 16 с.
71. *Chung J. Y.* et al. Tsunami hazard estimation for eastern Korean coast // *Tsunami'93. Proc. IUGG / IOC Int. Tsunami Symp. Wakaayama, Japan,* 1993. P. 409—422.
72. *Куликов Е. А.* и др. К вопросу о долгосрочном прогнозе цунами (на примере побережья Перу и Северного Чили) // *Океанология.* 2005. Т. 45, № 4. С. 544—556.

73. *Кайстренко В. М.* и др. Оценка цунамиопасности и построение карт цунамирайонирования для побережья Сахалинской области. Проблема нормативов // Строительная индустрия Сахалина. 2014. № 19. С. 38—43.
74. *Гусяков В. К.* и др. Оценка цунамиопасности побережья Охотского моря от региональных и удаленных источников // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 59—72.
75. *Доценко С. Ф.* Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал. 2005. № 3. С. 3—10.
76. *Yalciner A.* et al. Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, No C12. Article Number: C12023.
77. *Зайцев А. И.* и др. Прогноз высот волн цунами на Черноморском побережье России // Тр. Нижегородского гос. техн. университета им. П. Е. Алексеева. 2011. № 1 (86). С. 35—43.
78. *González F. I.* et al. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. C11023.
79. *Leonard L.* et al. Tsunami hazard assessment of Canada // Natural Hazards. 2014. V. 70, No 1. P. 237—274.
80. *Okal E. A.* et al. Tsunami simulations for regional sources in the South China and adjoining seas // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168, No 6—7. P. 1153—1173.
81. U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program (NTHMP). URL: <http://nws.weather.gov/nthmp/> (Дата обращения: 15.05.2017).

К статье *Кайстренко В. М.* Количественная оценка цунамиопасности...
Kaistrenko V. M. Quantitative estimates...

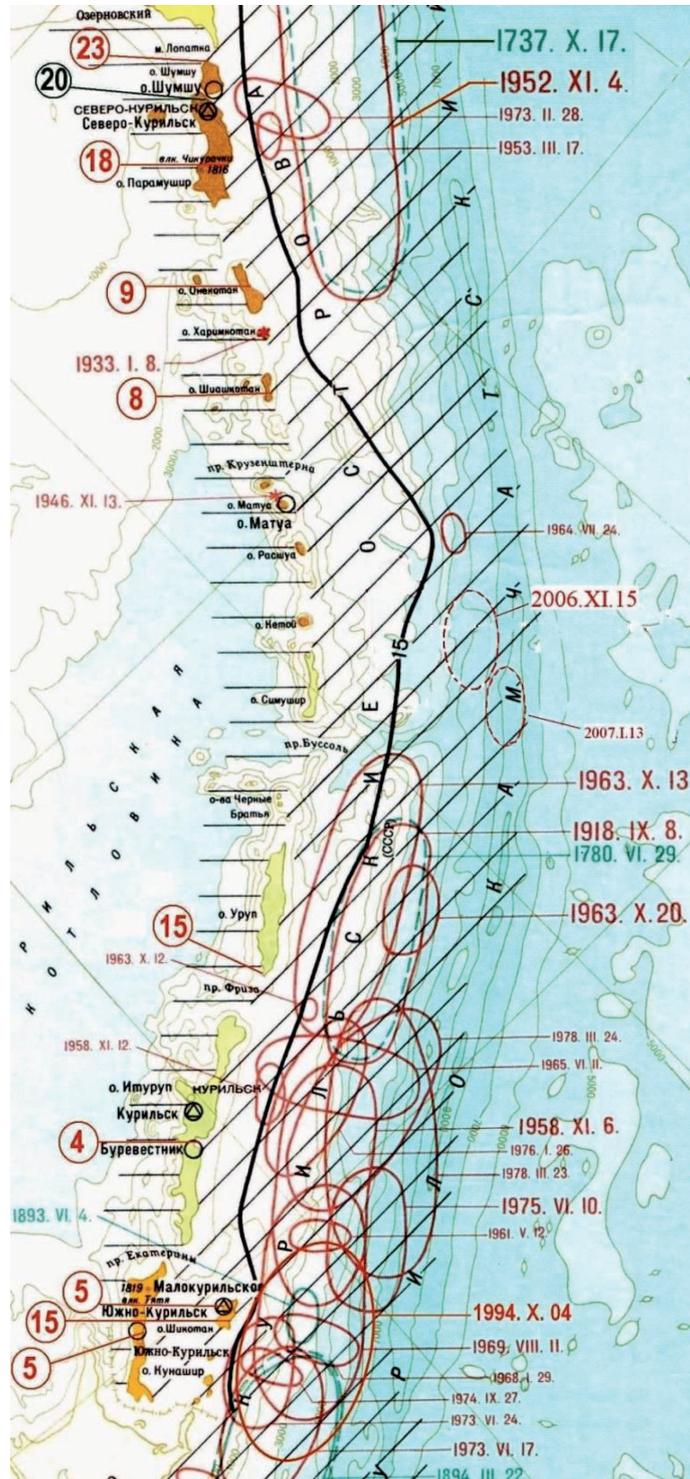


Рис. 1. Очаги цунамигенных землетрясений вблизи Курильских островов [3].
 Fig. 1. Sources of tsunamigenic earthquakes in vicinity of the Kuril Islands [3].

