

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.465

И.С. Костенко¹, А.И. Зайцев^{1,2}, А. Ялченир³, А.В. Рыбин², С.К. Яркин²

ПРОЯВЛЕНИЕ ТОХОКУ ЦУНАМИ 2011 ГОДА В РАЙОНЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ И О. САХАЛИН

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДО РАН,
г. Южно-Сахалинск¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Технический университет центральной Азии, Анкара, Турция³

Цель: изучение особенностей распространения волн цунами в акватории Курильских островов и Охотского моря.

Научный подход: вычислительные эксперименты проводились с использованием программного комплекса NAMI DANCE. При моделировании в акватории Тихого океана и Охотского моря использовались нелинейные уравнения мелкой воды. При проведении моделирования в зависимости от полной глубины менялся пространственный и временной шаг, что позволило учитывать численную дисперсию, вычислялось значение близкое к аналитическому значению дисперсионного слагаемого. А для моделирования происхождения волны в Охотское море через проливы Курильских островов использовалась вложенная сетка.

Результат: проведено численное моделирование распространения Японского цунами 11 марта 2011 года с использованием вложенных сеток для детального изучения особенностей распространения волн цунами и проникновения их в Охотское море через проливы Курильских островов. Проанализировано распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана.

Новизна: Проведена оценка интенсивности воздействия цунами в районе Курильских островов и о. Сахалин. Для анализа энергии цунами в районе проливов Курильских островов по результатам численного моделирования построены совмещенные спектры уровня моря в районах крупных проливов Фриза и Буссоль.

Ключевые слова: моделирование распространения цунами, интенсивность цунами, число Фруда.

Введение

У юго-восточного побережья Японии 11 марта 2011 года, начиная с 5:46:23 ВСВ, произошла серия крупных землетрясений. Магнитуда основного толчка составляла 9,0. Его координаты 38.322° с.ш., 142.369° в.д. Глубина очага 32 км. 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 [8]. Это цунами нанесло колоссальный экономический и материальный вред, привело к большим человеческим жертвам.

Несмотря на то, что произошедшее цунами является одним из самых сильных в истории наблюдения и сильнейшим на Японских островах, на территории России [1, 4], расположенной в непосредственной близости от источника цунами, волны наблюдались с высотами не более 3 м. С целью изучения особенностей распространения волн цунами в акватории Курильских островов и Охотского моря проведена серия вычислительных экспериментов.

На пути распространения волн цунами в Охотское море расположены Курильские острова протяженностью около 1200 км, которые включают в себя более 30 больших и множество мелких островов. На рис. 1 представлена карта этого района. Всего насчитывается более 26 проливов с преобладающими глубинами до 500 м. Максимальная глубина чуть бо-

лее 2000 метров. Со стороны Тихого океана расположен Курило-Камчатский желоб с глубинами до 10000 метров. Непосредственно перед Курильскими островами глубины уменьшаются. В районе южных и центральных Курильских островов расположен подводный хребет Витязь. Со стороны Охотского моря в районе южных и центральных Курильских островов находится Курильская котловина с глубинами около 3000 м, а в районе северных Курил глубины уменьшаются по направлению к полуострову Камчатка. Отсюда следует, что Курильский архипелаг является естественной преградой между Тихим океаном и Охотским морем, поэтому изучению особенностей распространения и воздействия цунами именно в этом регионе уделено особое внимание.

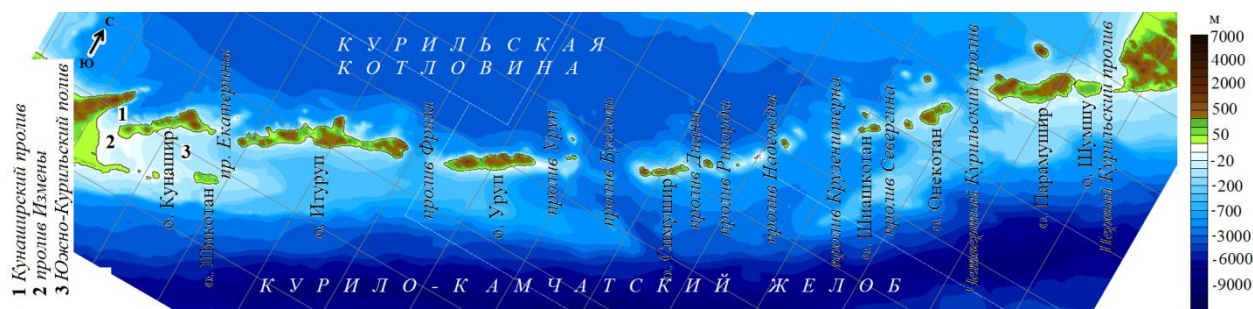


Рис. 1. Карта Курильских островов

Методика исследований

Вычислительные эксперименты проводились с использованием программного комплекса NAMI DANCE. При моделировании в акватории Тихого океана и Охотского моря использовались нелинейные уравнения мелкой воды:

