

УДК 517.951

## ЯПОНСКОЕ ЦУНАМИ 11 МАРТА 2011 ГОДА, НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Костенко И.С., Зайцев А.И.*

*СКБ САМИ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

Землетрясение, произошедшее у юго-восточного побережья Японии, является одним из самых сильных в истории наблюдения и сильнейшим на Японских островах. Образовавшееся цунами обрушилось на побережье Японии волной более десяти метров, вызвав в узких заливах подъем уровня до 41 м. Это цунами привело к значительным человеческим жертвам и нанесло колоссальный экономический и материальный вред. В настоящей работе проведено численное моделирование распространения Японского цунами сейсмического происхождения в Тихом океане. Была проведена оценка времени прихода волн цунами, силы воздействия на побережье, рассмотрены особенности прохождения цунами через проливы Курильских островов. Сделаны сопоставления модельного ряда распространения цунами и наблюдений.

*Ключевые слова: землетрясение; цунами; численное моделирование; данные наблюдения и моделирования.*

### **Ведение**

Цель работы: Выполнить численное моделирование Японского цунами, произошедшего 11 марта 2011 года. Просчитать распространение цунами в Охотском море, прохождение через проливы Курильских островов и воздействие на остров Сахалин.

Дальневосточное побережье России подвержено воздействию цунами, особенно если землетрясение произошло в Тихом океане. В районе Тихоокеанского побережья расположены сейсмоактивные зоны, которые в совокупности образуют Тихоокеанское огненное кольцо. Землетрясения в этом регионе происходят постоянно. Но их магнитуда, глубина и местоположение недостаточны, чтобы вызвать цунами.

Цунами возникают при землетрясениях, магнитуда которых превышает 7, при этом землетрясение должно быть приповерхностным. Но

не каждое землетрясение с такой магнитудой способно вызвать цунами, которое проявится на дальневосточном побережье России.

Землетрясение, которое произошло у юго-восточного побережья Японии, является одним из самых сильных в истории наблюдения и сильнейшим на Японских островах. Оно произошло 11 марта 2011 года в 5:46:23 ВСВ. Моментная магнитуда основного толчка была около 9,0. Его координаты  $38.322^\circ$  с.ш.,  $142.369^\circ$  в.д. Глубина очага 32 км. Наблюдалась серия толчков меньшей магнитуды. Всего было зарегистрировано более 400 афтершоков. Образовавшееся цунами обрушилось на побережье Японии волной более десяти метров, вызвав в узких заливах подъем уровня до 41 м [6]. Это цунами нанесло колоссальный экономический и материальный вред, привело к человеческим жертвам.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ

Численное моделирование распространения цунами проводилось с помощью усовершенствованного вычислительного программного комплекса NAMI-DANCE [7], основанного на уравнениях мелкой воды, записанных в сферических координатах и рекомендованного Юнеско для расчета распространения цунами [5].

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

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

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

где  $\eta$  – смещение уровня моря;  $M$  и  $N$  – компоненты расхода воды вдоль широты  $\lambda$  и долготы  $\theta$ ;  $D$  – 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 ( $f = 2\omega \sin\theta$ ),  $\omega$  – частота вращения Земли.

Для моделирования был использован источник цунами, рассчитанный в университете Тохоку под руководством профессора Имамуры (рис. 1 карта-врезка) [3]. Опираясь на многочисленные имеющиеся данные, в соответствие с известным решением Окада, использованы данные о параметрах землетрясения [4]. Параметры землетрясения приводятся на сайте Геофизической службы США [1]. Для моделирования источника использовались 10 наиболее крупных толчков землетрясения, способных сгенерировать цунами (рис. 1).

