

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ И ОЦЕНКА РИСКА ЦУНАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

В.И. Ларионов^{1, 2, 3}

А.А. Александров¹

С.П. Сущев^{1, 2}

lar@esrc.ru

rector@bmstu.ru

esrc@esrc.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Центр исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС),

Москва, Российская Федерация

³ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено применение геоинформационных систем для оценки риска и последствий воздействия волн цунами в прибрежных районах. Проанализированы особенности волн в открытом море, на мелководье и побережье, рассмотрены сценарии и методы оценки возможных последствий цунами для населения прибрежных районов и объектов инфраструктуры. На основе вероятностного подхода получены законы разрушения береговых зданий, сооружений и уязвимости населения прибрежных районов при воздействии волн цунами, дана их графическая интерпретация. Предложен научно-методический подход к оценке риска цунами и возможных чрезвычайных ситуаций, вызванных волнами цунами, предусматривающий вероятностное рассмотрение процессов воздействия поражающих факторов на элементы риска и их противодействия этому воздействию. Предлагаемый единый подход основан на использовании результатов исследований таких природных катастрофических явлений, как землетрясения и наводнения. Приведен пример зонирования территории г. Владивостока при воздействии волны цунами высотой 5 м. Обоснована необходимость предварительного районирования побережья по риску

Ключевые слова

Геоинформационные системы, цунами, вероятностный подход, функции уязвимости, оценка риска

Поступила в редакцию 05.04.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Цунами, представляющее собой серию поверхностных низкочастотных гравитационных волн, вызванных мощным воздействием на водный слой, относится к особо опасным природным явлениям, поскольку вызывает огромные человеческие жертвы и наносит колоссальный материальный ущерб. Так, в ноябре 1952 г. мощным землетрясением, которое произошло в Тихом океане в 130 км от побережья Камчатки, было вызвано сильнейшее цунами [1]. Волны уничтожили г. Северо-Курильск, ряд населенных пунктов Курильских островов и Камчатки. Погибли более 2000 человек. Землетрясение, произошедшее в конце декабря 2004 г. у берегов Индонезии, вызвало цунами, которое привело к ги-

бели, по разным оценкам, от 225 до 300 тыс. человек в Индонезии, Таиланде, Индии, Шри-Ланке, Малайзии, Сомали и на Мальдивах [2]. В марте 2011 г. на северо-востоке Японии произошло землетрясение и, как следствие, — крупнейшее цунами. Погибли более 18 тыс. человек. Волна цунами затопила четыре из шести реакторов АЭС «Фукусима-1», вывела из строя систему охлаждения реакторов, что привело к серии взрывов водорода, расплавлению активной зоны, в результате чего в атмосферу и океан попали радиоактивные вещества.

В России угрозам цунами подвержено побережье Камчатки, Приморского края и Сахалинской области, а также в меньшей степени побережье Хабаровского края и Магаданской области. Цунамиподобные явления возникают на Черном, Каспийском, Балтийском и Белом морях и на крупных внутренних водоемах (оз. Байкал, Ладога и др.) [2–4].

Прогноз таких опасных природных явлений, как цунами, и оценка возможных последствий являются важной задачей. В настоящей статье рассмотрено использование геоинформационных (ГИС) систем для оценки риска и последствий цунами.

Оценка цунамиопасности территорий. Волны цунами — длинные морские волны, возникающие вследствие подводных и прибрежных землетрясений (80 %), деятельности вулканов (8 %), подводных взрывов большой мощности, подводных и надводных береговых оползней и обвалов (6 %), резкого изменения метеорологических условий (3 %), а также при падении крупных небесных тел* и т. п. [5–7]. Вдали от береговой линии эти волны не представляют никакой опасности, и их высота редко превышает 1 м. Но на мелководье скорость движения и длина волны резко уменьшаются, а высота волны, напротив, увеличивается. У самого берега изменяется форма волны (волна принимает асимметричную форму), далее происходит обрушение гребня волны на берег и перемещение водных масс, несущих в себе обломки зданий и сооружений, машины, малые и большие суда, деревья над сушей. Следует отметить, что цунами сохраняет разрушительный потенциал при распространении на трансокеанские расстояния (тысячи километров). Это связано с длиной волны цунами (обычно более 100 м) и высокой скоростью ее движения (700...800 км/ч в океане, 30...40 км/ч на побережье) [8].

Основной механизм генерации цунами — вытеснение (выталкивание по принципу поршня) воды деформациями дна, которые сопровождают сильные подводные землетрясения. Это резкое, почти мгновенное смещение вызывает одновременный подъем или понижение всей толщи океанской воды, колебательные движения соседних толщ воды и образование гравитационных волн цунами. Возникновение разрушительных цунами связано с мелкофокусными землетрясениями, очаги которых расположены сравнительно неглубоко — на глубине не более 40...60 км [9, 10].