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

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

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

где η – смещение уровня моря; M , N – компоненты расхода воды вдоль широты λ и долготы θ ; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести; n – коэффициент шероховатости дна; R – радиус Земли; f – параметр Кориолиса ($f = 2\omega \sin \theta$); ω – частота вращения Земли. В расчетах используется значение $n = 0.0025$ м, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька).

При проведении моделирования в зависимости от полной глубины менялся пространственный и временной шаг, что позволило учитывать численную дисперсию [7], вычислялось значение, близкое к аналитическому значению дисперсионного слагаемого.

На открытых границах использовались граничные условия свободного прохождения. На побережье ставилась стенка на глубине 5 м.

Для выполнения расчетов в качестве основной использовалась батиметрия с шагом сетки 0,022 градуса, а для моделирования происхождения волны в Охотское море использовалась вложенная сетка с шагом 0,007 градуса [2]. При проведении моделирования компьютерный мареограф устанавливается на 3 узел сетки от берега. Использование мелкой сетки позволяет более точно совместить места установки стационарных и модельных мареографов [5].

Для примера на рис. 2, а, б приведено расположение узлов сетки в районе г. Северо-

Курильск (о. Парамушир). Видно, что на батиметрии с мелкой сеткой (рис. 2, б) компьютерный мареограф будет расположен в непосредственной близости от портового ковша, где установлен стационарный мареограф. Это позволит сопоставить данные наблюдения за уровнем моря и моделирования в близлежащей точке. Вложенные сетки используются для относительно небольших участков акватории, так как их использование значительно уменьшает скорость проведения вычислительных экспериментов.

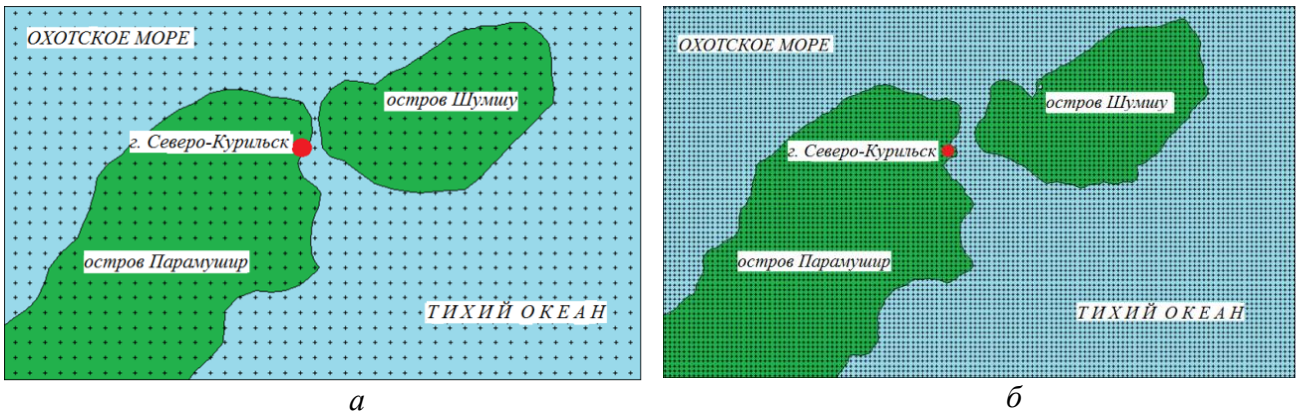


Рис. 2. Расположение узлов сеток в районе г. Северо-Курильск с шагом 0,022 градуса (а) и 0,007 градуса (б)

Проведение вычислительных экспериментов

Для проведения вычислительных экспериментов из параметров десяти наиболее крупных землетрясений, способных сгенерировать цунами, построены источники. При проведении моделирования источники запускались пропорционально времени возникновения рассматриваемых землетрясений, в результате чего в одном вычислительном эксперименте проводились расчеты распространения цунами от всех источников. Так как источники расположены в непосредственной близости друг от друга, то на рис. 3 они выглядят как один большой источник и сосредоточены у восточного побережья о. Хонсю (Японские острова).

