

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.951

А.И. Зайцев¹, И.С. Костенко¹, А.Г. Чернов²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАЛЁННОГО ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

СКБ «Средства автоматизации морских исследований» ДВО РАН, Южно-Сахалинск¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

В настоящей работе проведено численное моделирование распространения исторического цунами сейсмического происхождения в Тихом океане. Рассматривалось событие с эпицентром, удаленным от дальневосточного побережья России. Была проведена оценка времени прихода волн от удаленных цунами, силы воздействия на побережье, рассмотрены особенности прохождения цунами через Курильские проливы. Приведен спектральный анализ записей в населенных пунктах Сахалина и Курил.

Ключевые слова: цунами; инструментальные данные; численное моделирование; Сахалин.

Чилийское Землетрясение 1960 года – сильнейшее землетрясение в истории наблюдения, магнитуда – по разным оценкам от 9,3 до 9,5, произошло 22 мая 1960 года в 19:11 по местному времени и послужило причиной цунами. Возникшие волны достигали высоты 15-20 м. Цунами разрушило несколько городов и смыло десятки селений. Погибло 10 тысяч человек. Волны дошли и до дальневосточного побережья Советского Союза.

1. Численное моделирование

Математическая модель основана на нелинейных уравнениях мелкой воды, записанных в сферических координатах:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = fN, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = -fM, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \quad (3)$$

где η – смещение уровня моря; M и N – компоненты расхода воды вдоль широты λ и долготы θ ; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести и n – коэффициент шероховатости дна. В расчетах используется значение $n = 0.0025 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$, характерное для естественного

дна (песок, мелкая галька). R – радиус Земли, f – параметр Кориолиса ($f = 2\omega \sin\theta$), ω – частота вращения Земли.

Численная модель реализована в виде комплекса NAMI-DANCE, основанного на вложенных сетках (<http://namidance.ce.mrttu.edu.tr>), являющегося модификацией известного японского кода TUNAMI, она описана в [5, с. 88], см. также [15, с. 2]. Этот комплекс рекомендован, в частности, ЮНЕСКО для расчетов распространения цунами [16, с. 2], и его первый вариант уже использовался для моделирования цунами 2004 г. в Индийском океане [2, с. 388] и оценки цунами риска Япономорского побережья России [6, с. 179].

Источник цунами выбран в соответствие с известным решением Окада [12], использующим данные о параметрах землетрясения. Последние приводятся на сайте Геофизической службы США [14]. Эпицентр землетрясения локализован в точке с координатами 76.5° з.д. 39.5° ю.ш. на глубине 53 км. Длина разрыва, определяемая по афтершокам 800 км, его ширина 200 км и смещение по разрыву 30 м. Угол разлома с меридианом (strike) 10° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 10° и вдоль разлома (slip) 91° . Рассчитанный источник цунами в соответствие с решением Окада показан на рис. 1, он представляет собой знакопеременное смещение с максимальным поднятием на 10.8 м и опусканием на 6 м, так что максимальная высота волны в очаге составляет около 17 м.

