

УДК 550.344.42

МЕТОДИКА ЛОКАЛЬНОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО ЦУНАМИРАЙОНИРОВАНИЯ (SPTHA) И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

Бейзель С.А., Гусев О.И., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, chubarov@ict.nsc.ru*

Введение

Оценка цунамиопасности побережий и прилегающих акваторий – одна из прикладных задач проблемы цунами, требующая для решения применения мультидисциплинарных средств и методов [4]. Одним из первых подходов к ее решению была методика, использующая исторические данные и материалы натурных наблюдений. Альтернатива основана на привлечении результатов численного моделирования трансформации волны цунами. Развитие средств математического моделирования позволило перейти к реализации методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), близкой к методике оценки сейсмической опасности PSHA. Подробные обзоры работ в этом направлении содержится в недавних публикациях [9, 12] (библиографические списки этих работ рекомендуются для поиска актуальной литературы по предмету). В статье [11] предложен термин SPTHA, выделяющий класс задач, связанных с оценками воздействия сейсмогенных цунами. В России работы по оценке цунамиопасности побережий ведутся, в частности, в ИВТ СО РАН – для оценки цунамиопасности побережья Курило-Камчатского региона, Японского, Охотского и Чёрного морей и построения соответствующих обзорных карт [5]; в ИО РАН – для оценки цунамиопасности Арктического побережья страны [6].

Технологическая цепочка SPTHA включает конструирование совокупности модельных источников цунамигенерирующих землетрясений, определение повторяемости таких событий, проведение массовых сценарных расчетов, конвертацию повторяемости сейсмических событий в повторяемость рассчитанных характеристик меры интенсивности проявления цунами, наконец, представление результатов.

Задачи получения оценок цунамиопасности принято разделять по масштабам. В работе [4] выделяются три основных уровня: локальный (масштаб карт 1:2 000 – 1:10 000), региональный (1:500 000 – 1:2 000 000), и глобальный (1:10 000 000 и мельче). Для задач каждого масштаба выстраиваются соответствующие версии общей методики, которые могут различаться по определяемым характеристикам, по входным данным и по математическим моделям и алгоритмам. Мерой интенсивности для задач глобального и регионального масштабов могут быть амплитуды волн (максимальные и минимальные значения смещения свободной поверхности относительно невозмущенного уровня), максимальные высоты (размах) волн – расстояния между максимальными положительной и отрицательной амплитудами, максимальные скорости, некоторые интегральные значения (по времени, по участку береговой линии и т.п.). При решении задач локального масштаба целесообразно рассматривать также характеристики наката волн на берег: максимальная высота и дальность заплеска, толщина слоя жидкости на суше, длительность пребывания суши под слоем воды. В обзоре [12] предлагается использовать так называемый «импульс волнового потока», вычисляемый как произведение полной глубины слоя жидкости на квадрат скорости ее потока.

В статье будут рассмотрены сейсмогенные цунами, составляющие около 90% событий, проявившихся у Дальневосточных берегов России [10], и на примере оценки цунамиопасности одной из камчатских бухт будет продемонстрирован один из вариантов методики SPTHA, адаптированный к решению локального цунамирайонирования. Особенности этого варианта заключаются, во-первых, в постановке задачи, когда требуется определить не только возможные характеристики проявления волн цунами у побережья, но и аналогичные меры интенсивности цунами в акватории с целью выбора наименее опасных по заданным критериям ее участков, допускающих размещение технических конструкций. Второй особенностью предлагаемого подхода стало рассмотрение различных конфигураций акватории, включающих варианты возведения защитных сооружений. Третьей особенностью является включение в массив результатов не только характеристик, полученных путем агрегации всей совокупности рассчитанных волновых параметров, но и материалов одного «типичного» сценария, наиболее близкого по некоторому критерию к

агрегированным параметрам. Наконец, в-четвертых, надо отметить оригинальный подход к формированию совокупности модельных цунамигенерирующих землетрясений и, в-пятых, использование материалов исследования палеоцунами для нормировки закона Гутенберга-Рихтера к условиям рассматриваемой акватории при определении средней повторяемости сейсмических событий.