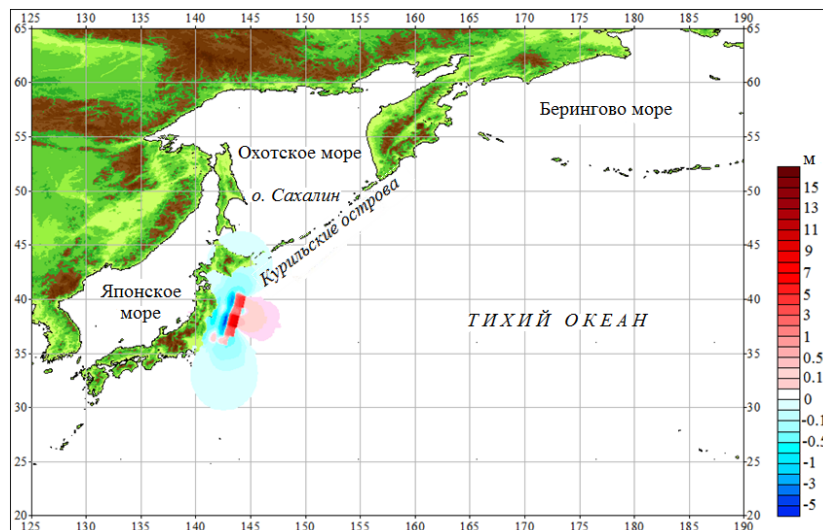


Рис. 3. Источник Японского цунами 11 марта 2011 года, состоящий из 11 сегментов

Для изучения особенностей распространения цунами построено расчетное время распространения профиля волн в северо-западной части Тихого океана (рис. 4). Видно, что в Охотское море цунами проникают с запаздыванием по времени, по сравнению со временем

распространения по акватории Тихого океана. По акватории Охотского моря цунами распространяются в широтном направлении, начиная от центральных Курильских островов, где расположены наиболее широкие и глубокие проливы. Это подтверждает карта распространения цунами через 1 ч 20 мин после начала землетрясений. На ней видно, что основной фронт волн цунами проникает через проливы Фриза, Уруп и Буссоль (рис. 5).

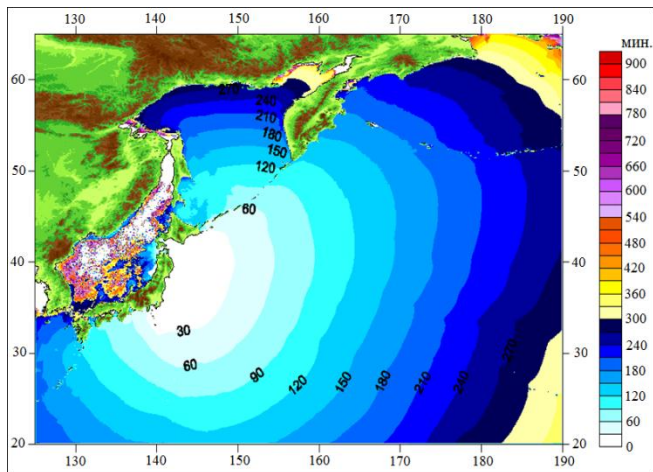


Рис. 4. Время распространения цунами в северо-западной части Тихого океана

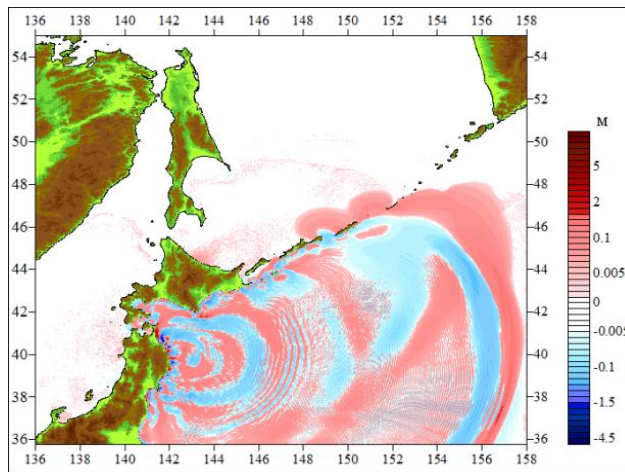


Рис. 5. Волны цунами спустя 1 ч 20 мин после землетрясения по результатам моделирования

