

## МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.951

И.С. Костенко

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАЛЁННЫХ ЦУНАМИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

Проведено численное моделирование распространения исторических цунами сейсмического происхождения в Тихом океане. Рассматривались события с эпицентрами удаленными 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.

*Ключевые слова:* цунами, инструментальные данные, численное моделирование, Сахалин.

Чилийское землетрясение - сильнейшее землетрясение в истории наблюдения, магнитуда, по разным оценкам от 9,3 до 9,5, произошло 22 мая 1960 года в 19 ч 11 мин по местному времени и послужило причиной цунами. Возникшие волны достигали высоты 15-20 м у побережья Южной Америки. Цунами разрушило несколько городов и смыло десятки селений. Погибло 10 тысяч человек. Еще одно землетрясение, произошедшее 27 февраля 2010 года в 03 ч 34 мин по местному времени у берегов Чили, было магнитудой 8,8 и также послужило причиной цунами.

Эти цунами привели к катастрофическим последствиям на побережье Южной Америки. Волны цунами дошли до Дальневосточного побережья России.

#### Численное моделирование

Для моделирования этих событий использовался вычислительный комплекс NAMIDANCE [2, 9, 12], рекомендованный ЮНЕСКО для расчета распространения цунами [10]. Математическая модель основана на нелинейных уравнениях мелкой воды, записанных в сферических координатах, и является модификацией известного японского кода TUNAMI. Она уже использовалась для моделирования цунами в 2004 году в Индийском океане [1] и оценки цунами риска Япономорского побережья России [3].

Пространственный шаг исходной расчетной сетки для акватории Тихого океана 2,7 мин. Такой шаг слишком велик для прохождения волны через Курильские проливы, поэтому для моделирования волны в Охотском море необходимо использование вложенных сеток. Этот метод основывается на том, что каждая сетка, находящаяся внутри большей, имеет шаг в три раза меньше. Для моделирования этих случаев цунами использовали три вложенные сетки. Шаг сетки для южной части Охотского моря и Курильских островов 90 с, для Курильских проливов 30 с (рис. 1). Батиметрии получены из одноминутной батиметрии GEBCO1 Digital Atlas.

Источники чилийских цунами 1960 и 2010 годов (рис. 1) выбраны в соответствии с решением Окада [7], использующим данные о параметрах землетрясения, которые приводятся на сайте Геофизической службы США [8]. Эпицентр наиболее сильного землетрясения, произошедшего 22 мая 1960 года, локализован в точке с координатами  $76.5^{\circ}$  з.д.,  $39.5^{\circ}$  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)  $10^{\circ}$ , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip)  $10^{\circ}$  и вдоль разлома (slip)  $91^{\circ}$ . Эпицентр землетрясения, произошедшего 27 февраля 2010 года, севернее от предыдущего в точке с координатами  $72.72^{\circ}$  з.д. и  $35.846^{\circ}$  ю.ш. на глубине 55 км. Длина разрыва 450 км, ширина 100 км, смещение по разрыву 15 м. Угол разлома (strike)  $16^{\circ}$ , угол смещения плиты вглубь (dip)  $14^{\circ}$ , вдоль разлома (slip)  $104^{\circ}$ .