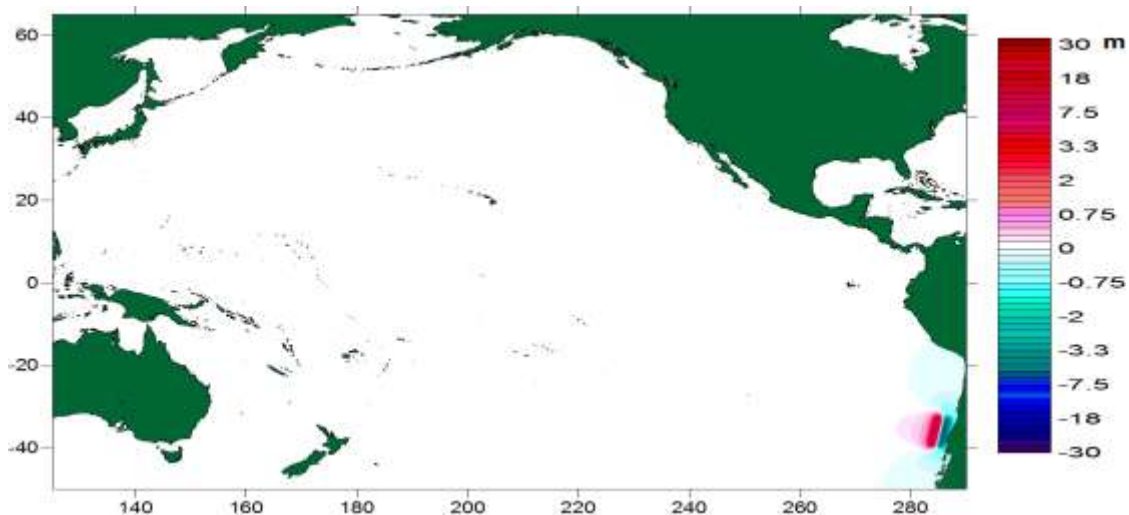


Рис. 1. Источник Чилийского цунами 1960 года

При моделировании были использованы несколько батиметрий: для Тихого океана батиметрия с шагом 6 мин, для Охотского моря 2-минутная, для Курильских островов 40 с. Стоит отметить, что каждая следующая батиметрия является частью предыдущей и отношение пространственных шагов составляет 1 к 3. Батиметрии получены из известной одномоментной батиметрии GEBCO1 Digital Atlas. Накат волны на берег не моделировался, и в расчетах используются условия полного отражения (приближение вертикальной стенки на глубине примерно 5 м).

Максимальное распределение высот амплитуд в Тихом океане показано на рис. 2, подтверждая, что цунами имело разрушительную силу во многих частях океана. Разрушительный удар пришёлся на Гавайские, Японские, Курильские, Филиппинские острова, Южную Америку. Стоит отметить, что благодаря использованию модели, основанной на вложенных сетках, удалось промоделировать распространение волны в Охотском море и её приход на о. Сахалин. Ширина некоторых проливов Курильских островов составляет чуть более 20 км, и моделирование прохождения волны на батиметрии с шагом 6 мин не представляется возможным. Курильские острова принимают на себя основной удар цунами, это видно из рис. 2, на Сахалине высоты волн не более 2 м.

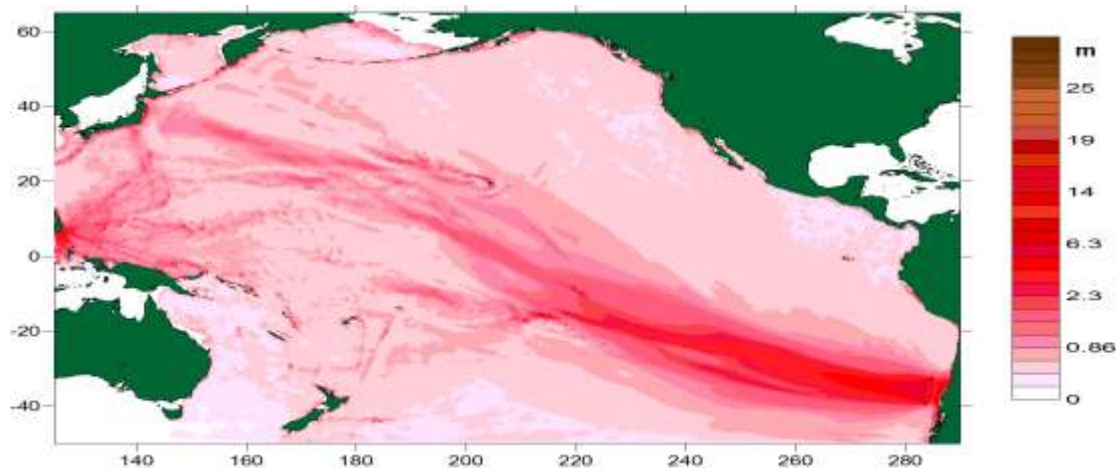


Рис. 2. Максимальное распределение амплитуд Чилийского цунами 1960 года

2. Мареографные данные

После события 1960 года сохранилось достаточное количество инструментальных данных, что позволяет сделать сравнительный анализ с результатами моделирования. Были установлены компьютерные мареографы в точках, в которых имеются данные наблюдений. Некоторые из них приведены на рис. 3.

