

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Аннотация

По результатам математического моделирования получены оценки цунамиопасности нескольких участков побережья Камчатки с использованием методик «Worst-case» и Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (РТНА). Последняя включает анализ сейсмотектоники региона, конструирование каталога модельных цунамигенерирующих землетрясений, определение их статистических характеристик, сценарное численное моделирование динамики волн цунами, определение значений меры волнового воздействия, которые могут быть превышены с заданной повторяемостью, например, «в среднем 1 раз в 100 лет». Сценарное численное моделирование выполнялось в рамках модели мелкой воды с использованием алгоритмов наката волн на берег и телескопизации расчётных сеток. При необходимости размещения плавучих объектов в исследуемых бухтах расчёт возможных силовых нагрузок выполнялся в рамках модели потенциальных течений идеальной жидкости. Результаты работы использовались для проектирования сооружений, в том числе для расчёта необходимой массы (расположения) якорей, чтобы плавучий объект не сдвинуло волной цунами на берег или другое препятствие.

2. Тема работы

Оценка цунамиопасности побережий методами математического моделирования

3. Состав коллектива

к.ф.-м.н. Бейзель Софья Александровна (н.с. ФИЦ ИВТ)

к.ф.-м.н. Гусев Олег Игоревич (с.н.с. ФИЦ ИВТ, старший преподаватель НГУ каф. МатМод)

д.ф.-м.н., проф. Чубаров Леонид Борисович (г.н.с. ФИЦ ИВТ)

д.ф.-м.н., проф. Хакимзянов Гаяз Салимович (в.н.с. ФИЦ ИВТ, проф. НГУ каф. МатМод)

4. Информация о гранте

Часть работ выполнена по договору (№ 0-86-21 от 21 сентября 2021 г) НГУ с ЗАО «ГТ Морстрой» о выполнении НИР по теме «Экспертная оценка проявлений волн-цунами в бухте Раковая и в смежных акваториях, а также степени их воздействия на судно (ПРГУ)» в составе Основных технических решений по объекту «Регазификационный комплекс СПГ в Камчатском крае»

5. Научное содержание работы

5.1. Постановка задачи

Одним из вариантов использования результатов сценарных расчетов для решения задачи цунамирайонирования является определение экстремальных (worst case) характеристик воздействия волны цунами на побережье и прибрежные объекты. Для этого рассматриваются сильнейшие возможные источники цунами, определяемые из сейсмичности потенциально опасных регионов, для каждого источника такого проводятся расчёты образования, распространения и воздействия волн цунами на исследуемое побережье, и выбирается «наихудший» случай.

Интенсификация применения методов математического моделирования к решению задач волновой гидродинамики, существенный рост доступных вычислительных ресурсов и средств реализации численных алгоритмов позволили перейти к реализации методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), близкой к методике оценки сейсмической опасности PSHA (см., например, [1]). Сценарное моделирование цунами в РТНА требует предварительного построения региональных эмпирических распределений всех параметров сейсмичности, на основе которых создается синтетический каталог землетрясений (содержащий сотни, тысячи, а иногда и десятки тысяч источников), обладающий статистическими свойствами, близкими к свойствам региональной сейсмичности, и воспроизводящий характерные особенности местных очагов землетрясений. Очаги землетрясений этого каталога служат

входными данными для сценарного моделирования распространения волн цунами и их взаимодействия с побережьем. Предполагается, что статистические свойства характеристик проявления волн цунами, порожденных землетрясениями из этого каталога, также будут соответствовать реальности. После конструирования совокупности модельных источников цунамигенерирующих землетрясений проводятся массовые сценарные расчеты, определяется повторяемость таких событий по каталогам исторических и инструментальных данных, а также с помощью той или иной интерпретации закона Гутенберга-Рихтера, затем повторяемости сейсмических событий конвертируются в повторяемость меры интенсивности цунами, наконец, результаты представляются в форме, удовлетворяющей требованиям заинтересованных лиц и организаций.

В случае проектирования какого-либо плавучего объекта вблизи исследуемого побережья необходимы расчёты возможных силовых нагрузок волн цунами на сооружение. В настоящей работе эти расчёты выполнялись для «наихудших» или «типичных для некоторой повторяемости» волн цунами в рамках модели потенциальных течений идеальной жидкости.

5.2. Современное состояние проблемы

Подробные обзоры работ, посвященных теоретическим аспектам методики РТНА и ее практическому применению, содержатся в недавних публикациях [2,3]. В России работы по вероятностной количественной 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 [4]; в ИО РАН – для оценки цунамиопасности Арктического побережья страны [5].

