

УДК 551.46

## НЕВЕЛЬСКОЕ ЦУНАМИ 2 АВГУСТА 2007 ГОДА: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2008 г. А. И. Зайцев, Д. П. Ковалев, А. А. Куркин, член-корреспондент РАН Б. В. Левин,  
Е. Н. Пелиновский, А. Г. Чернов, А. Ялчинер

Поступило 15.01.2008 г.

2 августа 2007 г. в 02:37 по Гринвичу (13:37 – местное время) в Татарском проливе около юго-западного побережья о. Сахалин (приблизительно 7 км от г. Невельска и 80 км от г. Южно-Сахалинска) случилось сильное землетрясение с магнитудой 6.2 по шкале Рихтера. Подземные толчки ощущались во всех населенных пунктах юга о. Сахалин, в частности, сила толчков в Невельске составила 7–8 баллов, в Холмске 5–6 баллов и в Южно-Сахалинске 3–4 балла. Землетрясение вызвало многочисленные разрушения и привело к человеческим жертвам. Оно привело к возникновению цунами, зарегистрированному в России и Японии. Так, по японским данным волна высотой около 30 см подошла спустя 1 ч 13 мин к г. Вакканай (Wakkanai) и через чуть менее двух часов к г. Румои (Rumoi) на о. Хоккайдо. Японское метеорологическое агентство объявило тревогу цунами, быстро отмененную, а затем сделало заключение, что наблюдаемые колебания уровня моря имеют метеорологическое происхождение [1]. Цунами на западном берегу о. Сахалин зарегистрировано мареографом в г. Холмске, и его высота составила 50 см (согласно первоначальной информации). После землетрясения следы цунами на берегу были обследованы специалистами Сахалинского филиала Геофизической службы РАН и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. В районе поселков Ясноморское, Заветы Ильича, Калинино (между городами Невельск и Холмск) высота волны в некоторых местах превышала 2 м, при этом цунами поднялось высоко вверх по рекам. В настоящей

работе приводятся результаты численного моделирования этого события и их сопоставление с данными наблюдений.

Математическая модель основана на классических уравнениях мелкой воды, записанных в декартовых координатах,

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где  $\eta$  – смещение уровня моря,  $M$  и  $N$  – компоненты расхода воды вдоль осей  $x$  и  $y$ ,  $D$  – полная глубина бассейна,  $g$  – ускорение силы тяжести и  $n$  – коэффициент шероховатости дна. В расчетах используется значение  $n = 0.0025 \text{ м}^{-1/3} \cdot \text{с}$ , характерное для естественного дна (песок, мелкая галька).

Численная модель реализована в виде комплекса NAMI-DANCE, являющегося модификацией известного японского кода TUNAMI; он описан в [2–4]. Этот комплекс рекомендован, в частности, ЮНЕСКО для расчетов распространения цунами [5], и его первый вариант уже использовался для моделирования цунами 2004 г. в Индийском океане [6] и оценки цунами-риска япономорского побережья России [7].

Источник цунами выбран в соответствии с известным решением Окада [8], использующим данные о параметрах землетрясения. Последние приводятся на сайте Геофизической службы РАН [9]. Эпицентр землетрясения локализован в точке с координатами  $141.72^\circ$  в.д.,  $46.75^\circ$  с.ш. на глубине

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Институт морской геологии и геофизики