К статье *Кайстренко В. М.* Количественная оценка цунамиопасности...
Kaistrenko V. M. Quantitative estimates...

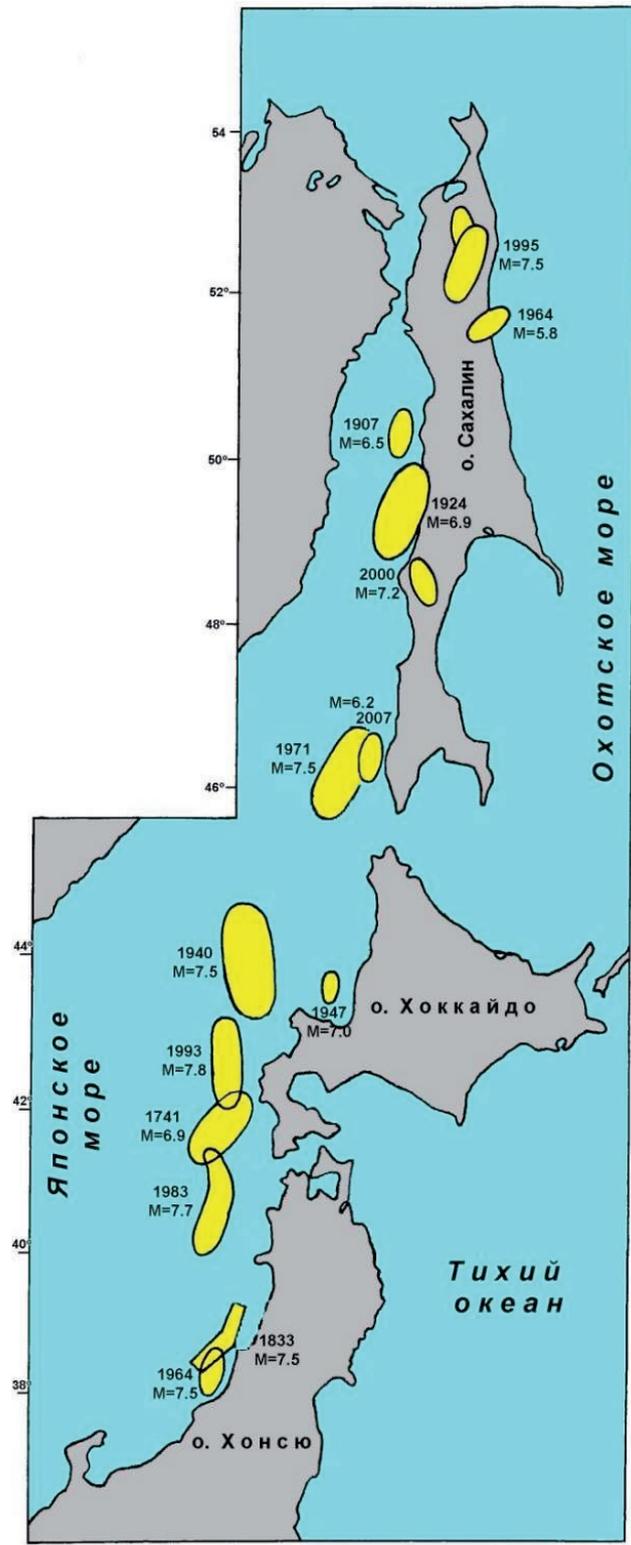


Рис. 2. Очаги сильнейших цунамигенных землетрясений в Японском море [4].
Fig. 2. Sources of the greatest tsunamigenic earthquakes in Japan Sea [4].

К статье *Кайстренко В. М. Количественная оценка цунамиопасности...*

Kaistrenko V. M. Quantitative estimates...

