

К ВОПРОСУ О СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЦУНАМИГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гусяков В.К.¹, Кихтенко В.А.², Чубаров Л.Б.^{2,3}

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск

² Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, chubarov@ict.nsc.ru

³ Новосибирский государственный университет г. Новосибирск

Введение

Необходимые для оценки цунами опасности побережий сценарные расчеты нуждаются в формировании совокупности начальных возмущений, полнота и адекватность которой в значительной степени определяют качество оценки. Такие начальные возмущения вычисляются, как правило, с помощью модели очага подводного землетрясения, предложенной в работах [1, 2, 9].

Известны два подхода к формированию совокупности гипотетических цунамигенных землетрясений. Один из них, «детерминистский», состоит в явном определении значений параметров механизмов очагов по доступной системе представлений о сейсмотектонике исследуемой области. Второй, «вероятностный», подход предполагает задание этих параметров неявно, в виде законов их распределений, которые затем используются для случайной генерации конкретных очагов. Таким образом, возможен учет неопределенностей в экспертных оценках параметров. Каждый из этих подходов обладает некоторыми недостатками. Оба зачастую сталкиваются с отсутствием необходимых экспертных знаний о региональной сейсмотектонике. «Вероятностный», в силу большого размера пространства параметров, порождает очень большие (порядка 1 000 000) наборы модельных очагов и требует больших вычислительных ресурсов. Эти проблемы могут быть несколько смягчены за счет выявления части наиболее значимых параметров и концентрации усилий на них. Разработка методик оценки влияния значимости входных параметров (sensitivity analysis) началась в середине XX века и продолжается до сих пор [10].

В настоящем докладе излагаются результаты для российской части япономорского побережья и модельных цунамигенных землетрясений в акватории Японского моря. Эта работа выполнялась по методике, близкой изложенной в [4, 5]. Полученные оценки оказались довольно близки оценкам авторов работы [5] выполнявших исследования цунамиопасности участка побережья Аляски. Этот результат наводит на мысль о возможной универсальности или устойчивости иерархии параметров механизмов очагов цунамигенных землетрясений по их значимости относительно выбора региона.

О методике сценарных расчетов и механизме цунамигенного землетрясения

Сценарное моделирование трансформации волн цунами на трассах от зоны генерации к берегу выполняется, обычно, в рамках уравнений волновой гидродинамики различных порядков гидродинамической аппроксимации. Излагаемые результаты были получены с использованием нелинейных уравнений теории мелкой воды, учитывающих сферичность Земли и силы Кориолиса. Расчеты проводились с помощью программного комплекса MGC [11], ядро которого реализует конечно-разностный алгоритм, основанный на схеме Мак-Кормака [7]. Расчетная область простиралась по долготе от 127°E до 171°E и по широте от 35°N до 63°N (рис. 1), цифровая модель соответствующего фрагмента рельефа дна с тридцатисекундным разрешением была построена методом кусочно-билинейной интерполяции на основе открытого массива данных GEBCO–2009–1 min (GEBCO, 2009). Динамика волнового процесса моделировалась на 24 часа физического времени. В точках расчетной сетки, соответствующих первоначальному положению линии уреза ставилось граничное условие непротекания (условие «отражающей стенки»), так что процесс наката волн на сушу не моделировался. Для того, чтобы избежать эффекта «осушения» дна и последующего развития численной неустойчивости при взаимодействии волн с отражающей стенкой прибрежные глубины меньшие заданной пороговой величины H_{\min} заменялись этим значением. Для различных магнитуд M_w землетрясений, порождающих волны цунами, величины H_{\min} были различны: для $M_w = 7.2$ и $M_w = 7.8 - H_{\min} = 10$ м, для $M_w = 8.4 - H_{\min} = 15$ м, для $M_w = 9.0 - H_{\min} = 20$ м.

Основным результатом расчетов являлись значения максимальных смещений уровня вдоль берега, вычисленные в ближайших к суше точках расчетной области A_{ij} , где индекс i – соответствует номеру берегового пункта, а j – номеру источника. Часть из этих точек (4711) включены в Систему наблюдения, простирающуюся вдоль всего российского побережья Дальнего Востока, от Приморья до Командорских островов, со средним расстоянием между точками около 4 км. При построении этой

системы в нее включались точки расчетной береговой линии, соответствующие наиболее значимым объектам и географическим структурам – мысы, бухты и т.п.