Основные параметры, характеризующие волны цунами и их воздействие на побережье, — это высота, длина, период и энергия волны, скорость ее распро-

* На настоящий момент зарегистрированных событий нет.

странения и время подхода к пунктам побережья, величины заплесков, зоны затопления, длительность воздействия, скорость наката на побережье, площадь и длительность затопления, давление гидравлического потока, температура воды, интенсивность на конкретном побережье и другие [2, 11].

Классификация цунамиопасных территорий выполняется на основе статистического анализа цунамиопасных событий. При проектировании береговых зданий и сооружений в цунамиопасных районах, а также для заблаговременного прогнозирования воздействия цунами и оценки риска используют специальные карты (рис. 1), а также таблицы (табл. 1) цунамиопасных морских побережий России [11, 12]. По аналогии с картами общего сейсмического районирования в них принято использовать максимальные высоты h_{50} , h_{100} , h_{500} волн цунами с повторяемостью событий в среднем один раз в 50, 100 или 500 лет соответственно.

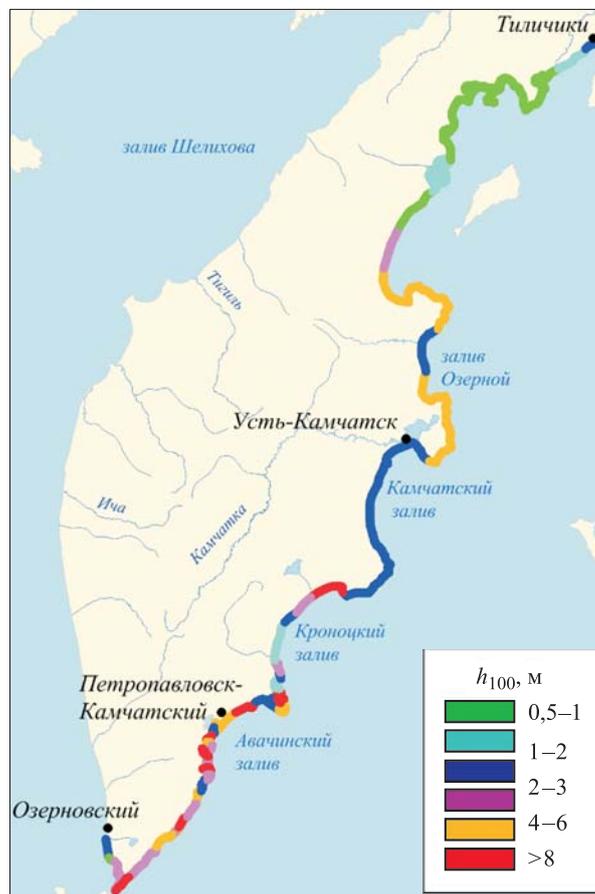


Рис. 1. Карта цунамиопасности Тихоокеанского побережья Камчатки

По интенсивности воздействия волны цунами на берег различают *очень слабые* и *слабые* (с максимальной высотой волны 0,5...1 м), *умеренные* (2 м), *сильные* (3...8 м), *очень сильные* (8...23 м) и *катастрофические* (более 23 м) цунами.

Высота волн цунами (фрагмент)

Географический пункт	Максимальная высота цунами, м		
	h_{50}	h_{100}	h_{500}
<i>Камчатский край</i>			
г. Петропавловск-Камчатский	1,0	1,5	3,0
пос. Усть-Камчатск	3,0	4,5	8,5
с. Никольское	4,5	7,0	12,5
пос. Вилучинск	7,0	10,5	19,5
<i>Курильские острова</i>			
г. Южно-Курильск (о. Кунашир)	3,0	4,5	6,5
с. Крабовозаводское (о. Шикотан)	4,5	6,0	9,0
пос. Северо-Курильск (о. Парамушир)	12,0	18,0	30,5
пос. Козыревск (о. Шумшу)	13,0	18,5	32,0

Уязвимость зданий и людей при воздействии волн цунами. Цунами — это опасный волновой процесс, вызываемый в основном подводными землетрясениями и обладающий огромной разрушительной силой. Прогнозирование последствий цунами основано на тесной взаимосвязи двух случайных процессов — воздействия поражающих факторов на элементы риска и их сопротивление этому воздействию. Опасность, которую несут с собой волны цунами, связаны с внезапным затоплением части суши, волновым воздействием на сооружения, размывающим и транспортирующим действием. При этом масштабы последствий зависят не только от характера и параметров волны, но и от природных особенностей берега и побережья, а также эффективности и своевременности предпринятых спасательных и других мер по снижению размеров ущерба. Процесс сопротивления элементами риска воздействию цунами описывается законами разрушения и законами поражения (функциями уязвимости). Законы разрушения характеризуют уязвимость зданий и сооружений, а законы поражения — уязвимость людей [13].