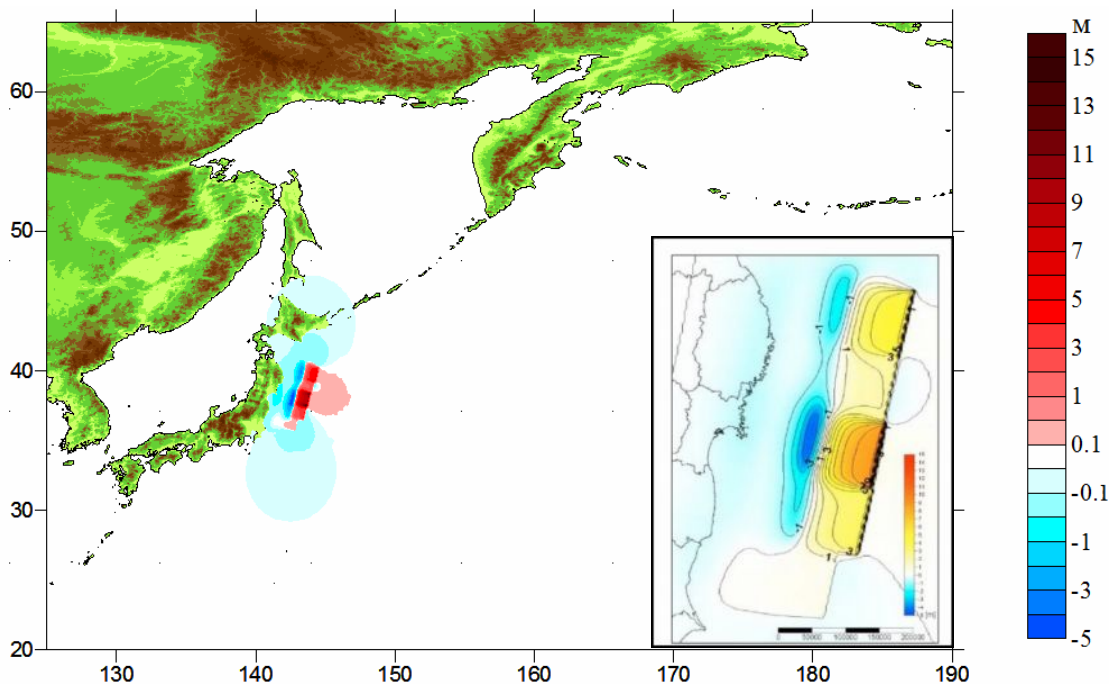


Рис. 1. Совмещенные источники Японского цунами. На карте-врезке представлены наложенные друг на друга источники цунами, которые были рассчитаны в университете Тихоку под руководством профессора Имамуры.

Расчет распространения волн по акватории Тихого океана и в прилегающих морях проводился с использованием батиметрии с шагом сетки 0.105 градуса. Для моделирования прохождения волны через проливы использовалась более мелкая вложенная сетка.

На рисунке 2 показано рассчитанное с помощью программы NAMI DANCE распределение максимальных амплитуд волн цунами, возникших

в период распространения японского цунами. Отсюда видно, что основной удар стихии принимают на себя восточное побережье о. Хонсю и южное, юго-восточное побережье о. Хоккайдо (Япония). На побережье России основное воздействие цунами приходится на Курильские острова, а у побережья о. Сахалин, полуострова Камчатка и Приморья волна наблюдается с меньшей высотой. Анализ наблюдений за высотами волн цунами в северо-западной части Тихого океана это подтверждает (таблица 1). Отсюда следует, что полуостров Камчатка, Курильские и Японские острова с их достаточно узкими и мелководными проливами являются «препятствием» на пути распространения волн к российскому побережью, расположенному у акваторий Японского и Охотского морей.

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ НАТУРНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

На территории Российского побережья наибольшему влиянию цунами подверглась территория Сахалинской области, где максимальная высота подъема уровня моря достигала 3 м. Ниже приведены высоты зарегистрированных цунами. Запись уровня моря в п. Правда выполнена СКБ САМИ ДВО РАН, записи цунами во всех остальных пунктах предоставлены Сахалинским Центром Цунами.

В Охотское море волна проникает в основном через проливы центральных Курильских островов, так как там расположены наиболее широкие и глубокие проливы Буссоль и Крузенштерна. Это можно наблюдать на рисунке 3, где представлено время распространения волн цунами по северо-западной части Тихого океана.

На побережье Приморского края высоты волн не превышали 0.4 м. На побережье полуострова Камчатка максимальные высоты волн не превышали 0.8 м [2].

Для регистрации уровня моря, в том числе волн цунами, по акватории океана и в Дальневосточных морях на побережье России существует сеть измерений уровня моря Российской службы предупреждения цунами, а

также имеется сеть глубоководных гидрофизических станций DART (NOAA USA) [2].