По результатам моделирования построено распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана (рис. 6). Максимальные амплитуды волн наблюдались в Тихом океане к юго-востоку от о. Хонсю. Это связано с расположением и формой источников цунами [3]. Наибольшие амплитуды наблюдались у восточного побережья о. Хонсю и юго-восточного побережья о. Хоккайдо (Японские острова) в районе расположения эпицентров землетрясения. На территории России основному воздействию цунами подверглись Курильские острова. Максимальные волны наблюдались в п. Малокурильское (о. Шикотан) 3 м. На побережье Сахалина, Камчатки и Приморского края волны наблюдались с меньшими амплитудами. На побережье Приморского края высоты волн не превышали 0,4 м, а на побережье Камчатки – 0,8 м. Анализ наблюдений за амплитудами волн цунами в северо-западной части Тихого океана подтверждает результаты моделирования.

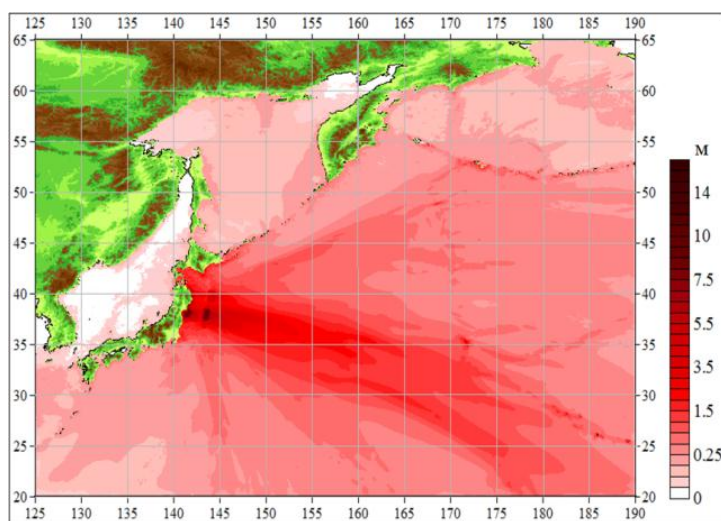


Рис. 6. Распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана

В табл. 1 приведены высоты волн цунами, проявившиеся у побережья Курильских островов и о. Сахалин. На Сахалине волны наблюдались с меньшими амплитудами по сравнению с Курильскими островами. На юго-западном побережье о. Сахалин (м. Крильон, г. Невельск, п. Правда, г. Холмск, г. Углегорск) волны цунами были небольшими, так как после прохождения проливов Японских и Курильских островов амплитуда их значительно уменьшается.

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	п. Охотское (о. Сахалин)	
г. Южно-Курильск (о. Кунашир)	1,89	г. Корсаков (о. Сахалин)	0,67
г. Курильск (о. Итуруп)	0,56	м. Крильон (о. Сахалин)	0,29
п. Буревестник (о. Итуруп)	2	г. Невельск (о. Сахалин)	0,27
г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	1,6	п. Правда (о. Сахалин)	0,25
г. Поронайск (о. Сахалин)	0,85	г. Холмск (о. Сахалин)	0,22
п. Стародубское (о. Сахалин)	0,65	г. Углегорск (о. Сахалин)	0,18

Для изучения интенсивности воздействия цунами по результатам моделирования построено распределение числа Фруда (рис. 7):

$$U/\sqrt{gD}, \quad (4)$$

где U – скорость распространения цунами, g – гравитационная постоянная, D – полная глубина ($\eta+H$).