Дальневосточного отделения

Российской Академии наук, Южно-Сахалинск

Институт прикладной физики

Российской Академии наук, Нижний Новгород

Университет Среднего Востока, Анкара, Турция

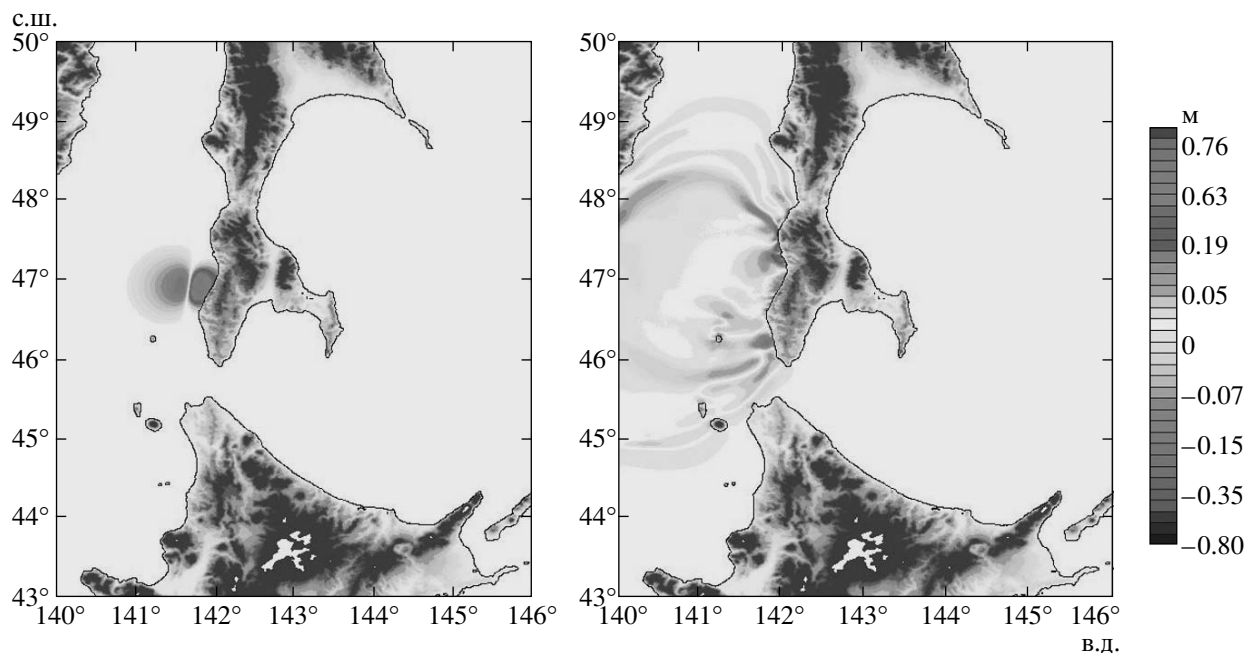


Рис. 1. Смещения уровня океана в начальный момент времени (слева) и через 1 ч (справа).

10 км. Длина разрыва, определяемая по афтершокам, 35 км, его ширина 15 км и смещение по разрыву 3 м. Угол разлома с меридианом (strike)  $6^\circ$ , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip)  $67^\circ$  и вдоль разлома (slip)  $91^\circ$ . Такое землетрясение вызывает начальное знакопеременное смещение уровня моря с максимальным поднятием на 72.5 см

и опусканием на 20.9 см, так что максимальная высота волны в очаге равна 93.4 см.

В расчетах батиметрия Охотского моря с шагом 500 м была получена интерполяцией из одноминутной батиметрии GEBCO1. Накат волны на берег не моделировался, и в расчетах используются условия полного отражения (приближение вертикальной стенки на глубине 3 м). Результаты расчетов распространения волн цунами в Татарском проливе иллюстрирует рис. 1, где показаны мгновенные смещения уровня океана сразу после землетрясения (очаг цунами) и через 1 ч. Цунами в районе Невельска–Холмска появляется практически сразу, через 20 мин волна подходит к Приморью и через 60 мин достигает японского о. Хоккайдо. Времена прихода волны к пунктам на о. Хоккайдо были зафиксированы Японским метеорологическим агентством [1], и ожидаемое время прихода волны цунами к г. Вакканай составило 1 ч 13 мин.