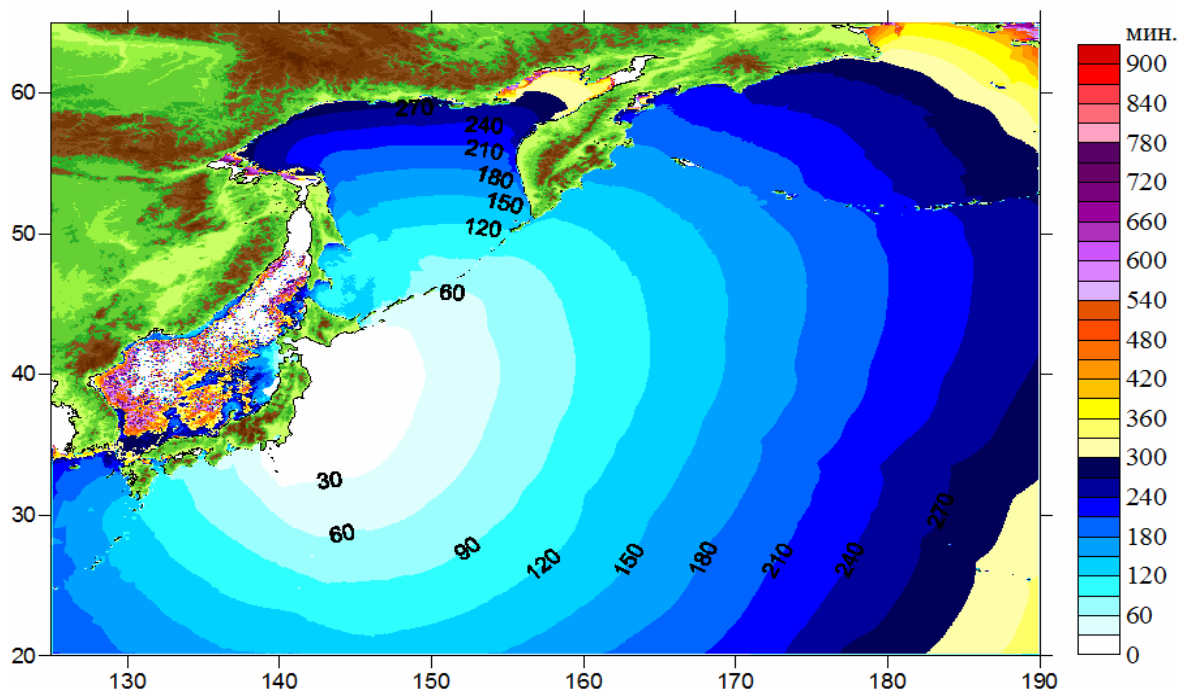


Рис. 3. Время распространения волны цунами 11 марта 2011 года по результатам моделирования.

Таблица 1  
Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, вызванные землетрясениями у юго-восточного побережья Японии.

Наименование населенного пункта	Высота цунами, м	Наименование населенного пункта	Высота цунами, м
п. Малокурильское (о. Шикотан)	3	г. Корсаков (о. Сахалин)	0.67
г. Южно-Курильск (о. Кунашир)	1.89	м. Крильон (о. Сахалин)	0.29
г. Курильск (о. Итуруп)	0.56	г. Невельск (о. Сахалин)	0.27
п. Буревестник (о. Итуруп)	2	п. Правда (о. Сахалин)	0.25
г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	1.6	г. Холмск (о. Сахалин)	0.22
г. Поронайск (о. Сахалин)	0.85	г. Углегорск (о. Сахалин)	0.18
п. Стародубское (о. Сахалин)	0.65		

Глубоководные станции DART, которые, в случае приближения цунами, увеличивают частоту записи уровня моря с 15 минут (при работе в штатном режиме) до 1 минуты и 15 секунд соответственно (при возникновении чрезвычайных ситуаций для более точной регистрации

опасного явления). Это позволяет заблаговременно узнать скорость распространения цунами и высоту волны, что в свою очередь позволяет скорректировать, если это необходимо, численные расчеты распространения цунами и дать более достоверный прогноз распространения волн.

Чтобы сделать сравнительный анализ произошедшего события с данными моделирования, в населенных пунктах, где имеются приборы измерения уровня моря, при выполнении моделирования были поставлены компьютерные мареографы. Сделаны сопоставления модельного ряда распространения цунами и наблюдений с глубоководных и прибрежных станций, расположенных у Дальневосточного побережья России. С помощью программы MATLAB данные по уровню моря с датчиков наблюдений приведены к общему нулю, что позволило сопоставить графики моделирования и наблюдений. Ниже, в качестве примера, приведены две совмещенные записи цунами.