Уязвимость зданий и сооружений. Интенсивность воздействия цунами на здания (сооружения) можно оценить давлением гидравлического потока. Поле давлений зависит от высоты и скорости подходящей волны, а также от размеров и ориентации объекта относительно фронта волны. При достижении волной фронтальной стены в первый момент происходит удар о стену. На лобовую поверхность стены действует давление (рис. 2)

$$p = p_{гс} + p_{гд},$$

где $p_{гс} = \rho gh/2$ — гидростатическое давление; $p_{гд} = 1,4 \rho u^2/2$ — гидродинамическое давление; ρ — плотность воды; g — ускорение свободного падения; h — высота волны (глубина потока) на берегу; u — скорость потока [5].

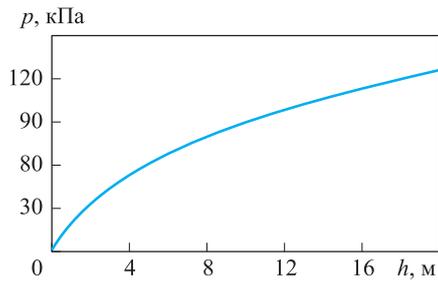


Рис. 2. Зависимость гидравлического давления от высоты волны

Для каждого класса зданий рассматривают законы разрушения двух типов: вероятности получения зданием не менее определенных $P_A(h)$ и определенных $P_B(h)$ степеней разрушения. При цунами выделяют полные, сильные, средние и слабые разрушения. Графическое представление законов разрушения зданий разных классов при воздействии волны цунами приведено на рис. 3. Законы получены на основе функций уязвимости зданий от воздействия избыточного

давления взрыва с учетом зависимости гидравлического давления от высоты волны (см. рис. 2) [13].

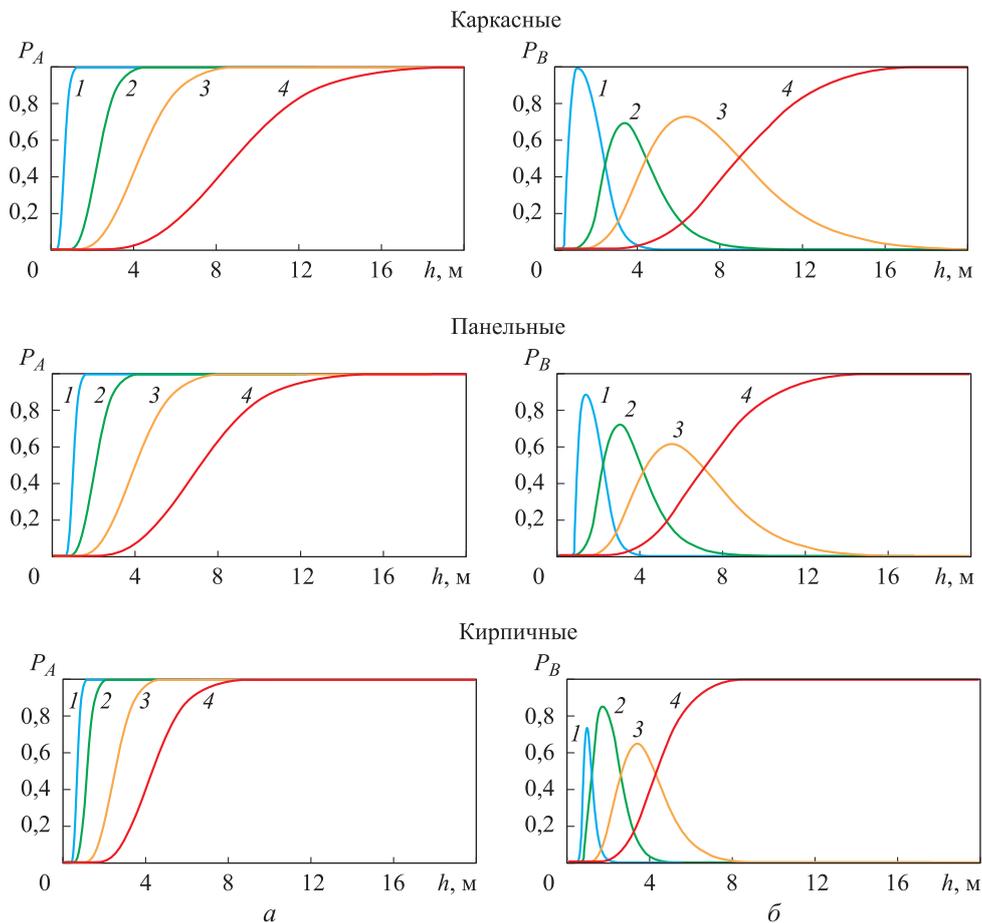


Рис. 3. Вероятности возникновения не менее определенных (а) и определенных (б) степеней разрушения зданий при воздействии волны цунами:
1 — слабые, 2 — средние, 3 — сильные, 4 — полные разрушения зданий