Постановка задачи

Постановка задачи предусматривала определение зон акватории, в которых меры интенсивности цунами не превышали бы заданные пороговые значения в среднем один раз в заданный временной интервал. Для получения вероятностной оценки нужно вычислить интеграл:

$$W(I > I_{thre}) = \int_{\Omega} b(I(Q), I_{thre}) \cdot w(Q) dQ, \quad (1)$$

где Ω – пространство наборов параметров возможных источников цунами; $Q \in \Omega$ – параметры механизма одного источника [3, 15]; I – мера интенсивности цунами (здесь – максимальные амплитуды волн, их высоты и модули скорости); $I(Q)$ – значение этой меры для источника с параметрами Q , определяемое как результат численного моделирования; I_{thre} – пороговое значение меры интенсивности, для которого надо вычислить повторяемость; $w(Q)$ – плотность повторяемости источника с параметрами Q ; $W(I > I_{thre})$ – суммарная повторяемость превышения порогового значения интенсивности цунами от всех возможных источников;

$$b(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq y \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad \text{– бинарная индикаторная функция.}$$

Для вычисления интеграла в (1) методом Монте-Карло его нужно представить в виде

$$\int_{\omega} f(q) \cdot p(q) dq, \quad (2)$$

где $p(q)$ – некоторая плотность вероятности, носитель которой включает носитель функции $f(q)$, тогда значение интеграла (2) является математическим ожиданием случайной величины $f(q)$ и его можно оценить как выборочное среднее для некоторой выборки q_1, \dots, q_n :

$$\int_{\omega} f(q) \cdot p(q) dq = E(f(q)) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(q_i). \quad (3)$$

Методика решения задачи требует представления интеграла из (1) в виде (2) и генерации совокупности параметров механизмов очагов модельных цунамигенерирующих землетрясений Q_1, \dots, Q_n на самых первых этапах работы с использованием имеющихся исторических и натурных данных, а также экспертных знаний.

Методы оценки повторяемости модельных цунамигенерирующих землетрясений

Представим плотность повторяемости сейсмических источников цунами в виде:

$$w(Q) = W_{all} \cdot p_M(M) \cdot p_{\Omega}(Q|M), \quad (4)$$

где W_{all} – суммарная повторяемость всех источников цунами в исследуемой области, которую еще предстоит определить на основе исторических сведений и/или палеоисследований; $p_M(M)$ – плотность вероятности для магнитуд землетрясений, соответствующая закону Гутенберга-Рихтера, который в простейшем случае представляется экспоненциальным распределением, также определяемым на последующих этапах исследования. Плотность распределения остальных параметров очага при фиксированной магнитуде, $p_{\Omega}(Q|M)$, задается генератором соответствующей случайной величины, разработанный А.В. Ландером. Известно, что наилучшая сходимость метода Монте-Карло достигается когда, в интеграле (2) плотность $p(q)$ пропорциональна $|p(q) \cdot f(q)|$ (т.е. $|f(q)| = const$). На практике выбор такой плотности столь же трудоемок, как и вычисление интеграла (1), т.к. до начала интегрирования значения подынтегральной функции неизвестны. Кроме того, используемая в работе методика предполагает вычисление по одной выборке нескольких интегралов вида (2) для различных характеристик интенсивности цунами и их значений.

Принципы построения совокупности модельных цунамигенерирующих землетрясений

При генерации выборе распределения источников по магнитудам учитывалось, что чем больше магнитуда землетрясения, тем больше его цунамиопасность и, следовательно, его

значимость. Так как шкала магнитуд является логарифмической, то чем больше магнитуда землетрясения, тем меньше разброс его параметров (в первую очередь положения очага). Эти соображения говорят о том, что источников с большой магнитудой должно быть довольно много, но источников с малой магнитудой также должно быть достаточно для того, чтобы полноценно представить многообразие их параметров. Тогда не будут пропущены те из них, которые в силу своего «удачного» расположения являются опасными.

