

ЛОГНОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ЦУНАМИ: ТЕОРИЯ, НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**Зайцев А.И.¹, Диденкулова И.И.²,
Талипова Т.Г.^{2,3}, Пелиновский Е.Н.^{2,3}**

¹*СКБ средств автоматизации морских исследований, г. Южно-Сахалинск*

²*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

³*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток;
pelinovsky@gmail.com*

В настоящее время накоплен большой объем данных о распределении высот цунами вдоль побережья во время исторических событий. Особенно много данных было получено после катастрофического цунами 2004 г. в Индийском океане в связи с его глобальным распространением практически во всех океанах. Анализ распределения высот волн вдоль побережья позволяет зонировать районы по степени цунамиопасности и планировать мероприятия по предупреждению и ликвидации последствий стихийных бедствий. С учетом повторяемости землетрясений можно с заданной вероятностью получать многолетние оценки высот цунами для конкретных пунктов побережья; такие оценки в настоящее время проводятся в рамках подхода РТНА (вероятностная оценка опасности цунами), в том числе и для Дальневосточного побережья России [1]. Между тем даже для одного конкретного события распределение высот цунами вдоль побережья крайне неоднородно, и для его анализа можно использовать методы теории вероятностей и математической статистики. Эти вопросы обсуждаются в книге [2].

Здесь мы обсудим логнормальное распределение высот заплесков цунами вдоль побережья, предложенное в статьях [3-5], и которое имеет теоретическое обоснование. Мы приведем здесь несколько примеров наблюдаемых функций распределения, которые хорошо аппроксимируются с помощью логнормального распределения. Это распределение также хорошо аппроксимируют результаты численных расчетов характеристик цунами, что будет продемонстрировано на примере распределения высот волн вдоль восточного побережья Сахалина.

Очевидно, что накат цунами на берег в конкретном пункте является результатом сложного процесса отражения, преломления, дифракции и резонансных эффектов. В рамках линейной теории высота заплеска H всегда пропорциональна высоте волны в очаге цунами H_0 . Коэффициент

пропорциональности здесь является коэффициентом трансформации волны, который очевидным образом зависит от распределения поля в очаге цунами и донного/берегового рельефа. Для катастрофических событий характерны большие размеры очага цунами с относительно плавным изменением его формы, в то время как донный и береговой рельефы содержат много мелкомасштабных неоднородностей, которые в первом приближении можно считать случайными. Но тогда коэффициент трансформации есть произведение локальных коэффициентов трансформации на каждом элементе подводного рельефа. Это, например, легко видеть из лучевой теории распространения волн, когда высота волны вдоль каждого луча меняется в соответствии с законом Грина

$$H(l) = H_0 \left[\frac{h_0}{h(l)} \right]^{1/4} \left[\frac{B_0}{B(l)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где l – расстояние вдоль луча (которое в свою очередь является случайным), $h(l)$ и $B(l)$ – глубина и дифференциальная ширина луча, которые также, меняются случайным образом. Переходя к логарифму в формуле (1) и считая, что случайных сегментов достаточно много, мы получаем согласно центральной предельной теореме логнормальное распределение высот заплеска

$$f(H) = \frac{1}{H\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln H - a)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (2)$$

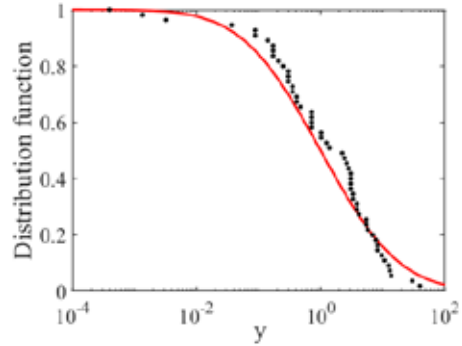
Это распределение содержит два параметра, имеющих ясный физический смысл: $a = \langle \ln H \rangle$ – среднее значение логарифма высот заплесков и σ – стандартное отклонение. Эти параметры легко подсчитать для каждого конкретного события.