Уязвимость людей. Законы поражения людей в зданиях получены на основе формулы полной вероятности, при этом учитывалось, что общие, безвозвратные, санитарные потери возникают при получении зданием одной из степеней повреждения, образующих полную группу несовместных событий. В этом случае вероятность поражения людей от воздействия волны цунами высотой h в здании определенного типа находят по формуле [13]:

$$P_k(h) = \sum_{i=1}^n P_{B_i}(h) P(C_j | B_i), \quad (1)$$

где $P_{B_i}(h)$ — вероятность наступления i -й степени разрушения здания k -го типа (каркасного, панельного, кирпичного) при высоте волны h (см. рис. 3, б); $P(C_j | B_i)$ — вероятность получения людьми j -й степени поражения при условии, что наступила i -я степень повреждения здания (табл. 2); n — рассматриваемое число степеней разрушения зданий.

Таблица 2

Вероятность поражения людей в зданиях при воздействии волны цунами

Потери	$P(C_j B_i)$ при степени разрушения зданий			
	слабой	средней	сильной	полной
Общие	0,05	0,2	0,6	1
Безвозвратные	0	0,05	0,4	0,95
Санитарные	0,05	0,15	0,2	0,05

Законы поражения людей в зданиях при воздействии волны цунами, полученные по формуле (1), приведены в виде графических зависимостей на рис. 4.

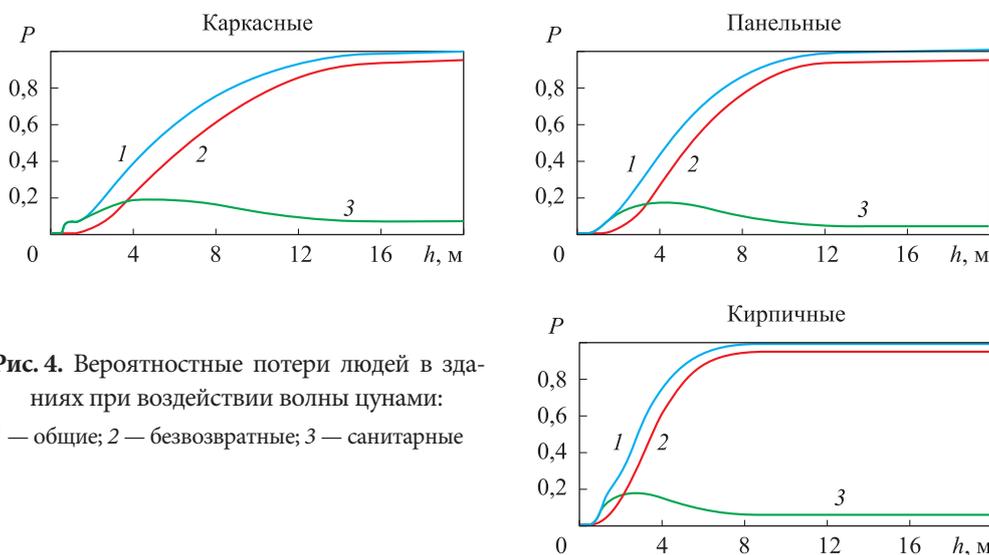


Рис. 4. Вероятностные потери людей в зданиях при воздействии волны цунами: 1 — общие; 2 — безвозвратные; 3 — санитарные

Моделирование последствий цунами. Последствия цунами — это результат воздействия волн на берег и расположенные на нем объекты и людей. Основными показателями последствий цунами являются: общая площадь затоп-

ления; возможные потери среди населения; число населенных пунктов, зданий, объектов, попавших в зону затопления, а также число зданий, получивших полные, сильные, средние и слабые разрушения.

Для прогнозирования последствий цунами и оценки риска возможную зону затопления разбивают на элементарные площадки с координатами (x, y) [14, 15]. Вычисления выполняют с применением ГИС-технологий.

Моделирование зоны затопления. Для оценки последствий цунами и планирования защитных мероприятий наиболее важными параметрами являются высота волны в прибрежной части на мелководье и на берегу, величина понижения уровня воды при откате, скорость потока, дальность его распространения, а также продолжительность затопления берега. Эти параметры определяются характеристиками подходящей к берегу волны цунами и рельефом берега (рис. 5). Основные формулы для оценки зоны затопления приведены в табл. 3.