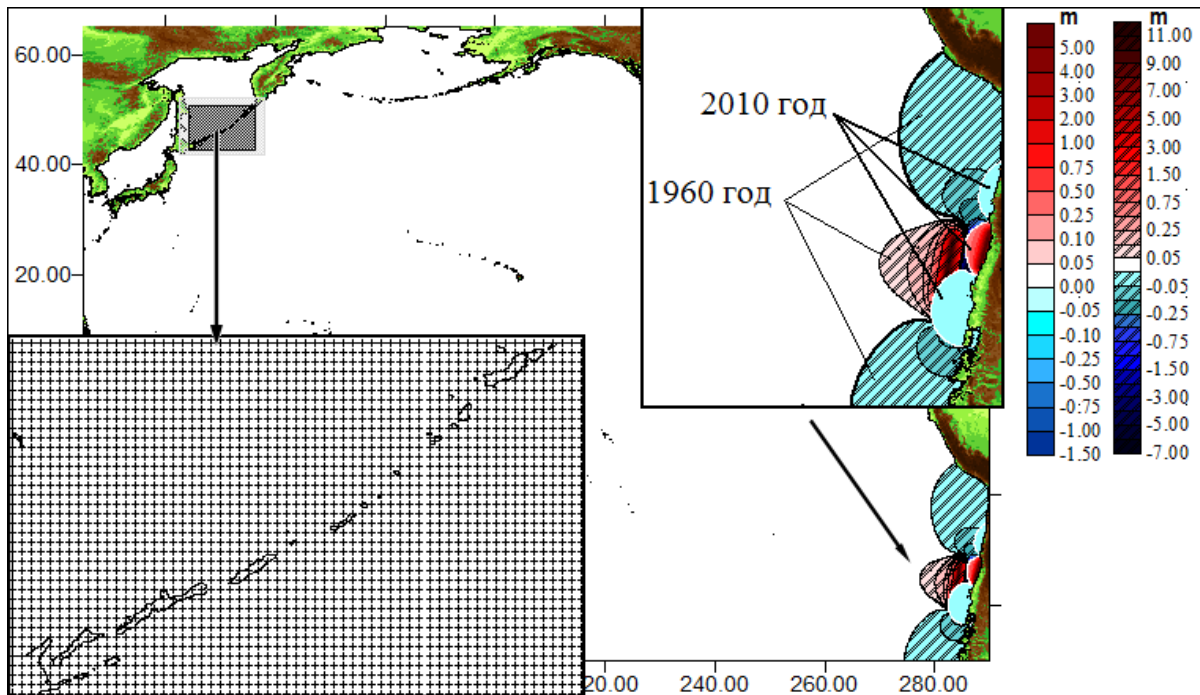


Рис. 1. Источники чилийских цунами 1960 и 2010 годов и расположение вложенных сеток для Охотского моря и Курильских островов

Рассчитанные начальные волны представляют собой знакопеременное смещение с максимальным поднятием в результате землетрясения 1960 года на 10.8 м и опусканием на 6 м, так что максимальная высота волны в очаге составила около 17 м. Максимальная высота волны в очаге, образовавшемся 27 февраля 2010 года, – около 6 м.

Накат волны на берег не моделировался, и в расчетах используются условия полного отражения (приближение вертикальной стенки на глубине 5 м). Цунами моделировалось на протяжении 35 ч с момента начала землетрясения.

В связи с тем, что источники землетрясения располагались недалеко друг от друга, по сравнению с расстоянием от источников землетрясения до Курильских островов и о. Сахалин, то время прохождения волны через Тихий океан составило порядка 21-22 часа от обоих источников.

Однако высоты волн, образовавшиеся от цунами 2010 года, были на порядок меньше, например, в Северо-Курильске (о. Парамушир) в 1960 году высота цунами составила 4,7 м, в п. Малокурильское (о. Шикотан) 4 м, а в 2010 году высоты волн составили 2,28 м и 1,1 м соответственно.

В 1960 году на Курильских островах при максимальном подъеме уровня воды в г. Северо-Курильск были затоплены дома на побережье, склады и причал, смыты мост и некоторые строения в Южно-Курильске. В Малокурильском были затоплены причалы и некоторые здания, мост вынесло на сушу. Суда сорваны с якорей. При обоих цунами волна проникла в Охотское море.

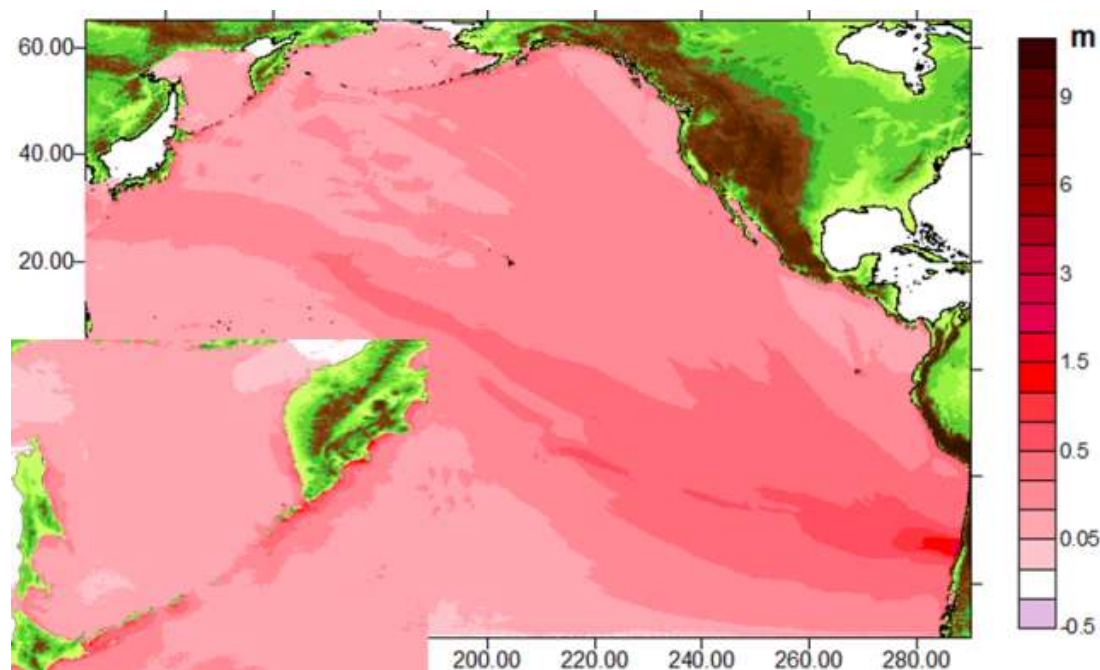
Проявления Чилийских цунами 1960 и 2010 годов на Курильских островах и о. Сахалин приведены в табл. 1 [11].