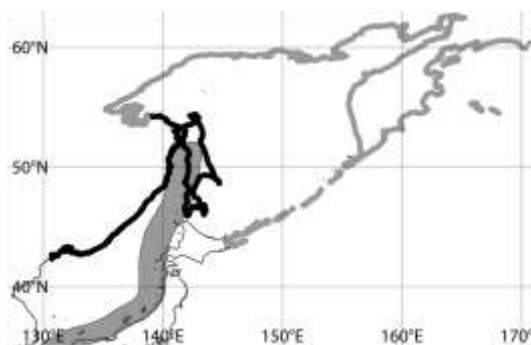


Рис. 1. Картограмма расчетной области. Выделена часть береговой линии, составляющая Систему наблюдений. Серая область – исследуемая сейсмогенная зона

В качестве модели возбуждения цунами при численных расчетах чаще всего используется так называемая «поршневая модель», в рамках которой вертикальные движения дна бассейна в очаговой области подводного землетрясения либо вводятся в уравнение неразрывности соответствующей гидродинамической модели, либо определяют начальное состояние свободной поверхности океана. Такие смещения рассчитываются обычно по формулам, выведенным в [9] и представляющим остаточные (статические) смещения поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа.

В настоящей работе использованы аналогичные формулы, полученные В.К. Гусяковым в [1] на семь лет ранее И. Окады. Несмотря на различия в форме записи итоговых выражений для компонент смещений, полученных в этих работах, многочисленные проверки показали полное соответствие значений рассчитанных смещений при любых наборах параметров модельных очагов.

Представленные результаты получены с использованием в качестве начальных данных остаточных смещений, рассчитанных с помощью алгоритма, изложенного в [1]. Этот алгоритм требует задания следующих параметров очаговой модели: L – длина площадки в плоскости разлома, W – ширина площадки в плоскости разлома, δ – угол падения плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости), λ – направление подвижки в плоскости разлома (отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома), D_0 – величина подвижки в плоскости разлома, h – глубина верхнего края разрыва, θ – угол, определяющий ориентацию линии наблюдения относительно области простирания разрыва.

Детерминистский подход к формированию совокупности модельных цунамигенных землетрясений предполагает, что значения параметров L , W и D_0 выводятся из корреляционных соотношений с магнитудой землетрясения M_w , глубина верхнего края разрыва h , углы δ и λ определяются из экспертной оценки, а угол θ принимается близким углу простирания глубоководной впадины или по ориентации береговой линии в районе очага землетрясения.

Оценка значимости параметров цунамигенных землетрясений

Для исследования был построен набор из 3946 источников модельных землетрясений с магнитудой $M_w = 7.8$. Их положения (широта и долгота) были распределены равномерно в заданной сейсмогенной зоне (рис. 1) с линейным затуханием у границы зоны шириной 50 км; параметры H_{top} , L , W , δ , λ , θ – также были равномерно в соответствующих интервалах значений [0, 50] км, [70, 155] км, [30, 51] км, [45°, 135°], [45°, 135°], [-180°, 180°]. Значения D_0 определялись по формулам $M_0 = \mu L W D_0$, при $M_w = (\lg M_0 - 9.1) / 1.5$, $\mu = 5 \cdot 10^{10}$ н/м² [3]. Границы интервалов для L и W вычислены по эмпирическим соотношениям из [12]. Стоит отметить, что предложенный выше способ определения параметров допускает создание *геофизически нереализуемых по углу θ* источников, что учитывается при интерпретации результатов. Для каждого из источников был проведен сценарный расчет распространения волны цунами от зоны генерации начального возмущения к берегу.

Один из методов, использованных в работе, основан на применении линейного корреляционного анализа зависимостей интегральной энергетической характеристики

$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N \max_t (A_{i,j}(t; p))^2}$ от каждого параметра p . Результаты этого анализа (рис. 2а) явно

демонстрируют существенную зависимость от географического положения и глубины эпицентра. Причем зависимость от координат эпицентра выявляет наибольшую опасность для Дальневосточного побережья РФ источников, расположенных в северо-восточной части сейсмогенной зоны Японского моря. Аналогичный анализ для подмножества источников только с геофизически реализуемыми азимутами θ с отклонением от «базового» (совпадающего с геофизически обоснованным) не более чем на 30° показывает также значимость этого параметра, что объясняется естественной связью направления разлома и географических координат. Надо заметить, что характер графиков не меняется при замене исследуемой характеристики E_i на величину максимальной амплитуды $A_i = \max_{j,t} A_{i,j}(t; p)$.