По результатам предварительных экспериментов было принято решение использовать при генерации источников простое равномерное распределение по магнитудам $p_{uni}(M)$, что приводит к такому преобразованию интеграла (1)

$$W(I > I_{thre}) = W_{all} \cdot \int_{\Omega} \frac{b(I(Q), I_{thre}) \cdot p_M(M)}{p_{uni}(M)} \cdot p_{uni}(M) \cdot p_{\Omega}(Q|M) dQ. \quad (5)$$

Поскольку размер созданной выборки (Рис. 1) мал, то при использовании равномерного распределения для магнитуд и координат эпицентров с большой вероятностью появятся области явного сгущения и разрежения выбранных значений этих параметров. Для того чтобы обойти такой эффект, пришлось несколько нарушить случайность генерируемой выборки. Для магнитуд использовался метод районированной выборки, следуя которому вся область генерируемых магнитуд разбивалась на подобласти (интервалами по 0.2 балла) и в каждую такую подобласть случайным образом помещалось равное число значений. Для определения координат эпицентров (центроидов площадки разрыва, без учета глубины) использовался алгоритм Митчелла [14].

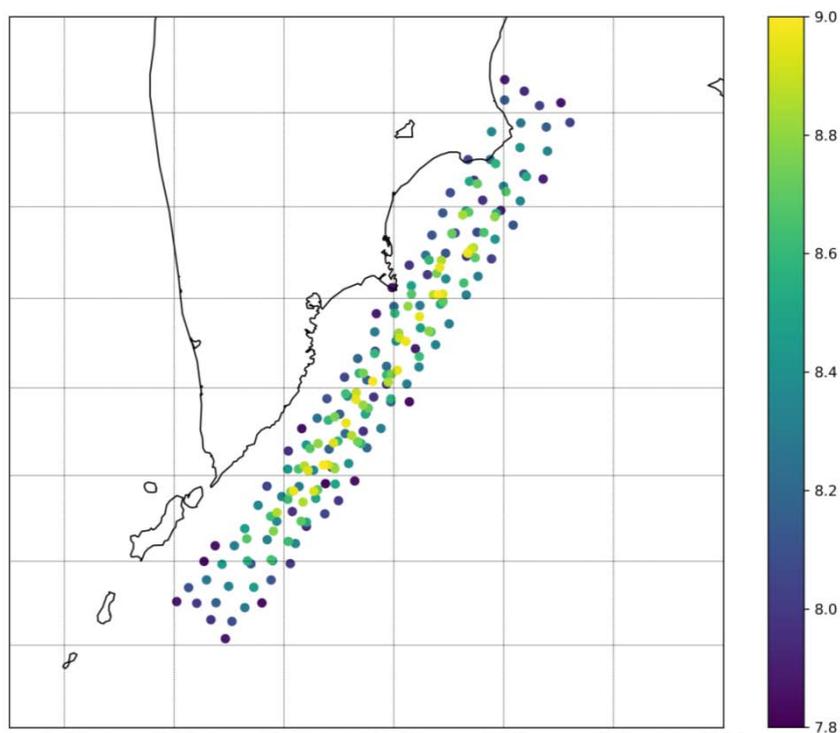


Рис. 1. Схема распределения центроидов модельных землетрясений по магнитуде.

Алгоритмы вероятностных оценок цунамиопасности

Интеграл цунамиопасности вычисляется методом Монте-Карло. Для этого он представляется в виде математического ожидания некоторой случайной величины:

$$W(I > I_{thre}) = W_{all} \cdot E \frac{b(I(Q), I_{thre}) \cdot p_M(M)}{p_{uni}(M)} \approx \frac{W_{all}}{N} \sum_{i=1}^N \frac{b(I(Q_i), I_{thre}) \cdot p_M(M_i)}{p_{uni}(M_i)}, \quad (6)$$