Таблица 1

**Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, вызванные землетрясениями в Чили**

Наименование населенного пункта	Высота цунами в 1960 году, м	Высота цунами в 2010 году, м
г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	4,7	2,28
п. Малокурильское (о. Шикотан)	4	1,1
г. Курильск (о. Итуруп)	1,0	0,1-0,15
г. Поронайск (о. Сахалин)	0,8	0,25
п. Стародубское (о. Сахалин)	Измерения не проводились	0,2-0,3
г. Корсаков (о. Сахалин)	1,2	0,2
г. Холмск (о. Сахалин)	0,1	0,08

Максимальные распределения амплитуд волн цунами от обоих источников схожи по географии расположения. Максимальные волны приходятся на Курильские острова (рис. 2), которые являются естественной преградой на пути распространения волн цунами, и в Охотское море цунами заходит, уже потеряв достаточное количество энергии. В настоящее время ведется работа по вычислению этих потерь. Анализ наблюдений за высотами волн цунами в северо-западной части Тихого океана это подтверждает.



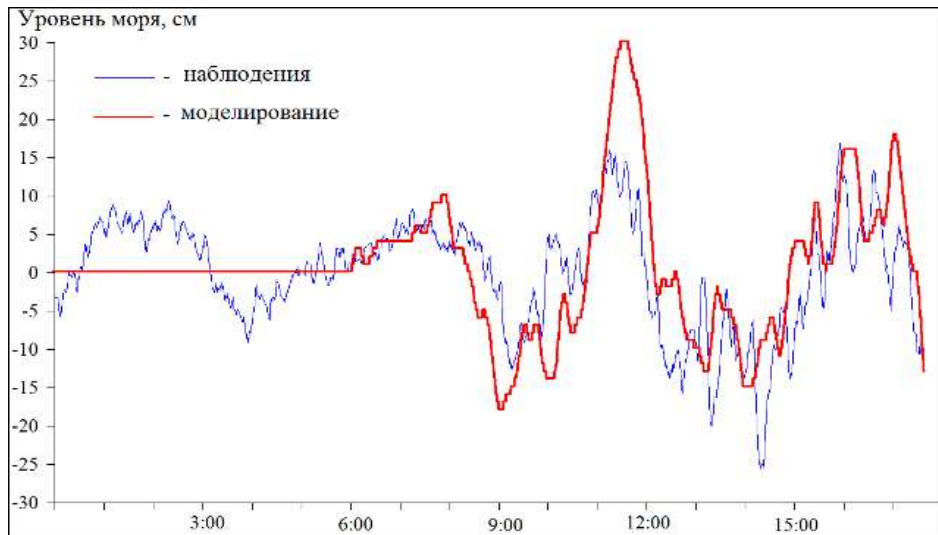
**Рис. 2. Максимально распределение амплитуд Чилийского цунами 27 февраля 2010 года**

### Сопоставление измеренных и расчетных данных

В настоящей работе проведено сравнение численного моделирования Чилийского цунами 2010 года с натурными записями уровня моря. Для изучения особенностей проявления цунами в разных пунктах Сахалинской области были использованы записи уровня моря в г. Корсаков и п. Стародубское, предоставленные Сахалинским центром цунами и запись уровня в п. Охотское в ковше рыбозавода, которая проводилась ИМГиГ ДВО РАН. Чтобы сделать сравнительный анализ произошедшего события с данными моделирования в этих населенных пунктах при выполнении моделирования были поставлены компьютерные мареографы.