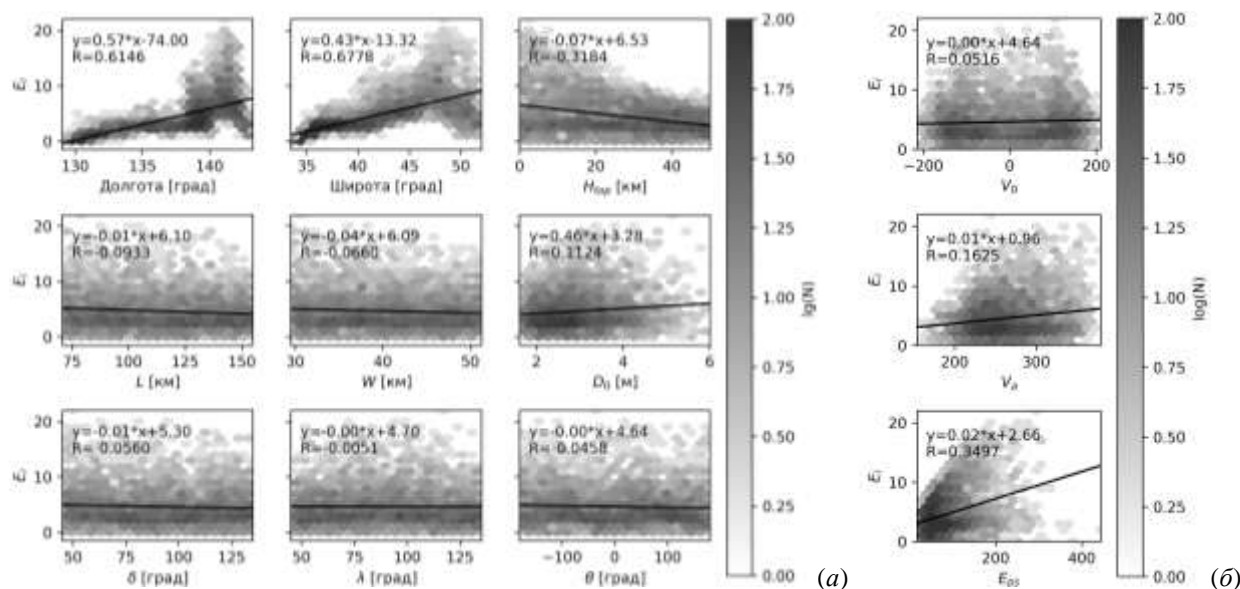


Рис. 2. Зависимости величины E_i от (а) – различных параметров очаговой модели, (б) – интегральных характеристик начального смещения свободной поверхности. Оттенок серого указывает на число источников, порождающих соответствующую максимальную амплитуду. Жирной сплошной линией изображена линия тренда, в поле графиков указана ее форма и коэффициент корреляции R

Рассмотрение зависимостей величины E_i не от параметров очаговой модели, а от некоторых производных интегральных характеристик порождаемых источниками начальных возмущений приводит к результатам, изображенным на рис. 2б. Здесь $V_0 = \sum_{k,l} \eta_{k,l}^0$ – сумма сеточных значений начального смещения свободной поверхности, $V_a = \sum_{k,l} |\eta_{k,l}^0|$ – то же для абсолютных значений,

$E_{ps} = \sum_{k,l} (\eta_{k,l}^0)^2$ – аналог потенциальной энергии начального возмущения. Здесь обращает на себя внимание некоторая бимодальность распределения E_{ps} , которая, указывает на возможность разделения источников на группы, обладающие различной степенью цунамиопасности.

Еще один подход к анализу значимости параметров связан с использованием метода MOGSA [4], суть которого состоит в том, что все множество модельных источников делится по некоторому критерию на два подмножества, условно называемые «опасным» и «неопасным». Затем для каждого параметра производится сравнение выборочных распределений у «опасного» и «неопасного» подмножеств с помощью критерия Колмогорова-Смирнова [6]. Определенные таким образом величины « p -value» теста используется в качестве меры значимости параметра. Установив некоторое пороговое значение, можно разделить параметры на значимые и незначимые.

Этот метод позволяет широко варьировать критерий разделения множества источников. Один из вариантов метода состоит в анализе каждого берегового пункта *по отдельности* с последующей *агрегацией* результатов, например, путем определения медианного значения p -value по всей Системе наблюдения (рис. 3а). Другой вариант предполагает разделение источников по значению некоторой *интегральной* меры, учитывающей проявления волны по всей береговой линии. И в тот и другой метод требуют задания некоторых пороговых значений для критериев разделения (рис. 3с,д). В настоящей работе использовались две меры – A_i и E_i , а в качестве пороговых значений – 20-й, 50-й и

80-й проценти распределений соответствующих мер.