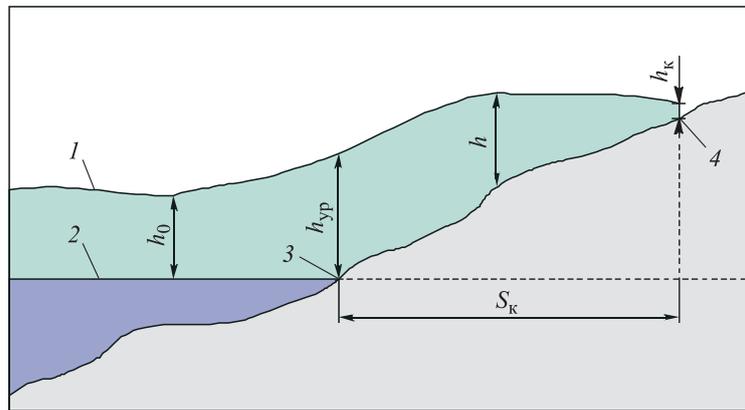


Рис. 5. Расчетная схема оценки последствий цунами:

1 — волна цунами; 2 — уровень моря; 3 — урез воды; 4 — граница затопления; h_0 — высота волны в прибрежной зоне на мелководье; h_{yp} — высота волны на урезе воды; h и h_k — глубина потока (высота волны) на берегу в рассматриваемой точке и на границе затопления; S_k — дальность распространения волны на берегу

Таблица 3

Основные формулы для оценки зоны затопления при воздействии волны цунами

Определяемый параметр	Формула
Высота волны на урезе воды	$h_{yp} = 1,5 h_0$
Скорость распространения потока у уреза воды	$u_{yp} = 3\sqrt{h_{yp}}$
Коэффициент шероховатости	$n = \frac{1}{u_{yp}} h_{yp}^{0,7} i^{0,5}$
Дальность распространения цунами на берегу	$S_k = \frac{h_{yp}(1-n) - h_k}{i(1-n)}$

Определяемый параметр	Формула
Глубина потока на берегу на различных расстояниях S от уреза воды	$h = (h_{\text{ур}} - iS)(1 - n)$
Скорость распространения гидравлического потока	$u = u_{\text{ур}} \left(\frac{h}{h_{\text{ур}}} \right)^{0,7}$

Примечание. h_0 — высота волны цунами в прибрежной зоне на мелководье; i — уклон берега; h_k — глубина потока на границе затопления (в конечной рассматриваемой точке $h_k = 0,5$ м); S — расстояние от уреза воды.

Высота и дальность распространения волн цунами на берегу позволяют судить о масштабах последствий цунами, их можно оценить по отложениям гальки, песка и ила на грунте и вертикальных объектах, остающимся на побережьях после воздействия на них волн цунами [12].

При моделировании воздействия волны цунами на побережье, соединяя площадки с равными глубинами воды, получают зоны затопления с различными глубинами. Зоны затопления на картах изображают с помощью изобат — изолиний равных значений по глубине потока. Для визуализации глубин затопления промежутки между изолиниями окрашивают по определенной цветовой шкале. Результат моделирования последствий цунами в акватории Японского моря приведен на рис. 6.

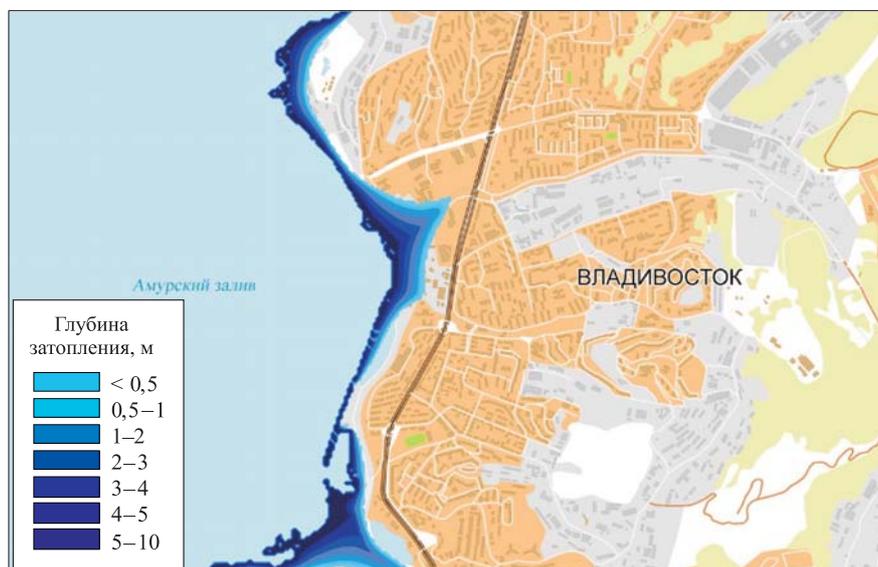


Рис. 6. Зонирование территории по глубине затопления при воздействии волны цунами высотой 5 м в районе г. Владивостока

Разрушение зданий и сооружений. Число населенных пунктов, попавших в зону затопления, определяется по картам с учетом общей площади затопления (см. рис. 6).

Математическое ожидание числа разрушенных зданий при заданной высоте волны h составляет

$$M(V_d) = \iint_S P_d[h(x, y)] \varphi(x, y) dx dy, \quad (2)$$

где $P_d[h(x, y)]$ — вероятность получения зданиями степени разрушения d (полной, сильной, средней или слабой) на площадке с координатами (x, y) при воздействии волны высотой h (см. рис. 3); $\varphi(x, y)$ — плотность зданий на площадке; S — площадь зоны затопления (населенного пункта). Этот показатель рассчитывается для зданий всех типов (каркасных, панельных, кирпичных) по всем возможным степеням разрушения.