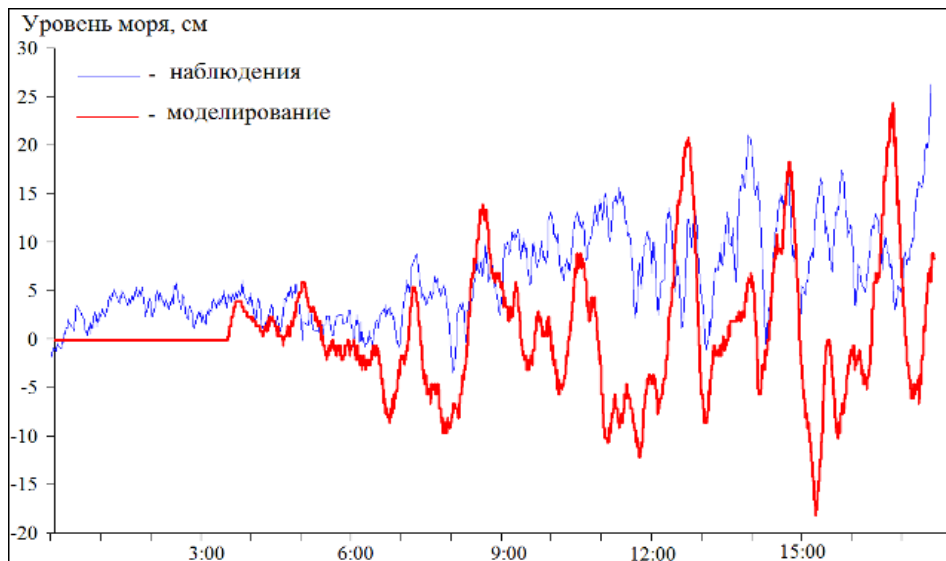
На рис. 3 представлены совмещенные записи уровня моря в г. Корсаков (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования в первые часы прихода цунами. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Наблюдается достаточно хорошее совпадение

уровней. Цунами началось с небольшого поднятия на 5-10 см спустя 25 ч после начала землетрясения. Период колебаний длился около 4 ч. Время прихода волны при моделировании и в записи наблюдения практически совпадают.



**Рис. 3. Сопоставление записей Чилийского цунами 2010 года в г. Корсаков (по данным наблюдения и моделирования)**

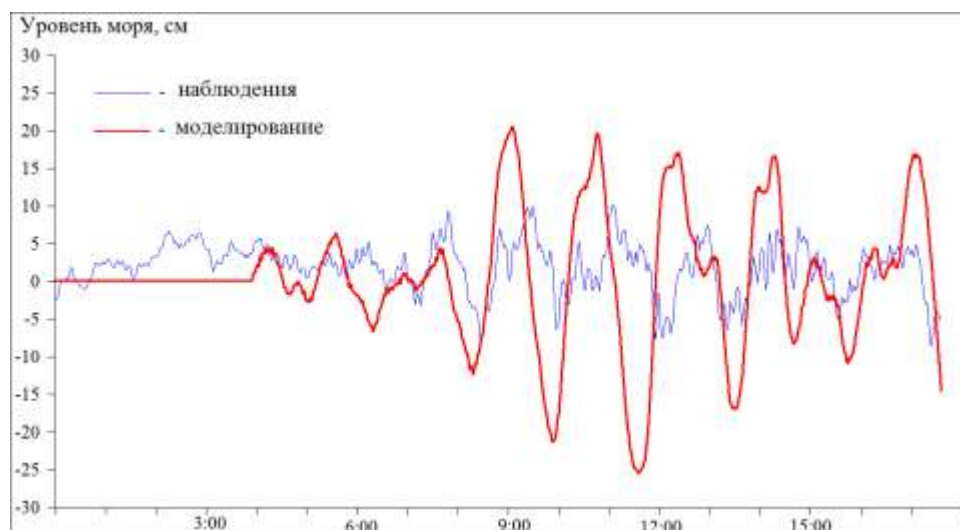
На рис. 4 представлены совмещенные записи уровня моря в п. Стародубское (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Из графика видно достаточно хорошее совпадение высот и периодов первых волн записи моделирования и наблюдения, характерный период колебаний составляет около 100 мин. Волна цунами пришла спустя примерно 21 час после землетрясения, и цунами началось с небольшого подъёма (5 см).



**Рис. 4. Сопоставление записей чилийского цунами 2010 года в п. Стародубское (по данным наблюдения и моделирования)**

На рис. 5 представлены совмещенные записи уровня моря в п. Охотское (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Из графика видно достаточно хорошее по времени приходу цунами и периоду колебаний. Характерный период колебаний составляет около 100 мин. Волна цунами пришла

спустя примерно 21 ч после землетрясения, и цунами началось с небольшого подъёма (5 см). Амплитуды колебаний уровня моря модельного ряда больше, так как модельный (компьютерный) мареограф располагался в открытом море, поэтому высоты получились больше, чем у стационарного мареографа, расположенного в закрытом ковше рыбозавода.