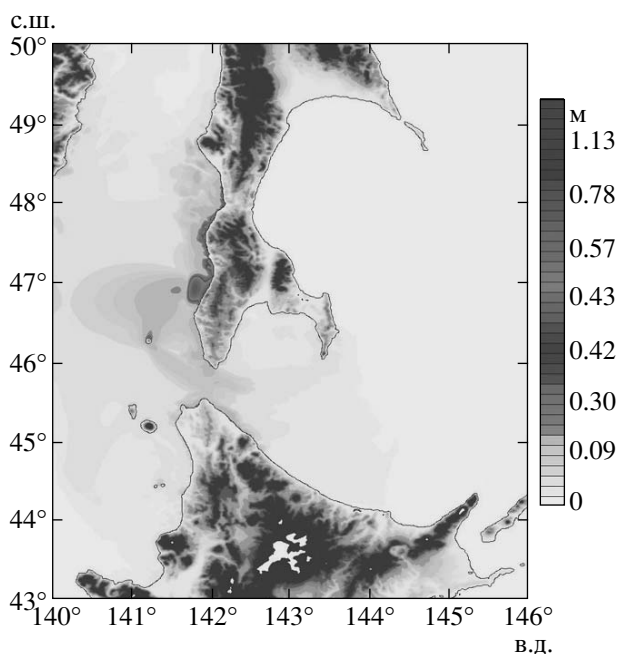


Рис. 2. Рассчитанное распределение максимальных высот волн в Татарском проливе.

Максимальное пространственное распределение высот цунами (диаграмма направленности) показано на рис. 2, подтверждая, что основной удар пришелся на юго-западную часть о. Сахалин. На рисунке 3 сопоставляется рассчитанное распределение высот цунами вдоль побережья о. Сахалин с немногочисленными данными наблюдений [10]. Как и следовало ожидать, измеренные высоты заплесков оказываются выше, чем рассчитанные высоты волн далеко от берега.

В рамках эксперимента по регистрации длинных волн задолго до цунами в центральном ковше Холмского торгового порта ( $47.04672^\circ$  с.ш.,