Численность пострадавших. Ожидаемое число людей, пострадавших при воздействии волны цунами, можно оценить по формуле

$$M(N) = \sum_{k=1}^m \alpha_k \iint_S P_k[h(x, y)] \psi(x, y) dx dy, \quad (3)$$

где α_k — доля людей в зданиях k -го типа; $P_k[h(x, y)]$ — вероятность поражения людей в зданиях k -го типа на площадке (x, y) при высоте волны h (см. рис. 4); $\psi(x, y)$ — плотность населения с учетом времени его пребывания на площадке (x, y) и степени защиты; m — число рассматриваемых типов зданий.

Расчет последствий волны цунами высотой $h_0 = 5$ м на прибрежной территории г. Владивостока. Для проведения расчетов рельеф принят по карте с масштабом 1:10 000.

Результаты расчета: общая площадь затопления составляет 1220,5 га.

Зонирование территории по глубине затопления

Глубина затопления, м	Площадь затопления, га
Менее 0,5	82,48
0,5–1	168,33
1–2	165,56
2–3	169,10
3–4	634,76
4–5	0,27

Общая численность населения, оказавшегося в зоне затопления, составляет 6703 чел., возможное число пострадавших среди населения 181 чел. (в том числе безвозвратные потери 44 чел., санитарные 137 чел.). Общее число зданий, оказавшихся в зоне затопления, 296 (из них жилых 53, промышленных 243). Общая протяженность затопленных автодорог 9,4 км, железных дорог 11,7 км. Число мостов в зоне затопления 3.

Пример зонирования территории по глубине затопления при воздействии волны цунами приведен на рис. 6.

Оценка риска цунами. Оценка риска включает зонирование цунамиопасной территории по потенциальному территориальному риску и определение показателей индивидуального и коллективного рисков для производственных объектов и населенных пунктов [13].

Потенциальный территориальный риск в зоне возможного катастрофического затопления при цунами определяется с учетом частоты возникновения события для рассматриваемой прибрежной зоны, при этом предполагается, что человек находится в пределах каждой точки (x, y) территории. Этот показатель характеризует возникновение гидравлического потока на побережье интенсивностью, соответствующей нанесению вреда человеку со смертельным исходом:

$$R_{pi}(x, y) = H_i \sum_{k=1}^m \alpha_k P_k [h(x, y)], \quad (4)$$

где H_i — частота цунами по i -му сценарию, равная 0,02, 0,01 и 0,002 год⁻¹, с уровнем заплеска волны цунами не менее заданной величины h_{50}, h_{100}, h_{500} для рассматриваемой цунамиопасной территории с периодом повторяемости один раз в 50, 100 или 500 лет соответственно. В качестве параметра $P_k [h(x, y)]$ принимается вероятность смертельного поражения людей, находящихся в зданиях k -го типа, при высоте волны h по i -му сценарию (см. рис. 4).

Потенциальный территориальный риск на площадке с координатами (x, y) принимается по максимальному значению: $R_{pi}(x, y) = \max R_{pi}(x, y)$. При соединении изолиниями на картах точек с одинаковыми значениями риска получают поля потенциального территориального риска.

Коллективный риск, вычисляемый для каждого возможного сценария воздействия волн цунами с максимальными высотами h_{50}, h_{100}, h_{500} как

$$R_{колi} = H_i \sum_{k=1}^m \alpha_k \iint_S P_k [h(x, y)] \psi(x, y) dx dy, \quad (5)$$

характеризует уровень ущерба и определяет ожидаемое число погибших (пораженных) на рассматриваемой территории за определенный период времени в результате поражающих факторов цунами.

В качестве расчетного значения коллективного риска принимается $R_{кол} = \max R_{колi}$.

Индивидуальный риск $R_{инд} = R_{кол}/N_0$ (N_0 — численность людей в зоне риска) характеризует частоту гибели (поражения) на рассматриваемой территории за определенный период времени отдельного человека в результате воздействия волны цунами.

Заключение. В настоящее время во многих странах Тихоокеанского региона, в том числе России, США, Японии, Канаде, Филиппинах, Чили, Французской Полинезии, Австралии и других, действуют системы предупреждения о цунами. Создана система предупреждения о цунами и в Индийском океане. Тем не менее проблема цунами остается очень важной, поскольку современное состояние знаний о цунами не позволяет достоверно прогнозировать и эффективно предотвращать их негативные последствия. При этом постоянно растет риск цунами для большинства участков побережья Мирового океана, что обусловлено стремительным ростом населения прибрежной зоны, развитием береговой

инфраструктуры, увеличением плотности застройки, интенсификацией хозяйственной деятельности на шельфе. Это требует решения задач оперативного и долгосрочного прогнозирования цунами на основе привлечения новых идей и технологий, в том числе разработки математических моделей этого явления, технологии прогноза и специального программного обеспечения.