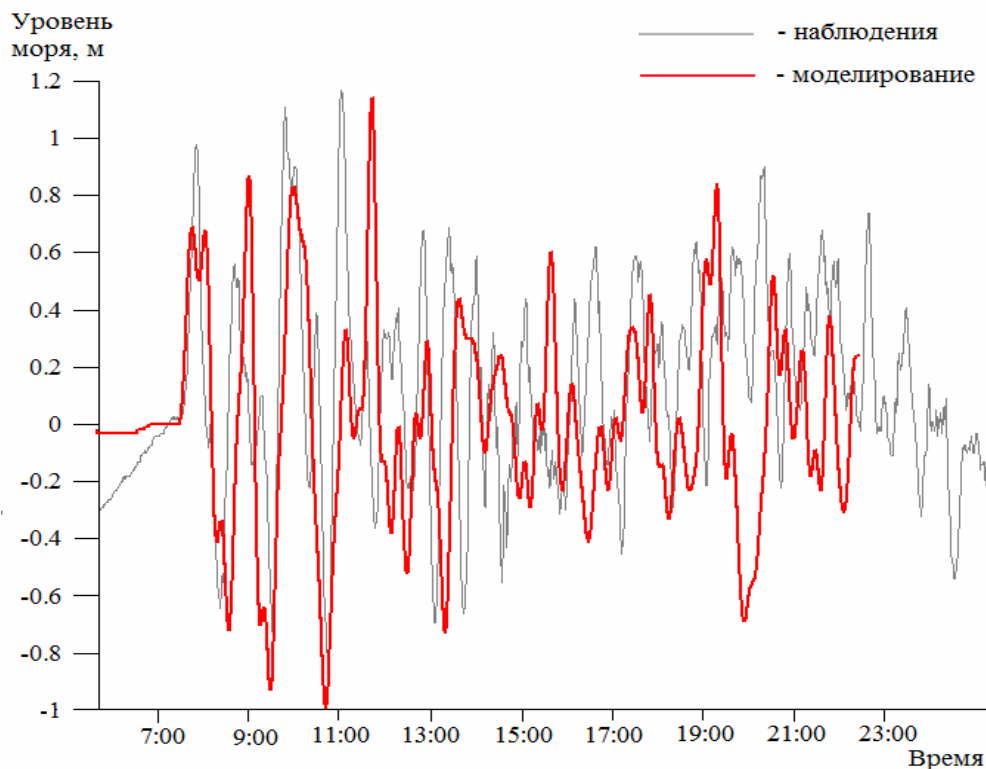


Рис. 4. Совмещенные записи Японского цунами 2011 года в г. Южно-Курильск (по данным наблюдения и моделирования)

На рисунке 4 представлена совмещенная запись уровня моря в г. Южно-Курильск (о. Кунашир) по данным наблюдений и моделирования в первые часы прихода цунами. Наблюдается достаточно хорошее совпадение времени прихода цунами, периодов, форм и высот первых максимальных волн. Цунами в Южно-Курильске началось через 2 часа с подъёма уровня моря на 1 м (на записи) и на 0.7 м. (при моделировании). Период колебаний и на записи и при моделировании приблизительно составляет 1.5 часа.