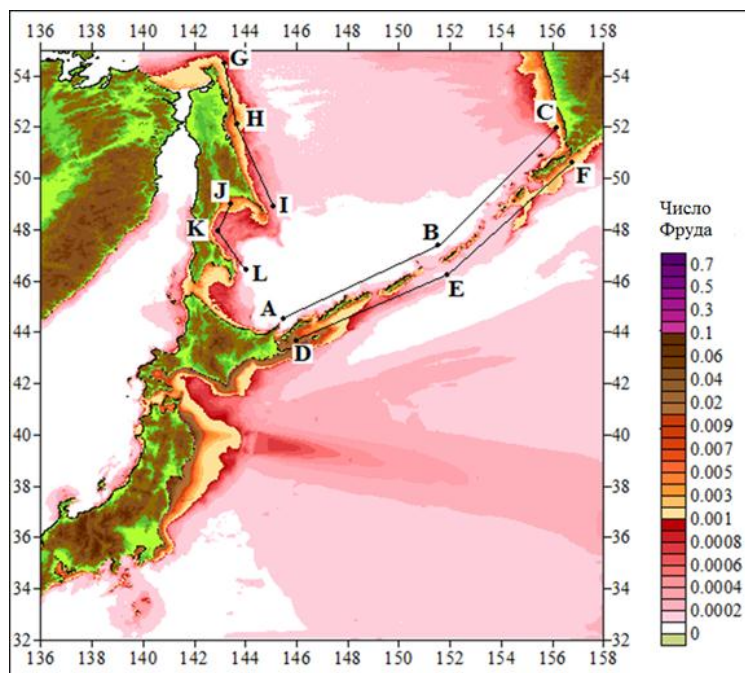


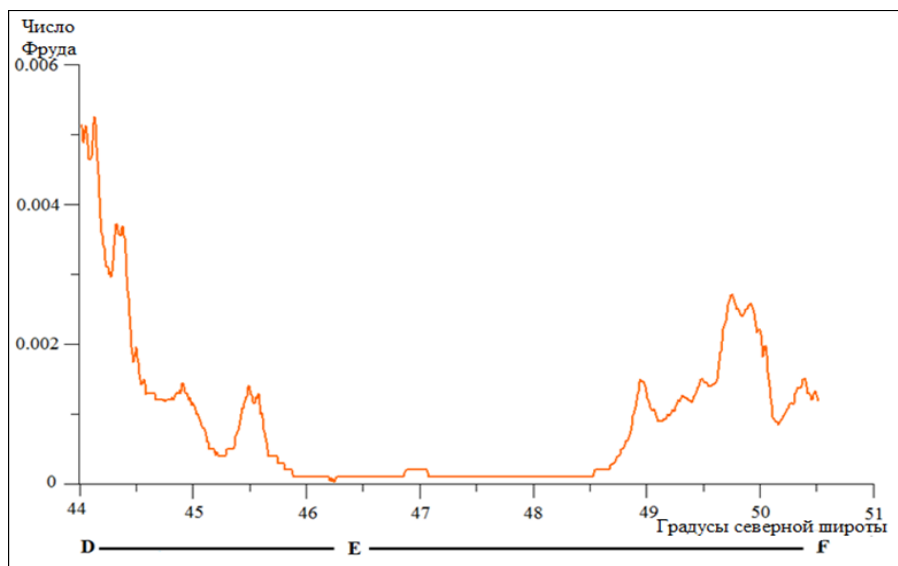
Рис. 7. Интенсивность цунами

Из анализа следует, что наибольшие значения интенсивности воздействия цунами

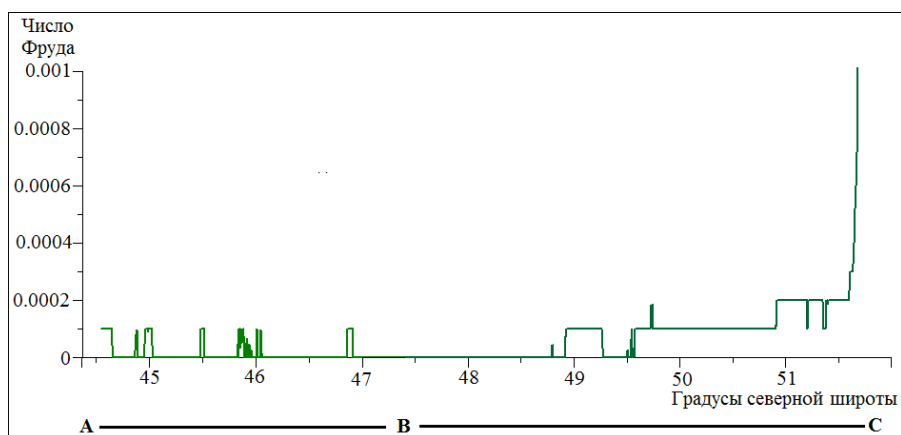
приурочены к мелководью, а также к району расположения эпицентров землетрясения, где большое влияние оказывает скорость распространения цунами. По результатам моделирования построены графики интенсивности цунами по линиям профилей.