Выводы. 1. Приведенные зависимости позволяют выполнить моделирование зон затопления при цунами и оценить риск для населения. На территории России наибольшие значения риска при воздействии волн цунами характерны для населенных пунктов Курильских островов, Сахалина и Камчатки. Рассматриваемый подход к оценке риска дает возможность разработать меры по защите населения и прибрежных территорий в цунамиопасных районах.

2. Применение разработанных методов продемонстрировано на примере зонирования территории по глубине затопления при воздействии волны цунами.

3. На основе рассмотренного методического подхода разработаны программные средства по анализу риска цунамиопасных районов с применением ГИС-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б.В., Шевченко Г.В., Кайстренко В.М. и др. Проблема цунами: современное состояние и перспективы (дальневосточный аспект) // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. Геология урана, геоэкология, гляциология. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 332–354.
2. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Цунами: предупреждение и защита. Н. Новгород: Вектор ТиС, 2006. 272 с.
3. Гусяков В.К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1601–1615.
4. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика земли. 1997. № 1. С. 86–96.
5. Ларионов В.И., Попов С.Е. Обстановка в районе воздействия цунами // Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях. М.: ЗАО «Фирма «Папирус», 1998. С. 93–103.
6. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
7. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
8. Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдональд Г.А., Скотт Р.Ф. Геологические стихии: землетрясения, цунами, извержения вулканов, лавины, оползни, наводнения. М.: Мир, 1978. С. 186–206.
9. Осипов В.И. Оценка природных рисков // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2004. № 6. С. 483–490.
10. Осипов В.И., Шойгу С.К., ред. Природные опасности России. Т. 2. Сейсмические опасности. М.: Крук, 2000. 295 с.
11. СП 292.1325800.2017. Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2017. 146 с.
12. Пинегина Т.К., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сторчеус А.В. Следы доисторических цунами на Восточном побережье Камчатки // Природа. 1997. № 4. С. 102–107.

13. Александров А.А., Ларионов В.И., Суцев С.П. Единая методология анализа риска чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 1. С. 113–131. DOI: 10.18698/1812-3368-2015-1-113-131

14. Ларионов В.И., Суцев С.П., Александров А.А. и др. Применение ГИС-технологий для повышения безопасности населения и территорий // Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. Т. 1. Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия. М.: Наука, 2005. С. 119–153.

15. Осипов В.И., Ларионов В.И., Фролова Н.И., Суцев С.П. Оценка сейсмического и природного риска для населения и территорий Российской Федерации // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2. Геология урана, геоэкология, гляциология. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 28–48.

Ларионов Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора НОЦ ИЭС МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); первый заместитель генерального директора–директор по научной работе Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС) (Российская Федерация, 127015, Москва, Вятская ул., д. 35, стр. 4); заведующий Лабораторией сейсмического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) (Российская Федерация, 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2).

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Суцев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); генеральный директор Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС) (Российская Федерация, 127015, Москва, Вятская ул., д. 35, стр. 4).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Ларионов В.И., Александров А.А., Суцев С.П. Моделирование последствий и оценка риска цунами с применением ГИС-технологий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 48–61. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-48-61

**TSUNAMI CONSEQUENCES MODELLING AND RISK ASSESSMENT
BY USING GIS-TECHNOLOGIES**

V.I. Larionov^{1, 2, 3}

lar@esrc.ru

A.A. Aleksandrov¹

rector@bmsu.ru

S.P. Sushchev^{1, 2}

esrc@esrc.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Extreme Situations Research Center (ESRC), Moscow, Russian Federation

³ Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper focuses on application of geoinformational system (GIS) for risk assessment of tsunami consequences in coastal regions. The features of waves in different sea areas, i. e. in the open sea, in the shallow area and on the shoreline, were analysed. Various methods of assessment of tsunami consequences in coastal areas were investigated as well. The laws of shore infrastructure and effects on population were developed using computational method. The laws are accompanied with graphic interpretation. A scientific-methodological approach of estimation of tsunami risk and possible emergency situations caused by tsunami is presented. This approach is based on probabilistic investigation of two processes: influence of dangerous factors on the risk elements and elements' resistance towards this influence. The approach was developed using the result of investigation of earthquakes and floods' consequences. The example of Vladivostok territory zoning on exposure to 5-meter-high tsunami waves is given. The need of preparatory coast zoning due to the risk is explained

Keywords

Geoinformational systems, tsunami, probabilistic approach, vulnerability functions, risk assessment