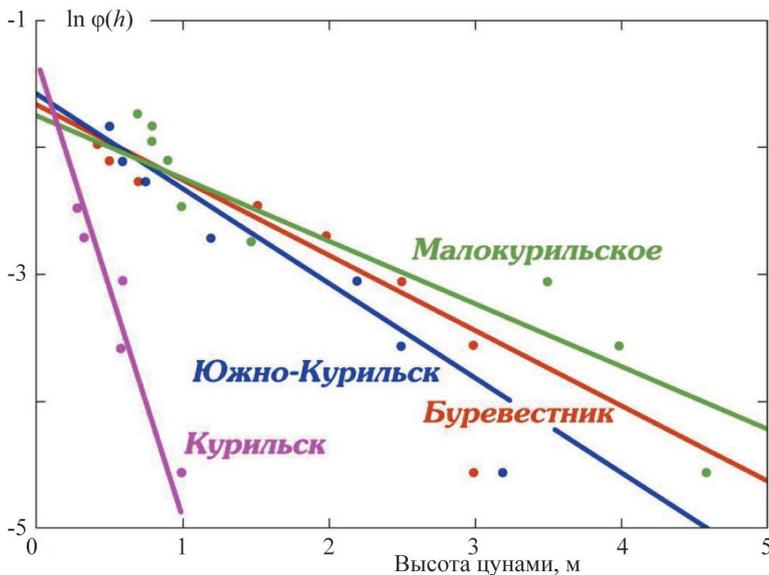


Рис. 10. Примеры эмпирических функций повторяемости высот цунами для региона Южных Курильских островов.

Fig. 10. Tsunami recurrence function of the tsunami heights for several locations in the region of the Southern Kuril Islands.

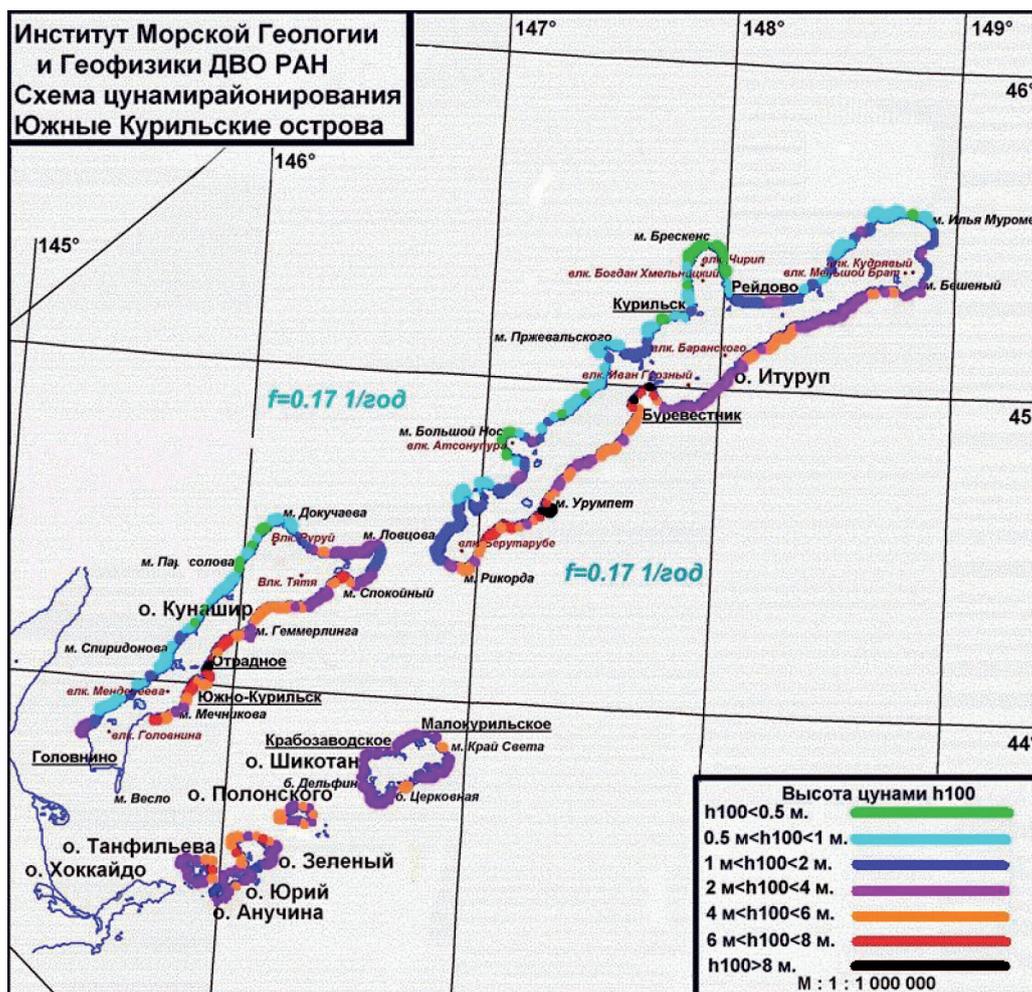


Рис. 11. Карта цунамиопасности побережья Южных Курильских островов по h_{100} [3, 61].

Fig. 11. Tsunami hazard map in terms of h_{100} for the coast of the Southern Kuril Islands [3, 61].