Из графиков интенсивности воздействия по линиям профилей *D-E-F* (рис. 8, *a*), расположенных с Тихоокеанской стороны Курильских островов видно, что наибольшая интенсивность цунами наблюдается в прибрежных районах больших островов Кунашир, Итуруп, Уруп (южные Курильские острова) и Онекотан, Пармушир, Шумшу (северные Курильские острова). В районе центральных Курильских островов, где расположены наиболее широкие и глубокие проливы и небольшие острова, интенсивность воздействия цунами падает.

Построены графики интенсивности воздействия по линиям профилей *A-B-C* (рис. 8, *б*), расположенных с Охотоморской стороны Курильских островов. Интенсивность цунами после прохождения Курильских островов очень низкая. Однако наблюдается значительное усиление в районе полуострова Камчатка, где глубины моря на линии профиля значительно уменьшаются по сравнению с остальной частью.



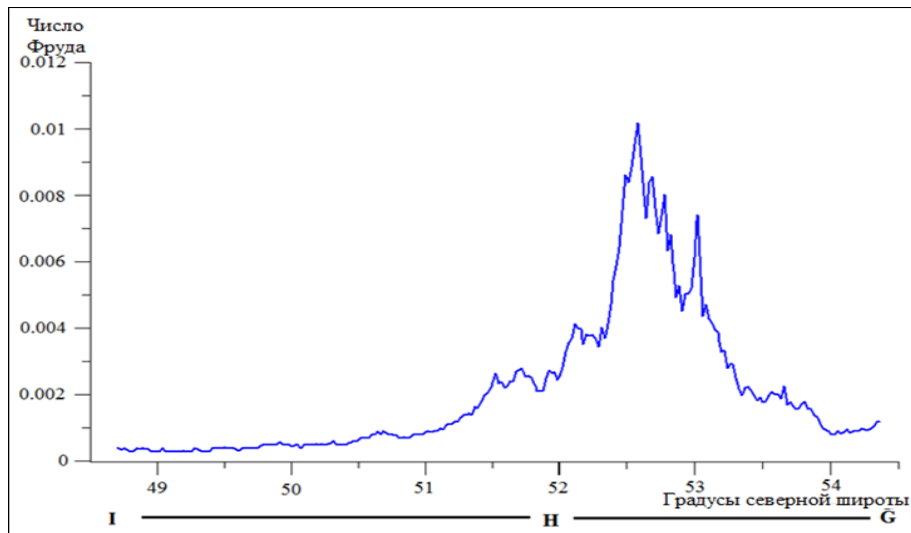
a)



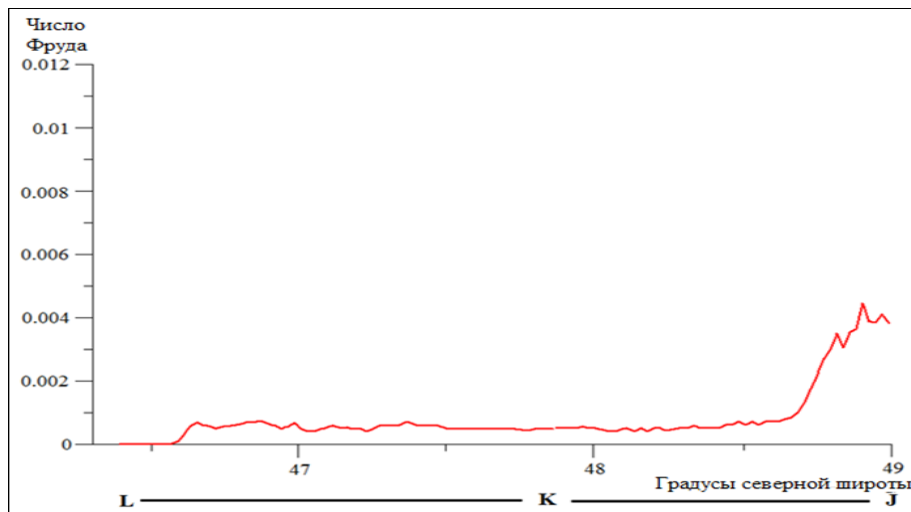
б)