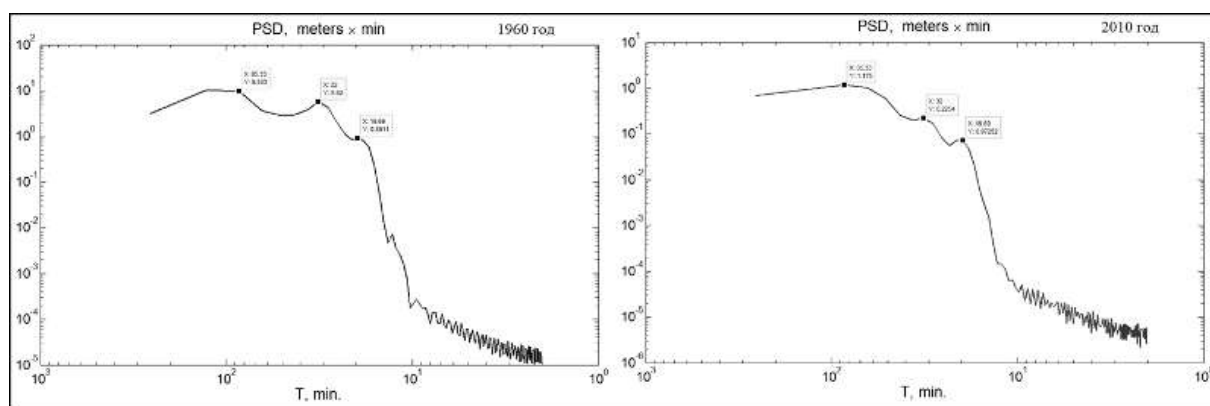


**Рис. 5. Сопоставление записей чилийского цунами 2010 года в п. Охотское (по данным наблюдения и моделирования)**

Датчики измерения уровня моря располагаются в ковше порта, а компьютерные мареографы – вне его на глубине около 10 м. Этим объясняется немного более ранний приход волны цунами по данным моделирования.

Также было проведено сравнение по времени прихода волн цунами и их высоте для населенных пунктов Курильских островов, в которых проводились наблюдения [4, 5, 6]. Анализ показывает достаточно хорошее совпадение записей цунами.

На рис. 6 представлено сравнение спектральной плотности мощности для рассчитанных записей Чилийских цунами 1960 и 2010 года в районе г. Северо-Курильска (Курильские острова). Отсюда видно, что усиление наблюдается на одних и тех же периодах: 85, 32 и 19 мин.



**Рис. 6. Оценка спектральной мощности плотности для полученных модельных записей волновых процессов (г. Северо-Курильск)**

### Выводы

Выполнено моделирование чилийских цунами 1960 и 2010 годов с помощью вычислительного комплекса, основанного на уравнениях мелкой воды, в сферических координатах с учётом вращения Земли. Проведено сравнение рассчитанных и реально наблюдавшихся

записей уровня моря для пунктов на побережье о. Сахалин и Курильских островах. Также было получено практически полное согласие расчета времени прихода волны в населенные пункты, которые удалены на значительное расстояние от эпицентров цунами. Сравнительный анализ рассчитанных записей цунами на шельфе Курильских островов показывает, что параметры волны на удалённых пунктах задаются формой шельфа, и для случаев чилийских цунами они являются схожими.

Выполнение этой работы поддержано грантом РФФИ 09-05-00971

### Библиографический список

1. **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.
2. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
3. **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.
4. **Левин, Б.В.** Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 2. С. 239–244.
5. **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.
6. **Файн, И.В.** Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волны на берег. – Москва. 1984. С. 80–83.
7. **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
8. **Yalciner, A.C.** Modeling and visualization of tsunamis: Mediterranean examples / A.C. Yalciner [et al.] // Tsunami and Nonlinear Waves (Ed: Anjan Kundu), Springer, 2007. P. 273–283.
9. сайт Геофизической службы США ([http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960\\_05\\_22.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22.php))
10. [http://ioc3.unesco.org/ptws/21/\(documents\)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt\\_apr06.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/21/(documents)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf).
11. <http://avi-nami.ce.metu.edu.tr>.
12. <http://sakhmeteo.ru/company/structure/tsunamicenter>
13. <http://namidance.ce.mrttu.edu.tr>

Дата поступления  
в редакцию 29.04.2011

**I.S. Kostenko**

### RESEARCH OF IMPACT OF REMOTE TSUNAMI AT THE SAKHALIN REGION COAST

In the present work numerical modeling distribution of historical tsunamis of a seismic origin in Pacific Ocean is lead. Events 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.