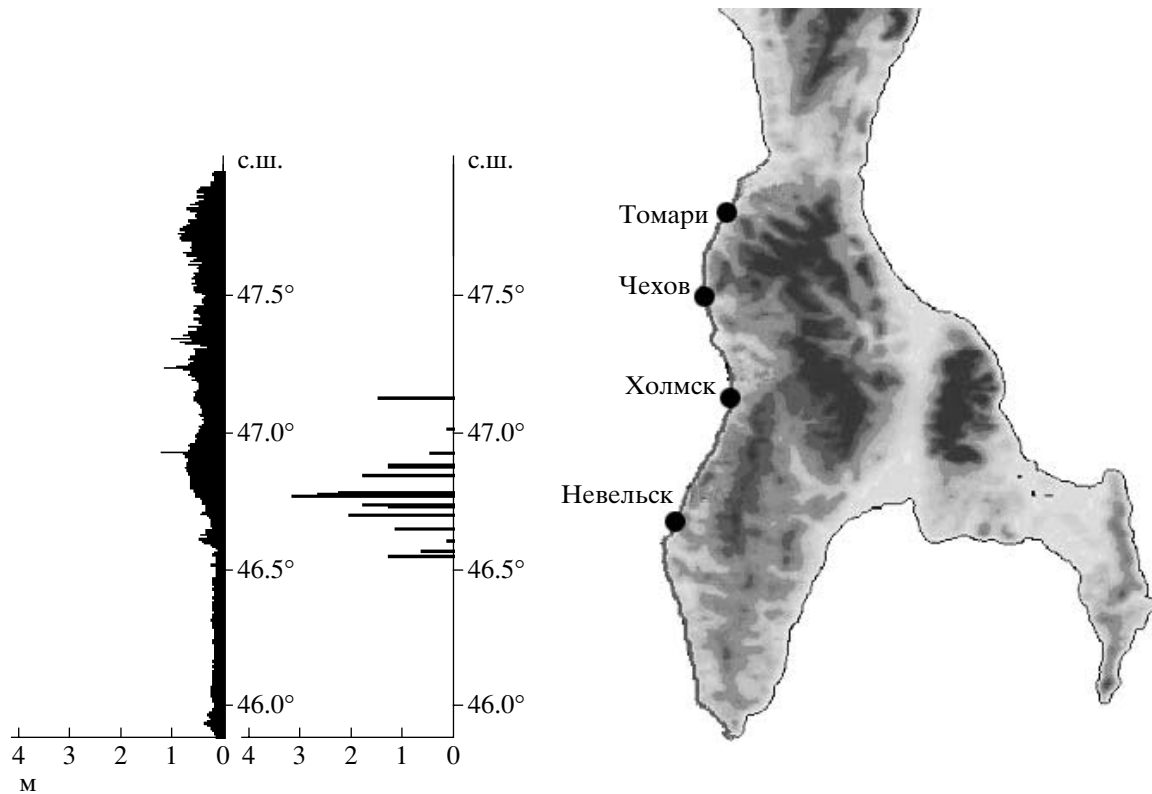


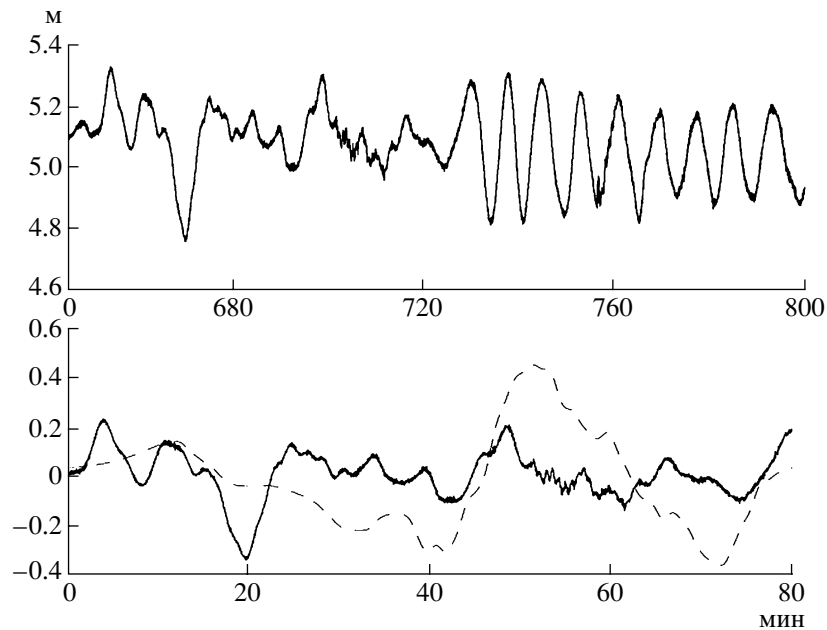
Рис. 3. Рассчитанное (слева) и измеренное (справа) распределение высот волн цунами вдоль о. Сахалин.

142.04256° в.д.) был установлен автономный регистратор волнения с дискретностью 1 с, разработанный на приборостроительном предприятии г. Углича. В качестве чувствительного элемента в приборе используется пьезорезонансный датчик гидростатического давления с температурной компенсацией, что определяет высокую чувствительность и точность датчика. В качестве накопителя информации использована твердотельная память большой емкости. В результате наряду с “бумажной” мареограммой, полученной стандартным мареографом, удалось получить цифровую запись цунами, показанную на рис. 4. Из нее видно, что цунами началось с подъема воды приблизительно через 7 мин после землетрясения и подъем уровня воды в первой волне достиг примерно 20 см. Максимальное опускание уровня воды через 20 мин после землетрясения составило 30 см. Характерный период колебаний уровня моря составляет около 20 мин. Рисунок 4 позволяет сопоставить инструментальную запись с результатами численного моделирования. При этом средний уровень воды в 5.1 м устранен из измеренной мареограммы. Укажем также, что рассчитанная мареограмма относится не к порту, а к достаточно удаленной от него последней мористой точке, отстоящей от берега на расстоянии 2.5 км, на глубине 19 м. Тем не менее рассчитанные вы-

соты волн находятся в хорошем согласии с наблюдениями, хотя частотный характер кривых различен (расчетная мареограмма не включает в себя сейшевые колебания в порту, представленные на инструментальной записи).