5.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В работе использовалась общепринятая «поршневая» модель сейсмического источника, в рамках которой вертикальные движения дна бассейна в очаговой области подводного землетрясения представляют остаточные (статические) смещения поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа [6].

Расчёты характеристик трансформации волн цунами проводились с использованием программной системы MGC, основанной на явной двухшаговой схеме типа МакКормака второго порядка аппроксимации для классической модели мелкой воды, учитывающей нелинейность волнового процесса, кривизну земной поверхности, силу Кориолиса, а также шероховатость дна [7].

Для обеспечения необходимой точности результатов вблизи целевого участка побережья в соответствии с требованиями Задания использовалась методика расчетов на последовательности вложенных сеток, детальность которых увеличивалась с уменьшением глубины акватории вблизи этого участка. Таких вложений может быть несколько, если этого требует задача. Подробное описание используемых методов «телескопизации расчетов» и их верификация изложены в работе [8].

На последнем уровне вложения выполняется моделирование наката волн цунами на побережье со сложным рельефом береговой кромки. Нелинейные уравнения теории мелкой воды численно решаются методом крупных частиц [9]. В этом методе используется явная разностная схема первого порядка аппроксимации. Поскольку в силу изрезанности берегового рельефа суши для получения адекватного численного решения необходимо использовать детальную разностную сетку, применение схемы первого порядка точности, обладающей к тому же монотонными свойствами, вполне оправдано. Валидация модели, описание метода и его реализации в программном комплексе MGC представлены в работе [10].

Для получения вероятностных оценок цунамиопасности рассмотрим модельные землетрясения, эпицентры которых расположены в изучаемом регионе и его окрестности, генерирующие волны цунами в географической точке с координатами (x, y) . Пусть I – некоторая мера интенсивности этих волн. Будем считать «цунамиопасными» по порогу I_{thre} события, для которых $I > I_{thre}$. Повторяемость таких событий W может быть выражена интегралом:

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

где Ω – множество в пространстве параметров землетрясений, соответствующее рассматриваемым источникам цунами; $Q \in \Omega$ – совокупность параметров одного источника (в контексте настоящей работы это пространственные координаты центроида, параметры модели Гусякова-Окады [6] – механизм и размеры, а также магнитуда); $w(Q)$ – повторяемость (плотность повторяемости) источника с параметрами Q (далее переменная Q будет использована также и для обозначения землетрясения (события) с параметрами Q); $I(Q, x, y)$ – значение меры интенсивности волны цунами в точке (x, y) , порожденной источником Q ;

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

Интегрирование в (1) проводится по пространству параметров высокой размерности, а сценарный расчет $I(Q, x, y)$ для каждого источника требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому вычисление интеграла (1) удобно проводить методом Монте-Карло. Для этого функция $w(Q)$ в (1) записывается в виде

$$w(Q) = W_{all} \cdot p_{\Omega}(Q) \quad (2)$$

где W_{all} – средняя повторяемость всех землетрясений рассматриваемого магнитудного диапазона в исследуемой области, а $p_{\Omega}(Q)$ представляется как плотность вероятности события Q . Тогда в (1) повторяемость $W(I > I_{thre}, x, y)$ можно рассматривать как математическое ожидание функции $W_{all} \cdot b(I(Q, x, y), I_{thre})$ и оценить его как среднее значение последовательности:

$$W(I > I_{thre}, x, y) \approx \frac{W_{all}}{N} \sum_{i=1}^N b(I(Q_i, x, y), I_{thre}) \quad (1)$$

где Q_i (параметры i -го землетрясения) – независимые реализации случайной величины Q , подчиняющейся распределению $p_{\Omega}(Q)$, N – длина последовательности Q_i .

Заметим, что способ вычисления интеграла (1), основанный непосредственно на соотношениях (2) и (1), в контексте рассматриваемой задачи обладает серьезными недостатками. Причина этого связана с особенностями существенной зависимости входящих в интеграл (1) функций $I(Q, x, y)$ и $w(Q)$ от одного из параметров землетрясения – магнитуды M_w . Дело в том, что обе функции изменяются в рассматриваемом магнитудном диапазоне в широких пределах и разнонаправленно. При фиксировании остальных входящих в Q параметров функция $I(M_w, x, y)$ растет с увеличением магнитуды, а зависимость величины $w(Q)$ от магнитуды M_w при этом убывает. В результате последовательность очагов Q_i содержит много событий с малыми магнитудами, которым соответствуют малые меры интенсивности цунами $I(Q, x, y)$ и нулевые слагаемые в сумме (1). Определение величин $I(Q, x, y)$ для таких событий оказывается излишним, так как в конечном итоге не влияет на оценку повторяемости цунамиопасных событий $W(I > I_{thre}, x, y)$.