Наконец, можно из всего множества источников выбрать наиболее опасные используя критерий оптимальности Парето [8]. Его применение потребовало несколько сократить систему наблюдения, оставив в ней только точки, принадлежащие российской части береговой линии Японского моря и о. Сахалин (рис. 1), т.к. в остальных пунктах системы наблюдений уровни волн не превышали 0.1 м и по сути являлись шумом, затрудняющим выделение фронта Парето. Этот метод не требует задания никаких пороговых значений (рис. 3b).

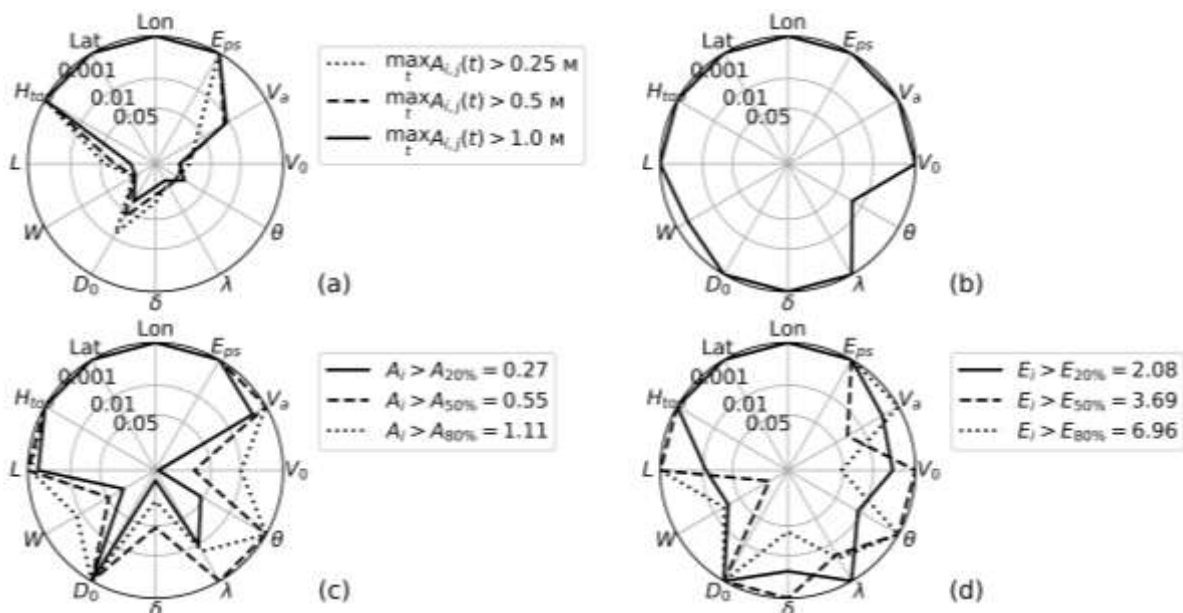


Рис. 3. Диаграммы значимости относительно Дальневосточного побережья РФ различных характеристик модельных источников цунамигенных землетрясений акватории Японского моря: для различных критериев разделения источников: (a) – на основе максимальных амплитуд в каждом пункте Системы наблюдения по отдельности (с вычислением медианного значения по всем пунктам), (b) – с использованием критерия оптимальности по Парето, (c, d) – по значениям интегральных мер A_i и E_i , соответственно. В легендах указаны пороговые значения используемых мер. Окружностями отмечены уровни величины «p-value» – с уменьшением значения этой величины увеличивается значимость рассматриваемой характеристики

Заключение

Представленные результаты подтверждают определяющую роль географического положения и глубины залегания гипоцентра в цунамиэффективности землетрясения фиксированной магнитуды. Это подтверждается всеми использованными методами статистического анализа (рис. 2a, 3). Зависимость от географического положения проявляется локально (для отдельных пунктов – рис. 3a), и глобально (при анализе интегрального воздействия на всю береговую линию – рис. 3b, c, d). Для отдельных береговых пунктов решающим фактором оказывается близость цунамигенного источника к защищаемому пункту, а при анализе глобального воздействия проявляется влияние особенностей батиметрии акватории, определяющей опасные положения очагов.