Следует заметить, что реальные распределения высот волн (гистограммы) достаточно изрезаны, поэтому для сопоставления с теорией, удобно строить интегральную функцию распределения, которая записывается в универсальном виде [6]

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln 10} \int_y^\infty \frac{1}{z} \exp \left[-\frac{1}{2} (\log z)^2 \right] dz \quad y = \frac{H^{1/\sigma}}{\exp(a/\sigma)}. \quad (3)$$

В качестве примера мы приведем здесь рассчитанную функцию распределения последнего катастрофического цунами на острове Сулавеси (Индонезия) в сентябре 2018 года – рис. 1 [7]. Волны цунами были вызваны сильным подводным землетрясением вблизи острова; оно же инициировало многочисленные оползни, так что высоты волн цунами на

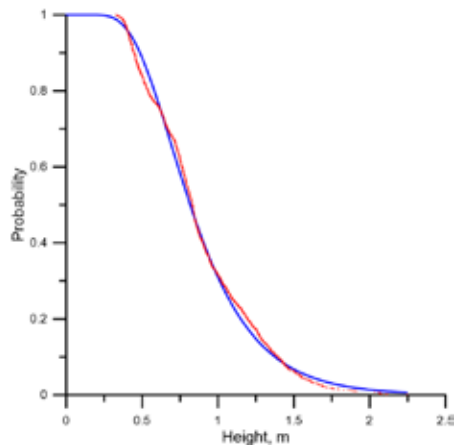
Рис. 1. Функция распределения высот волн вдоль побережья острова Сулавеси. Красная линия – формула (3).



берегу обусловлены интерференцией различных источников. Тем не менее, как видно из рис. 1, логнормальная кривая хорошо аппроксимирует реальные данные.

Логнормальное распределение хорошо описывает данные численных расчетов характеристик волн цунами. В частности, мы рассчитали распространение цунами в Охотском море, вызванное гипотетическим землетрясением с магнитудой 8.2 в районе центральных Курильских островов с параметрами, близкими к Симуширским землетрясениям 2006 и 2007 года. В наших расчетах использованы следующие параметры землетрясения: глубина фокуса 20 км, длина разрыва 300 км, его ширина 80 км и смещение по разрыву (slip) 9 м, угол разлома с меридианом (strike) -135° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 10° и вдоль разлома (rake) 110° . Начальное смещение уровня воды в океане рассчитывалось с помощью модели Окада [8].

Рис. 2. Функция распределения высот волн цунами вдоль восточного побережья Сахалина. Красные точки – расчет, синяя линия – логнормальное распределение



На рис. 2 показано рассчитанное распределение высот волн цунами вдоль восточного побережья Сахалина для этого гипотетического события. Как видим и здесь, логнормальное распределение хорошо аппроксимирует результаты численных расчетов.

Благодарности. Исследования ЕП и ТТ поддержаны Лабораторией нелинейной гидрофизики и природных катастроф ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, грант Министерства науки и высшего образования РФ соглашение № 075-15-2022-1127 от 01.07.2022 г

Литература

1. Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Построение обзорных карт цунамирайонирования дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 55–72. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.005.
2. Choi B.H., Pelinovsky E. Tsunamis along the coast // Hanrimwon Publishing Company, Korea. 2016. 206 p. ISBN 978-89-5708-264-5;
3. Van Dorn W.G. Tsunamis // Advances in Hydroscience, (Ed. V.T. Chow), Acad. Press, London, 1965. V. 2. P. 1–48
4. Kajiura K. Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan. Tsunamis – Their science and engineering, 1983. TERRAPUB, Tokyo. P. 131–145.
5. Go C.N. Statistical properties of tsunami runup heights on the coasts of the Kuril Isles and Japan. In Tsunami along the Coast; Choi, B.H., Pelinovsky, E., Eds.; Hanrimwon Publishing Co.: Seoul, Korea, 2016; P. 155–180;
6. Пелиновский Е.Н., Рябов И.А. Функции распределения высот заплесков цунами (по данным международных экспедиций 1992–1998 гг.). Океанология. 2000. 40. № 5. P. 645 – 652;
7. Didenkulova I., Zaitsev A., and Pelinovsky E. Tsunami distribution functions along the coast: extended // J. Marine Science and Engineering. 2022. V. 10. No. 8. 1137 (8 pages). <https://doi.org/10.3390/jmse10081137>
8. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75(4). P. 1135–1154.