Рассчитаны также мареограммы волн цунами в пунктах на побережье о. Хоккайдо. Волна высотой 17 см через 70 мин после землетрясения приходит в г. Вакканаи. Согласно оценкам, сделанным в Японии на основе лучевой программы [1], время прибытия волны в данный пункт составляет 73 мин. Через 110 мин расчетная волна подходит к г. Румои, в то время как лучевые оценки дают 113 мин. Как и следовало ожидать, расчеты времен прихода волны по полной модели и в рамках лучевого метода совпадают. Специалисты Японского метеорологического агентства, однако, сделали заключение, что наблюдаемые колебания уровня моря в этих пунктах не связаны с Невельским землетрясением, хотя, на наш взгляд, цунами достаточно заметно на мареограммах.

Представленные здесь расчеты волн цунами, возникших во время сильного землетрясения на юге о. Сахалин 2 августа 2007 г., подтвердили локальный характер цунами на о. Сахалин. Высота волн в порту г. Холмска находится в согласии с наблюдаемой. Хорошее согласие также получено для времен прихода волны цунами на о. Хоккай-



**Рис. 4.** Цифровая запись цунами 2 августа 2007 г. в порту г. Холмска (верхний фрагмент; время отсчитывается от момента землетрясения). Внизу – расчетное (штриховая линия) и измеренное (сплошная линия) колебания уровня моря.

до. Важно отметить, что за прошедшие 130 лет в юго-западной части о. Сахалин произошло уже 9 случаев цунами [7, 11–14], поэтому проблема цунамирайонирования о. Сахалин является достаточно актуальной и здесь необходимы специальные исследования.

Выполнение этой работы поддержано грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД–3024.2008.5, грантами РФФИ (06–05–64087 и 08–05–00069), ИНТАС (05–109–5100 и 06–1000013–9236) и научной школы члена-корреспондента РАН Б.В. Левина НШ–8043.2006.2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт Японского метеорологического агентства. [http://ioc3.unesco.org/ptws/documents/presentations/3.7\\_JMAreport\\_hasegawa4.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/documents/presentations/3.7_JMAreport_hasegawa4.pdf)
2. Куркин А.А., Зайцев А.И., Ялчинер А., Пелиновский Е.Н. // Изв. АИН им. А.М. Прохорова. Прикл. математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
3. Yalciner A.C., Pelinovsky E., Zaytsev A. et al. In: Tsunami and Nonlinear Waves. В.: Springer, 2007. P. 273–283.
4. Сайт разработчиков программы AVI-NAMI. <http://avi-nami.ce.mrttu.edu.tr>
5. Сайт ЮНЕСКО. [http://ioc3.unesco.org/ptws/21/\(documents\)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt\\_apr06.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/21/(documents)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf)
6. Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В. и др. // ДАН. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
7. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Чой Б., Ли Дж.С. // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 179–188.
8. Okada Y. // Bull. Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
9. Сайт Геофизической службы РАН. [http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info\\_quakee.pl?mode=1&id=96](http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quakee.pl?mode=1&id=96)
10. Кайстренко В.М., Ломтев В.Л., Урбан Н.А. и др. В кн.: Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири. Междунар. науч. симпозиум. Южно-Сахалинск, 27–30 сентября 2007 г. Тез. докл. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. С. 133.
11. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. В кн.: Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. № 9.
12. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. В кн.: Тихоокеанский ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9–17.
13. Щетников Н.А. Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по мареографным данным 1952–1968 гг. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 164 с.
14. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камчат, 1996. 88 с.