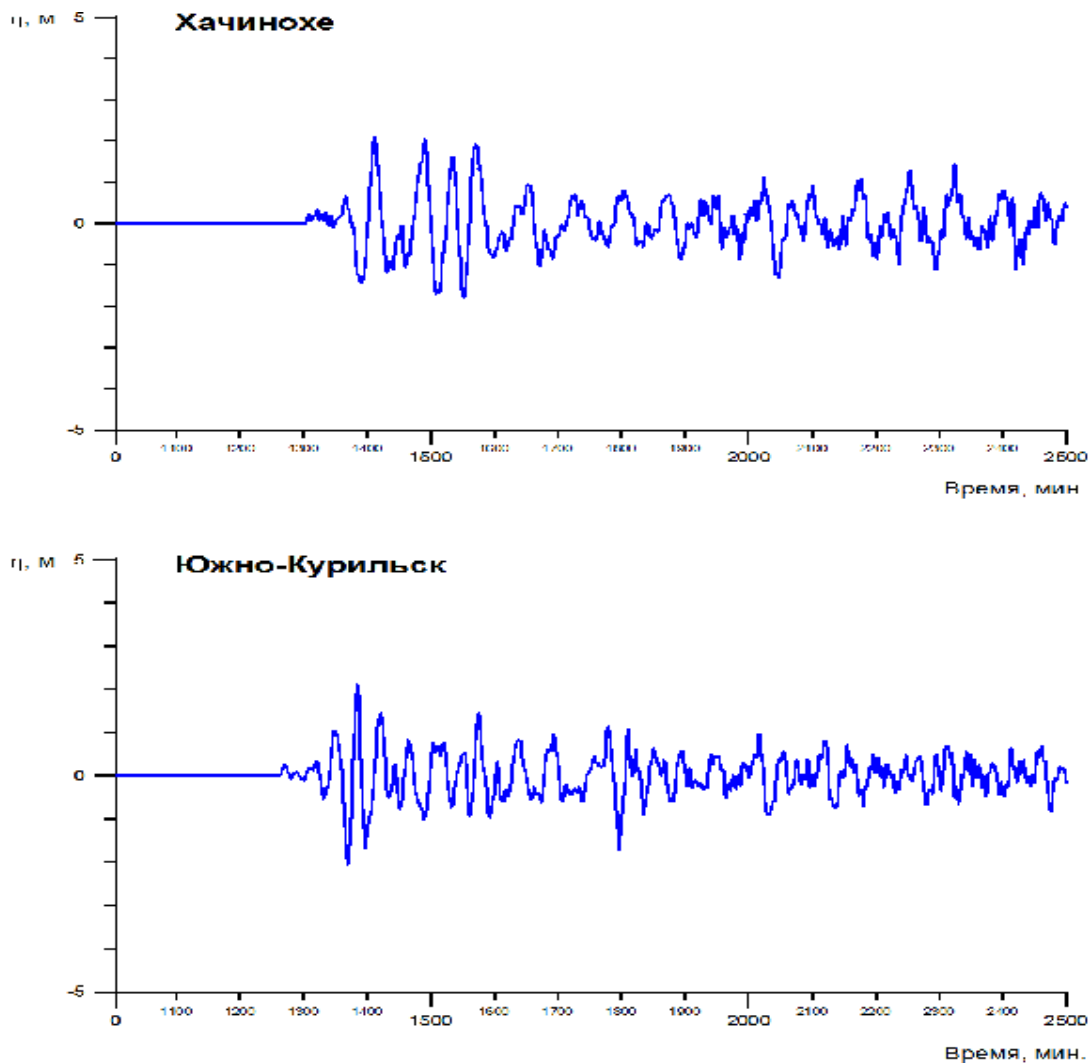


Рис. 3. Компьютерная запись Чилийского цунами на Японских и Курильских островах

Запись цунами в районе Хачинохе (юг о. Хонсю) показывает, что цунами начинается с небольшого подъема высотой 0,5 м через 21,5 ч после начала землетрясения. Первые четыре волны являются максимальными, наибольшая высота волны составляет около 3,5 м. Характерный период колебаний составляет около 50 мин, что хорошо согласуется с историческими данными. Цунами в п. Южно-Курильск начинается также с небольшого подъема спустя чуть более 21 ч. Максимальной является третья волна с высотой более 4 м. Характерный период колебаний составляет около 40 мин.