где $\{M_i, Q_i\}$ – некоторая выборка размера N случайной величины с плотностью $p_{uni}(M) \cdot p_{\Omega}(Q|M)$, $p_{\Omega}(Q|M)$ – плотность распределения остальных параметров очага при фиксированной магнитуде. Обозначив $I_i = I(Q_i)$ и $p_i = p_M(M_i) / p_{uni}(M_i)$, окончательно получим

$$W(I > I_{thre}) \approx \frac{W_{all}}{N} \sum_{i=1}^N b(I_i, I_{thre}) \cdot p_i. \quad (7)$$

Использованные алгоритмы расчета характеристик пуассоновского потока сейсмических событий $p_M(M)$ и W_{all} , а также вероятностных оценок для заданных уровней повторяемости событий основаны на результатах палеоисследований Т.К.Пинегиной. Величина $p_M(M)$ – плотность распределения магнитуд событий – соответствует наклону графика в законе повторяемости, а для непараметрической оценки плотности распределения использовался алгоритм Kernel density estimator из пакета `scipy` (<https://docs.scipy.org>). Для оценки величины W_{all} – средней повторяемости всего потока событий – использованы данные исследований палеоцунами. Относительно W_{all} решалось уравнение: $W(I > I_{paleo}) = N_{paleo} / T_{paleo}$. После вычисления $p_M(M)$ и W_{all} оказываются возможными вычисления интеграла цунамиопасности для любой характеристики $I(Q)$ и определить повторяемость превышения некоторого ее порога. Для нахождения пороговых характеристик, которые превышаются с заданной повторяемостью, полученные зависимости обращаются, после чего можно вычислить вероятность превышения в заданный промежуток времени $p = 1 - \exp(-W \cdot T)$, где W – средняя повторяемость превышения порога, T – период наблюдения.

Методика сценарного моделирования

Для определения меры интенсивности проявления волн цунами $I(Q)$ выполняется серийное сценарное моделирование трансформации волн цунами, которое проводилось в трех телескопически вложенных расчетных областях [2]: в «глобальной» с разрешающей способностью 30 географических секунд рассчитывалась генерация волны; в «промежуточной» (5 географических секунд) – подход волны к берегу; в «локальной» (0.5 географических секунд) – трансформация волны в бухте и заплеск на берег. Рельефы дна и суши расчетных областей были получены с помощью обработки массивов GEBCO-2009, ArcticDEM, SRTM и оцифровки навигационных карт. Для расчета начального возвышения использовалась «поршневая» модель сейсмического источника, в рамках которой вертикальные движения дна, являющиеся остаточными смещениями поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа [3, 15].

Моделирование трансформации волн цунами выполнялось программной системой MGC [8], реализующей явную схему типа МакКормака, аппроксимирующую классические уравнения мелкой воды [13] с учетом нелинейности, сферичности Земли, силы Кориолиса и донного трения. На последнем уровне вложения выполнялось моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц [1], также аппроксимирующего нелинейные уравнения теории мелкой воды [7].

Обсуждение результатов

В совокупность результатов исследования были включены не только «агрегированные» по всем сценариям значения, которые могут быть достигнуты в заданной точке расчетной области с заданной повторяемостью (Рис. 2), но и необходимые для решения ряда инженерных задач характеристики волновой динамики в заданных точках акватории. Такие функциональные временные зависимости определялись по результатам моделирования «типичных» сценариев, подбираемых для каждого периода повторяемости с использованием заданного критерия. Результаты исследования показали, что влияние волнозащитных сооружений на амплитуды и высоты волн зависит от места их размещения и от заданного периода повторяемости. На скорости течений волнозащитные сооружения влияют только в окрестности самих сооружений, которые практически не влияют на характеристики заплеска цунами на берег.

Заключение

Предложенная методика представляет основу для решения ряда задач вероятностного локального цунамирайонирования. Она реализована в виде комплекса программ, обеспечивающих полноту обработки входной информации и выполнение численного моделирования, пре- и постпроцессинга. Расширение ее функциональности возможно путем учета несейсмических механизмов генерации волн цунами, повышения эффективности сценарных расчетов адаптацией к особенностям современных вычислительных устройств, так и выделением наиболее значимых параметров явлений, порождающих волны цунами. Важным направлением является также переход от оценки цунамиопасности (РТНА) к оценке цунамириска (РТРА).