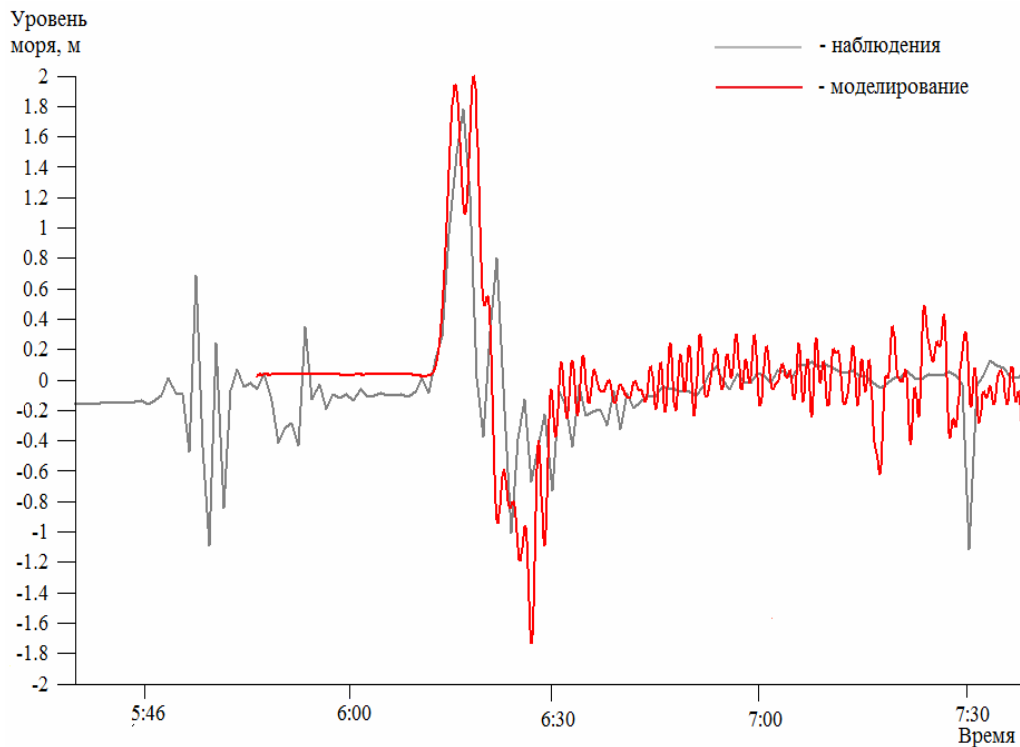


Рис. 5. Совмещенные записи Японского цунами 2011 года на глубоководной станции DART 21418 (по данным наблюдения и моделирования)

На рисунке 5 представлена совмещенная запись уровня моря на глубоководной станции DART21418, расположенной юго-восточнее Японии. На рисунке просматривается запись землетрясения, которая соответствует по времени основному толчку. Важно отметить достаточно хорошее совпадение уровней моря на записях глубоководных станций и рассчитанных уровней, так как они расположены на большой глубине и

при расчетах можно использовать линейную теорию мелкой воды. Для береговых станций, расположенных на относительно небольшой глубине в акваториях портов, расчеты нужно вести с использованием более точных моделей и батиметрий.

## ВЫВОДЫ

Численное моделирование распространения Японского цунами сейсмического происхождения в Тихом океане вычислительным комплексом NAMI-DANCE показало, что этот комплекс эффективно работает при моделировании распространения волн цунами и может применяться в системе раннего оповещения цунами.

Рассмотрены особенности прохождения цунами через Курильские проливы и их проникновение в акваторию Охотского моря. Произошедшее цунами еще раз показало, что о. Сахалин, огражденный Японской и Курильской островными дугами, находится в относительной безопасности от воздействия катастрофических цунами, возникающих в Тихом океане.

Проведена оценка времени прихода волн цунами и силы воздействия на побережье. Сделаны сопоставления модельного ряда распространения цунами и наблюдений, которые показали хорошее согласование.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216, 11-05-92002, 09-05-00971).



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Сайт Геофизической службы США: <http://www.usgs.gov/>
2. Сайт Российской службы предупреждения о цунами: <http://www.rtw.su/>.
3. Imamura F. (2011), Tohoku University Source Model version 1.0 of Great East Japan Tsunami. (Due on June 06, 2011).
4. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135 – 1154.
5. Yalciner A.C., Pelinovsky E., Zaytsev A., Kurkin A., Ozer C., Karakus H., Ozyurt G. Modeling and visualization of tsunamis: Mediterranean examples // Tsunami and Nonlinear Waves (Ed: Anjan Kundu), Springer, 2007. P. 273 – 283.
6. Yalciner A.C., Suppasri A., Mas E., Kalligeris N., Necmioglu O., Imamura F., Ozer C., Zaytsev A., Ozel N.M., Synolakis C. Field survey on the coastal impacts of march 11, 2011 great east Japan tsunami (в печати).
7. <http://avi-nami.ce.metu.edu.tr>.

JAPAN TSUNAMI 11TH OF MARCH, REAL MAREOGRAPH RECORDS  
AND NUMERICAL MODELING

***Kostenko I.S., Zaytsev A.I.***

*Special Research Bureau FEB RAS*

Earthquake, which happened on south-east coast of Japan, is the strongest in historic and on Japan islands in particular. The wave height collapsed on Japan coast was 10 m resulted in water level rise till 41 m in inlets. Great economical and material harm, human losses are the results of this tsunami. In this work numerical modeling of Japan Tsunami propagation in Pacific ocean was performed. Analysis of tsunami time and wave force was performed, features of tsunami passing through Kurils straits in Okhotsk sea were considered. Comparison of model and real mareograph records for stations on Sakhalin shore was carried out.

*Key words: earthquake, tsunami, numerical modeling, real mareograph and modeling data.*