Received 05.04.2018

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Levin B.V., Shevchenko G.V., Kaystrenko V.M., et al. Problema tsunami: sovremennoe sostoyanie i perspektivy (dal'nevostochnyy aspekt). Ekstremal'nye prirodnye yavleniya i katastrofy. T. 2. Geologiya urana, geoekologiya, glyatsiologiya [Tsunami problem: contemporary state and prospects (Far East aspect). In: Extreme natural phenomena and disaster. Vol. 2. Uranium geology, geocology, glaciology]. Moscow, IPE RAS Publ., 2011. Pp. 332–354.
- [2] Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Tsunami: preduprezhdenie i zashchita [Tsunami: prevention and protection]. Nizhniy Novgorod, Vektor TiS Publ., 2006. 272 p.
- [3] Gusyakov V.K. Tsunamis on the Russian pacific coast: history and current situation. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2016, vol. 57, no. 9, pp. 1601–1615 (in Russ.).
- [4] Nikonov A.A. Tsunami at the Black sea and Azov sea coasts. *Fizika zemli*, 1997, no. 1, pp. 86–96 (in Russ.).
- [5] Larionov V.I., Popov S.E. Obstanovka v rayone vozdeystviya tsunami. Operativnoe prognozirovaniye inzhenernoy obstanovki v chrezvychnykh situatsiyakh [Situation in area of tsunami influence. In: Operational forecasting of engineer conditions in emergency situation]. Moscow, ZAO "Firma "Papyrus" Publ., 1998. Pp. 93–103.
- [6] Levin B.V., Nosov M.A. Fizika tsunami i rodstvennykh yavleniy v okeane [Physics of tsunami and related phenomena in the ocean]. Moscow, Yanus-K Publ., 2005. 360 p.
- [7] Pelinovskiy E.N. Gidrodinamika voln tsunami [Hydrodynamics of tsunami waves]. Nizhniy Novgorod, IAP RAS Publ., 1996. 276 p.
- [8] Bolt B.A., Horn W.L., MacDonald G.A., Scott R.F. Geological hazards: Earthquakes, tsunamis, volcanoes, avalanches, landslides, floods. New York, Springer, 1975. 330 p.
- [9] Osipov V.I. Assessment of natural risks. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2004, no. 6, pp. 483–490 (in Russ.).

- [10] Osipov V.I., Shoygu S.K., eds. Prirodnye opasnosti Rossii. T. 2. Seysmicheskie opasnosti [Natural hazards of Russia. Vol. 2. Seismic hazards]. Moscow, Kruk Publ., 2000. 295 p.
- [11] SP 292.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya v tsunamiopasnykh rayonakh. Pravila proektirovaniya [Code specification 292.1325800.2017. Buildings and structures on tsunami hazardous areas. Regulations of design]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2017. 146 p.
- [12] Pinegina T.K., Melekestsev I.V., Braytseva O.A., Storcheus A.V. Traces of prehistoric tsunami on Eastern coast of Kamchatka. *Priroda*, 1997, no. 4, pp. 102–107.
- [13] Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Uniform methodology of the risk analysis of emergency situations of technogenic and natural character. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2015, no. 1, pp. 113–131 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2015-1-113-131
- [14] Larionov V.I., Sushchev S.P., Aleksandrov A.A., et al. Primenenie GIS-tekhnologiy dlya povysheniya bezopasnosti naseleniya i territoriy. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya*. T. 1. Avariynnyy risk. Vzryvnye i udarnye vozdeystviya [Usage of hybrid technologies for improving safety of people and territories. In: Safety encyclopedia. Construction. Industry. Ecology. Vol. 1. Emergency risk. Explosive and striking influences]. Moscow, Nauka Publ., 2005. Pp. 119–153.
- [15] Osipov V.I., Larionov V.I., Frolova N.I., Sushchev S.P. Otsenka seysmicheskogo i prirodnogo riska dlya naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii. *Ekstremal'nye prirodnye yavleniya i katastrofy*. T. 2. Geologiya urana, geoekologiya, glyatsiologiya [Assessment of seismic and natural risks for people and territories of the Russian Federation. In: Extreme natural phenomena and disaster. Vol. 2. Uranium geology, geocology, glaciology]. Moscow, IPE RAS Publ., 2011. Pp. 28–48.

Larionov V.I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Deputy Director of SEC ESR, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation), Deputy Director for Scientific Work, Extreme Situations Research Center (ESRC) (Vyatskaya ul. 35, str. 4, Moscow, 127015 Russian Federation); Head of Seismic Risk Laboratory, Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS (IEG RAS) (Ulansky pereulok 13, str. 2, Moscow, 101000 Russian Federation).

Aleksandrov A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Rector of Bauman Moscow State Technical University, Head of Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sushchev S.P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation), Director, Extreme Situations Research Center (ESRC) (Vyatskaya ul. 35, str. 4, Moscow, 127015 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Larionov V.I., Aleksandrov A.A., Sushchev S.P. Tsunami Consequences Modelling and Risk Assessment by using GIS-Technologies. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 48–61 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-48-61