В то же время, анализ значимости параметров по методу MOGSA с использованием интегральных критериев (рис. 3b, c, d), приводит к выводу о статистической значимости и других параметров очаговых моделей, которые должны быть тем или иным образом учтены при создании обзорных карт цунамиопасности. Этот факт не выявляется простейшим линейным корреляционным анализом (рис. 2a). Конкретный набор статистически значимых параметров меняется в зависимости от используемых метрик цунамиопасности и их пороговых значений, поэтому однозначно упорядочить параметры по степени значимости не представляется возможным.

Примечательно, что при сравнении двух выборок, в одной из которых параметры определяются полностью случайным образом, а во второй – с учетом геофизических соображений последняя показала большую цунамиопасность. Этот результат иллюстрируется рисунком (рис. 4), на котором представлены зависимости интегральной характеристики E – энергетического воздействия модельных волн цунами на Дальневосточное побережье РФ от n – числа модельных источников,

используемых в сценарных расчетах: $E(n) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \max_{j \leq n} \left(\max_t (A(t)_{i,j})^2 \right)}$. Здесь сплошной линией

изображена кривая, соответствующая источникам («стохастическим») с полностью случайными наборами параметров, а штриховой – со значениями угла θ° , случайным образом отклоняющимися не более, чем на 30° от «базового» направления и полностью случайными значениями остальных параметров. Следует заметить, что оценка значимости параметров модельных землетрясений при этом не меняется.

Из общих соображений можно предположить, что при увеличении числа модельных источников исследуемая энергетическая характеристика должна стремиться к некоторому асимптотическому значению. Однако скорость такой сходимости может зависеть от способа определения суммируемых величин – либо как функций точек, входящих в систему наблюдения либо как некоторых мер, вычисляемые по заданным окрестностям этих точек.

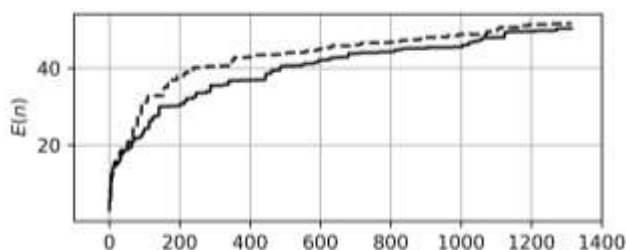


Рис. 4. Зависимости интегральной характеристики E – энергетического воздействия модельных волн цунами на побережье от числа модельных источников, используемых в сценарных расчетах: **сплошной** линией изображена кривая, соответствующая источникам с полностью случайными наборами параметров, а **штриховой** – со значениями угла θ° , случайным образом отклоняющимися не более, чем на 30° от «базового» направления и полностью случайными значениями остальных параметров

Наконец, следует отчетливо понимать, что оценка значимости исследуемых параметров не может быть универсальной. Она зависит от особенностей акватории – ее батиметрии и контура береговой линии, а также от участка побережья (или берегового пункта), относительно которых определяется эта значимость. Именно этим объясняются значительная часть представленных результатов, полученных для российской части побережья. Безусловно интересным будет сопоставление этих результатов с результатами, полученными для всего побережья Японского моря.

Работа выполнялась при поддержке проекта РФФ 14-17-00219, проекта ФНИ № 0316-2016-0001, РФФИ 16-05-00450.

Список литературы

1. *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.
2. *Подъяпольский Г.С.* Возбуждение цунами землетрясением // Методы расчета возникновения и распространения цунами. М.: Наука. 1978. С. 30–87.
3. *Aki K.* Earthquake mechanism // *Tectonophysics*. 1972. V. 13. № 1–4. P. 423–446.
4. *Bastidas L.A., Gupta H.V., Sorooshian S., Shuttleworth W.J., Yang Z.L.* Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V. 104. № D16. P. 19481–19490.
5. *Knighton J., Bastida L.A.* A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // *Natural Hazards*. 2015. V. 78. P. 699–723.
6. *Kolmogorov A.N.* Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*. 1933. P. 83–91.
7. *Mac-Cormack R.W.* The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // *AIAA*. 1969. №69. P. 354.
8. *Miettinen K.* Nonlinear multiobjective optimization. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
9. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in the half-space // *BSSA*. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
10. *Pianosi F., Beven K., Freer J., Hall J.W., Rougier J., Stephenson D.B., Wagener T.* Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow // *Environmental Modeling and Software*. 2016. V. 79. P. 214–232.
11. *Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., Gussyakov V.K.* Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations // E.Krause et al. (Eds.): *Comp. Science & High Perf. Computing III*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. P. 52–68.
12. *Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *BSSA*. 1994. V. 84. P. 974–1002.