Недостатки прямого использования соотношений (2) и (3) преодолеваются формальной заменой магнитудной зависимости в $p_{\Omega}(Q)$ на другое распределение, более удобное для вычислений. Выделим явно магнитуду M_w , записав $Q = (M_w, q)$, где q – остальные параметры источника землетрясения. Тогда, воспользовавшись формулой для условной вероятности, соотношение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** можно переписать в виде:

$$w(Q) = W_{all} \cdot p_M(M_w) \cdot p_q(q | M_w) = W_{all} \frac{p_M(M_w)}{p_U(M_w)} [p_U(M_w) \cdot p_q(q | M_w)] = W_{all} \frac{p_M(M_w)}{p_U(M_w)} \tilde{p}_{\Omega}(\tilde{Q}) \quad (4)$$

где распределение $p_U(M_w)$ может быть выбрано любым удобным образом, обозначение \tilde{Q} отмечает, что параметры землетрясений обладают теперь на множестве Ω новой плотностью распределения $\tilde{p}_\Omega(\tilde{Q})$, причем маргинальная плотность последнего по магнитуде равна $p_U(M_w)$. В настоящей работе использован простейший вариант с равномерным распределением по магнитуде,

$$p_U(M_w) \equiv p_U = \frac{1}{\Delta M}. \quad (2)$$

Подставляя $w(Q)$ из (4) в интеграл (1), и, аналогично, преобразуя его в сумму типа (3), получим:

$$W(I > I_{thre}, x, y) \approx \frac{W_{all}}{\tilde{N}} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} b(I(\tilde{Q}_i, x, y), I_{thre}) \cdot K(M_w^i), \quad (6)$$

где $K(M_w^i) = p_M(M_w^i) / p_U$. Выражение (6) отличается от (3) присутствием весовых множителей $K(M_i)$, и тем, что последовательность источников цунами \tilde{Q}_i (длиной \tilde{N}) вырабатывается согласно новому, построенному в (4), распределению $\tilde{p}_\Omega(\tilde{Q}) = p_U \cdot p_q(q | M_w)$, не обладающему недостатками последовательности Q_i . Использованный в настоящей работе синтетический каталог землетрясений соответствует последовательности \tilde{Q}_i .

Функция $p_M(M_w)$ в (4) и (6) соответствует классическому закону повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. В настоящей работе $p_M(M_w)$ построена по региональным выборкам из каталогов Международного Сейсмологического центра ISC [11] с добавлением результатов исследований палеоземлетрясений Камчатки [12]. Плотность распределения по магнитудам $p_M(M_w)$ была нормирована так, чтобы интеграл $\int_{\Delta M} p_M(M_w) dM$ равнялся 1 на интервале ΔM . Другой нормировочный параметр W_{all} (средняя повторяемость всех используемых землетрясений), входящий в (6), вычисляется для $M \geq 7.8$ также, исходя из данных каталога ISC для Камчатского региона: $W_{all} = 0.0777 \text{ год}^{-1}$, что примерно соответствует семи землетрясениями за 90 лет.

5.4. Полученные результаты

Одним из наиболее значимых является результат, связанный с определением наиболее безопасных участков акватории одной из камчатских бухт и позволяющий принять решение о выборе мест, пригодных для размещения планируемых объектов. Для средней повторяемости 1 раз в 100 лет на рисунке 1 представлены участки для следующих пороговых значений: высота волны менее 3.5 м, амплитуда менее 2 м, скорость менее 2 м/сек.



Рисунок 1 – Зонирование акватории в условиях отсутствия защитных сооружений для повторяемости 1 раз в 100 лет при пороговых значениях по размаху волны 3.5 м, по амплитуде 2 м, по скорости 2 м/сек

После получения оценок высот волн, ожидаемых в бухте, проводилось моделирование воздействия одиночных волн со схожими параметрами на модель проектируемого объекта. Эти расчёты выполнялись в рамках трёхмерной модели потенциальных течений идеальной жидкости на адаптивных сетках. Таким образом удавалось определить возможные нагрузки на объект в различных его положениях (см. пример на Рисунке 2).