Рис. 8. Интенсивность цунами:
a – по линиям профилей *D-E-F*
с Тихоокеанской стороны Курильских островов; *б* – по линиям профилей
A-B-C, расположенных со стороны Охотского моря

Из графиков интенсивности воздействия цунами по линиям профилей $I-H-G$ (рис. 9, *a*), расположенных в северо-восточной части о. Сахалин, видно, что наибольшие значения интенсивности цунами наблюдаются на небольших глубинах около о. Сахалин, где линия профиля ($H-G$) расположена наиболее близко к острову. Графики интенсивности воздействия по линиям профилей $L-K-J$ (рис. 9, *б*) расположены в юго-восточной части о. Сахалин. Вдоль линии профиля $K-L$ интенсивность цунами изменяется слабо, но она увеличивается в мелководном заливе Терпения.



a)



б)

Рис. 9. Интенсивность цунами:

a — по линиям профилей $I-H-G$ в северо-восточной части о. Сахалин;

б — по линиям профилей $L-K-J$ в юго-восточной части о. Сахалин

Для анализа энергии цунами в районе проливов Курильских островов по результатам численного моделирования построены совмещенные спектры уровня моря в районе крупного пролива Фриза, расположенного в центральной части Курильских островов (рис. 10). Результат представлен для мелкой сетки с шагом 0,007 градуса. Компьютерные мареографы располагались к югу от пролива, в проливе Фриза и к северу от него на некотором удалении от островов. На спектре уровня моря от мареографа, расположенного к северу от пролива

(Охотское море), наблюдается понижение энергии. Это может быть связано с потерей энергии при проходе цунами через проливы Курильских островов [6].

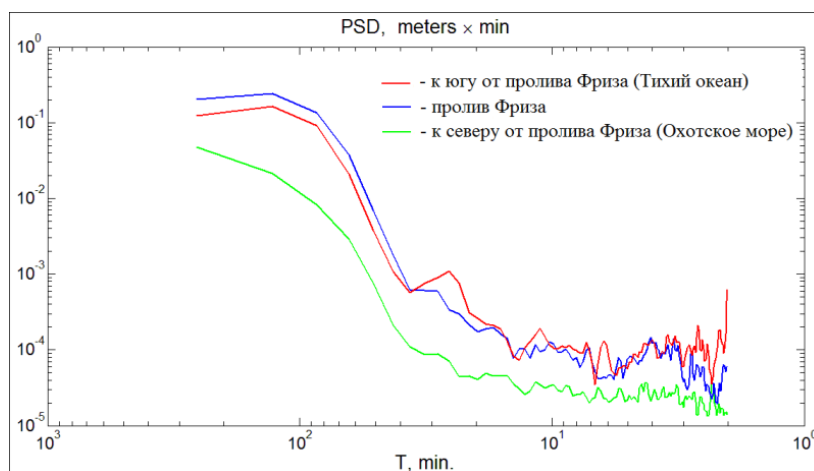


Рис. 10. Спектры колебаний уровня моря в районе пролива Фриза

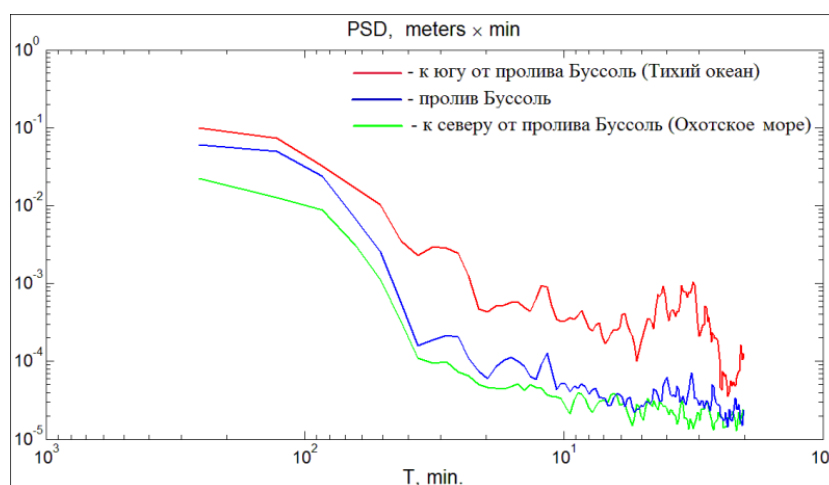


Рис. 11. Спектры колебаний уровня моря в районе пролива Буссоль

На рис. 11 по результатам численного моделирования представлены совмещенные спектры уровня моря в районе пролива Буссоль, расположенного в центральной части Курильских островов. Результат представлен для мелкой сетки с шагом 0,007 градуса. Из графика видно, что снижение энергии волн цунами наблюдается также в проливе Буссоль и в Охотском море.