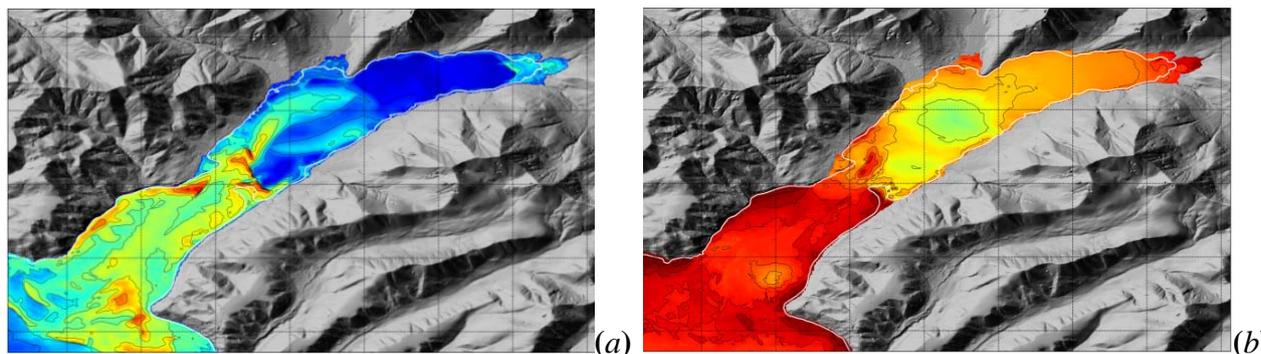


Рис. 2. Агрегированные для повторяемости в среднем 1 раз в 1000 лет: (а) – максимальные модули скорости, (б) – максимальные амплитуды волн

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.В.Ландеру и Т.К.Пинегиной за предоставленные материалы для генерации совокупности модельных сейсмических источников и результаты исследования палеоцунами.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта РФФ № 14-17-00219.

Список литературы

1. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
2. Гусев О.И., Чубаров Л.Б. Об использовании телескопически вложенных сеток в расчетах распространения волн цунами // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 23 по 25 мая 2018 г., Санкт-Петербург, Россия. СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 224–226.
3. Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23–51.
4. Гусяков В.К. Методы и проблемы оценки цунамиопасности морских побережий // Фундаментальная и прикладная геофизика. 2017. Т. 10. № 3. С. 26–38.
5. Гусяков В.К. и др. Построение обзорных карт цунамирайонирования дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 55–72.
6. Куликов Е.А., и др. К вопросу о цунамиопасности арктического региона. // Арктика: экология и экономика. 2016. Т. № 3. С. 38–49.
7. Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б. Программа для ЭВМ: Модуль расчета наката волн цунами на берег RunUp-LP // Свидетельство о гос. регистрации программ. 2013. № 2013617980.
8. Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик волн цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о гос. регистрации программ. 2011. № 2011614598.
9. Grezio A., et al Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple sources and global applications // Reviews of Geophysics. 2017. V. 55. P. 1158–1198.
10. Gusiakov V.K. Tsunamis on the Russian Pacific Coast: History and Current Situation // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57. No 9. P. 1259–1268.
11. Lorito S., et al Probabilistic hazard for seismically induced tsunamis: accuracy and feasibility of inundation maps // Geophys. J. Int. 2015. V. 200. P. 574–588.
12. Løvholt F., et al Global Trends in Advancing Tsunami Science for Improved Hazard and Risk Understanding // https://www.researchgate.net/publication/334305239_Global_trends_in_advancing_tsunami_science_for_improved_hazard_and_risk_understanding. All content following this page was uploaded by Finn Løvholt on 14 July 2019. 50 p.
13. MacCormack R.W. The Effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // AIAA. 1969. P. 69–354.
14. Mitchell Don P. Spectrally optimal sampling for distribution ray tracing // SIGGRAPH Comput. Graph. 1991. V. 25. No 4. P. 157–164.
15. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of the Seismolog. Soc. of America. 1985. V. 75. No. 4. P. 1135–1154.