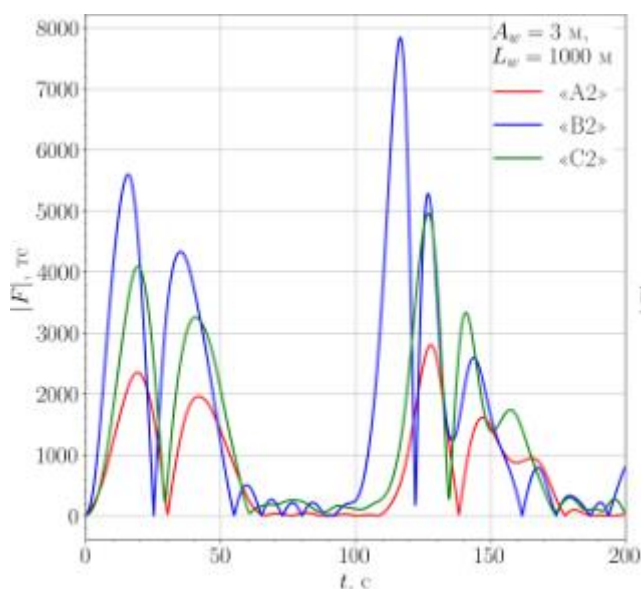


Рисунок 2 – Хронограммы модуля суммарной волновой силы в расчётах с одиночной волной амплитуды $A_w = 3$ м и длины $L_w = 1000$ м, когда фронт волны параллелен короткому борту объекта («A2»), длинному борту («B2») и под углом 45 градусов («C2»)

1. H. Castaños, C. Lomnitz, PSHA: Is it science? Eng. Geol. 66, 315–317 (2002).
2. Grezio A., et al Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple sources and global applications // Reviews of Geophysics. 2017. V. 55. P. 1158–1198.
3. Løvholt F., et al. Global Trends in Advancing Tsunami Science for Improved Hazard and Risk Understanding (2019) https://www.preventionweb.net/files/65806_f209finalfinnløvholtholgtrendsina.pdf
4. 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.
5. Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Яковенко О.И., Ковачев С.А. 2016. К вопросу о цунамиопасности арктического региона. Арктика: экология и экономика. 2016. № 3 (23). С. 38–49.
6. 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.
7. Shokin Yu.I. et al. Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // E.Krause et al. (Eds.): Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V. 101. P. 52–68.
8. Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Алгоритмы и методики численного моделирования наката волн цунами на берег в приложении к оценке характеристик заплеска волн на Дальневосточное побережье России // В кн.: ISBN 978-5-44-690306-1, Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 27 по 29 мая 2014 г., Санкт-Петербург, Россия. - СПб.: Нестор-История. 2014. - 626 с. стр. 228 – 230.

9. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.; Наука. 1982. 392 с.
10. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 1. С. 99–112.
11. Di Giacomo, D., E.R. Engdahl and D.A. Storchak. The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, (2018) 1877-1899, doi: 10.5194/essd-10-1877-2018.
12. Пинегина Т. К., Базанова Л. И. Новые данные о параметрах исторических цунами на побережье Авачинского залива (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 31. – №. 3.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Использование оборудования ИВЦ НГУ является значимой частью всей работы, поскольку для получения вероятностных оценок необходимо проводить сотни, а иногда и тысячи сценарных расчётов, каждый из которых при моделировании наката волн может занимать несколько суток. Использование многопроцессорных суперкомпьютеров с этой точки зрения является обязательным условием, поскольку позволяет параллельно запускать сразу ряд расчётов, что на персональных компьютерах является невозможным.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

Chubarov L.B., Kikhtenko V.A., Lander A.V., Gusev O.I., Beisel S.A., Pinegina T.K. Technique of local probabilistic tsunami zonation for near-field seismic sources applied to the Bechevinskaya Cove (the Kamchatka Peninsula) // *Natural Hazards*. - 2022. - Vol.110. - Iss. 1. - P.373-406.

Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Numerical investigation of the wave force on a partially immersed rectangular structure: Long waves over a flat bottom // *Ocean Engineering*. - 2021. - Vol.221. - Art.108540.

Бейзель С.А., Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. Численное моделирование волнового режима, порожденного Камчатским мега-цунами 1952 г. в одной из внутренних бухт Авачинской губы // IV Всероссийская научная конференция с международным участием «Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз» (Москва, 15-16 ноября 2022 г.): Сборник тезисов докладов. - 2022. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН. - С.6.

Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С. Силовое воздействие длинных поверхностных волн на полупогруженное в воду тело. I. Влияние формы набегающей волны // *Вычислительные технологии*. - 2022. - Т.27. - № 4. - С.33-62.

Чубаров Л.Б., Гусев О.И., Скиба В.С., Хакимзянов Г.С. Моделирование взаимодействия длинных волн с берегом и прибрежными конструкциями // Всероссийская конференция с международным участием «Нелинейные волны – 2022» (Новосибирск, 2–4 марта 2022 г.). - 2022. - Новосибирск: ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. - С.17.