Выводы

Проведено численное моделирование Японского цунами, произошедшего 11 марта 2011 года. Исследование проводилось с использованием вложенных сеток. Проведена оценка интенсивности воздействия цунами в районе Курильских островов и о. Сахалин. Построены спектры уровня моря в районе крупных проливов Фриза и Буссоль. Проанализировано распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана.

Исходя из результатов численного исследования, можно сделать вывод, что Курильские острова с их достаточно узкими и неглубокими проливами являются естественной преградой на пути распространения цунами в Охотское море. Происходит отражение около 80 % энергии цунами от Курильской гряды, и волны слабо проходят в Охотское море.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.0642), при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5, а также грантов РФФИ 11-05-00216-а, [13-05-97037](#) и гранта ДВО 13-III-B-07-050.

Библиографический список

1. **Зайцев, А.И.** Цунами на Сахалине 2 августа 2007 года: мареографные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 30–35.
2. **Зайцев, А.И.** Моделирование воздействия удаленного цунами на Дальневосточное побережье России / А.И. Зайцев, И.С. Костенко, А.Г. Чернов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева 2010. № 3(82). С. 34–39.
3. **Левин, Б.В.** Физика волн цунами и родственных явлений / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус, 2005. – 360 с.
4. **Соловьев, С.Л., Го Ч.Н.** Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. Москва: Наука, 1974. – 308 с.
5. **Шокин, Ю.И.** Вычислительный эксперимент в проблеме цунами / Ю.И. Шокин [и др.] Новосибирск: Наука, 1988. – 168 с.
6. **Lobkovsky, L.I., Mazova R.Kh., Kisel'man B. A., and Morozova A.O.** Numerical Simulation and Spectral Analysis of the November 15, 2006. Tsunami in the Kurile–Kamchatka Region Oceanology. 2010. Vol. 50. No. 4. P. 449–458.
7. **Sung Bum Yoon, Chae Ho Lim, and Junwoo Choi.** Dispersion-Correction Finite Difference Model for Simulation of Transoceanic Tsunamis// Terr. Atmos. Ocean. Sci. Vol. 18. No. 1. P. 31-53.
8. **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).

Дата поступления
в редакцию 15.05.2013

I.S. Kostenko¹, A.I. Zaitsev^{1,2}, A. Yachenir³, A.V. Rybin², D.C. Yarkin²

MANIFESTATION OF 2011'TH TOHOKU TSUNAMI NEAR KURIL ISLANDS AND SAKHALIN ISLAND

Special design Bureau for automation of marine researches DO RAS. Yuzhno-Sakhalinsk¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Technical university of Central Asia, Ankara, Turkey³

Purpose: To study of the propagation of tsunami waves near the Kuril Islands and the Sea of Okhotsk.

Design/methodology/approach: the computational experiments were carried out using the software NAMI DANCE. Numerical modeling of distribution of the 11'th March, 2011'th Japan Tsunami with use nested grids for detailed studying of features distribution of tsunami waves and their penetration into the Okhotsk Sea through passages of the Kuril Islands straits. Was done analysis of the assessment of intensity of influence of a tsunami near the Kuril Islands and Sakhalin Island. Sea level gauge spectrum near large passages of the Frieze and Bussol are presented. Distribution of the maximum amplitudes of waves of a tsunami in northwest part of the Pacific Ocean is analysed.

Findings: a numerical simulation of the Japan tsunami March 11, 2011 using nested grids for detailed study of the propagation of tsunami waves and their penetration into the Sea of Okhotsk through the straits of the Kuril Islands. Was analysed distribution of the maximum amplitudes of the tsunami waves in the north-western part of the Pacific Ocean.

Originality/value: The analysis of the intensity of the tsunami in the Kuril Islands and Sakhalin. To analyze the energy tsunami in the straits area Kuril Islands on the results of numerical simulations are built aligned spectra of sea level in the areas of large spills Vries and Bussol.

Key words: modeling of tsunami distribution, tsunami intensity, Froude's number.