3. Сопоставление измеренных и расчетных данных

Цифровые мареографы были установлены в точках, где размещались автономные регистраторы сети непрерывных наблюдений. Сравнение спектральных оценок мощности плотности показало хорошее согласие наблюдаемых и полученных частот, в частности, для Охотоморского шельфа о. Уруп основной период шельфового резонанса около 20 мин (рис. 4). Схожие оценки были получены в [9, с. 87; 10, с. 80].

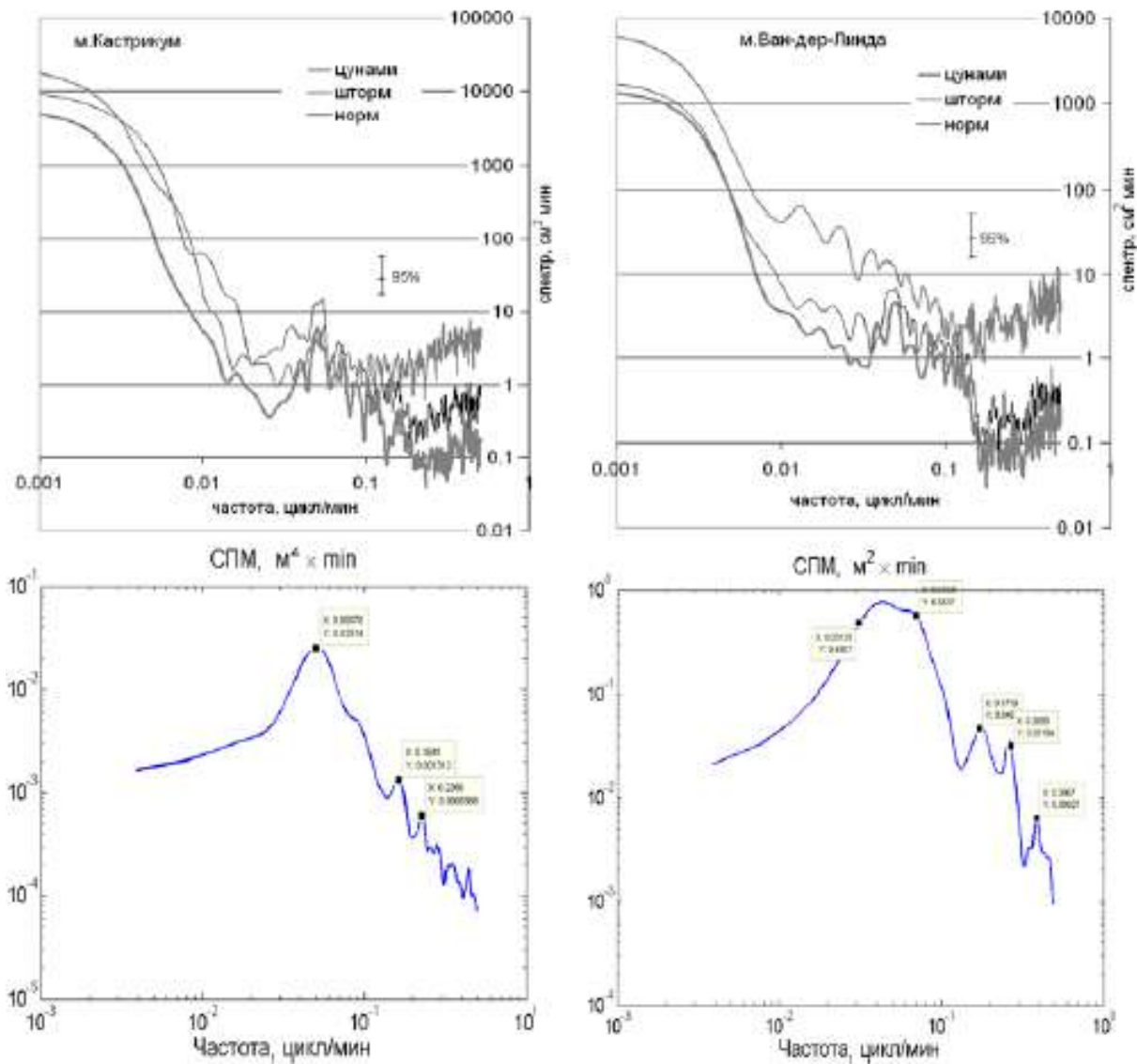


Рис. 4. Оценка спектральной мощности плотности для полученных экспериментально (верхний ряд) записей волновых процессов на шельфе о. Уруп и модельных записей Чилийского цунами 1960 года (внизу)

Заключение

Выполнено моделирование Чилийского цунами 1960 года с помощью численного кода, основанного на уравнениях мелкой воды в сферических координатах с учётом вращения Земли. Проведено сравнение модельных и реально наблюденных мареографных записей для пунктов на побережье Японии и Курильских островов, которое подтвердило корректность численного эксперимента. Также было получено полное согласие расчета времени прихода волны в удаленные пункты с данными наблюдений. Анализ других случаев удаленных цунами (Индонезийского 3 января 2009 года, Чилийского 27 февраля 2010 года), показывает, что параметры волны на удаленных пунктах задаются формой шельфа, и для Курильских и Японских островов они являются схожими для всех этих случаев.

Выполнение этой работы поддержано грантами РФФИ (08-05-00069 и 09-05-00971). Авторы выражают благодарность за помощь в расчётах заведующему лабораторией цунами ИМГиГ ДВО РАН д-ра физ.-мат. наук Г.В. Шевченко.

Библиографический список

1. **Го, Ч.Н.** Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР / Ч.Н. Го [и др.] // Тихоокеанский ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9–7.
2. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
3. **Заякин, Ю.А.** Цунами на Дальнем Востоке России / Ю.А. Заякин. – Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. – 88 с.
4. **Кайстренко, В.М.** Невельское цунами 2 августа 2007 г. / В.М. Кайстренко [и др.] // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: междунар. науч. симпоз., Южно-Сахалинск, Россия, 27 – 30 сентября 2007 г.: тез. докл. / Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. С. 133.
5. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Изв. АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
6. **Куркин, А.А.** Сравнительная оценка цунами опасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 179–188.
7. **Соловьев, С.Л.** Сводка данных о цунами в СССР / С.Л. Соловьев, М.Д. Ферчев // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. № 9.
8. **Щетников, Н.А.** Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952–1968 гг. / Н.А. Щетников. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. – 164 с.
9. **Файн, И.В.** Расчет захваченных волн для района Курильской гряды // В сб.: Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 87–92.
10. **Файн, И.В.** Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волны на берег. – М., 1984. С. 80 – 83.
11. Manifestation of the August 2, 2007 Nevelsk tsunami / V. Kaystrenko [at all.] // Geophysical Research Abstracts. 2008. V. 10. P. EGU2008-A-06626.
12. **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space / Y. Okada // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135 – 1154.
13. Modeling and visualization of tsunamis: Mediterranean examples / A.C. Yalciner, [at all.] // Tsunami and Nonlinear Waves (Ed: Anjan Kundu), Springer, 2007. P. 273 – 283.
14. Сайт Геофизической службы США (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22.php)

15. [http://ioc3.unesco.org/ptws/21/\(documents\)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/21/(documents)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf).
16. <http://avi-nami.ce.metu.edu.tr>.

*Дата поступления
в редакцию 13.07.2010*

A.I. Zaytsev, I.S. Kostenko, A.G. Chernov

MODELING OF INFLUENCE FROM REMOVED TSUNAMI AT FAR EAST COAST OF RUSSIA

In the present work numerical modeling distribution of historical tsunami of a seismic origin in Pacific Ocean is lead. Event with an epicenter removed from Far East coast of Russia were considered. The estimation of arrival time of waves from the removed tsunami, forces of influence at coast has been lead, features of passage of a tsunami through Kuriles passages are consider. The spectral analysis of records in settlements of Sakhalin and Kuriles is lead.

Key words: tsunami, gauge records, numerical modeling, Sakhalin.