

ЦУНАМИ НА САХАЛИНЕ 2 АВГУСТА 2007 ГОДА: МАРЕОГРАФНЫЕ ДАННЫЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*А.И. Зайцев⁵, Д.П. Ковалев², А.А. Куркин¹, Б.В. Левин², Е.Н. Пелиновский³,
А.Г. Чернов^{1,2}, А. Ялчинер⁴*

¹ Государственный технический университет, г. Нижний Новгород,

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск,

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород,

⁴ Университет Среднего Востока, Анкара, Турция

⁵ СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию 20 января 2009 г.

Приведены инструментальные данные регистрации цунами на о. Сахалин и о. Хоккайдо. Выполнено численное моделирование распространения цунами в Татарском проливе. Результаты расчетов находятся в удовлетворительном согласии с данными наблюдений.

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

ВВЕДЕНИЕ

Сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 6.2$ случилось 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 Невельска и 80 км от Южно-Сахалинска). 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 привело к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам. Оно вызвало цунами, зарегистрированное в России и Японии (эти данные приведены ниже). Японское метеорологическое агентство немедленно объявило тревогу цунами, быстро отмененную, а затем сделало заключение, что наблюдаемые колебания уровня моря имеют метеорологическое происхождение [9]. 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 два метра, при этом цунами поднялось высоко вверх по речкам. В настоящей работе приводятся

данные инструментальной регистрации цунами мареографами на о. Сахалин и о. Хоккайдо. Численное моделирование этого события проведено в рамках теории мелкой воды, и его результаты сопоставлены с данными наблюдений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Математическая модель основана на нелинейных 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 η – смещение уровня моря, M и N – компоненты расхода воды вдоль осей x и y , D – полная глубина

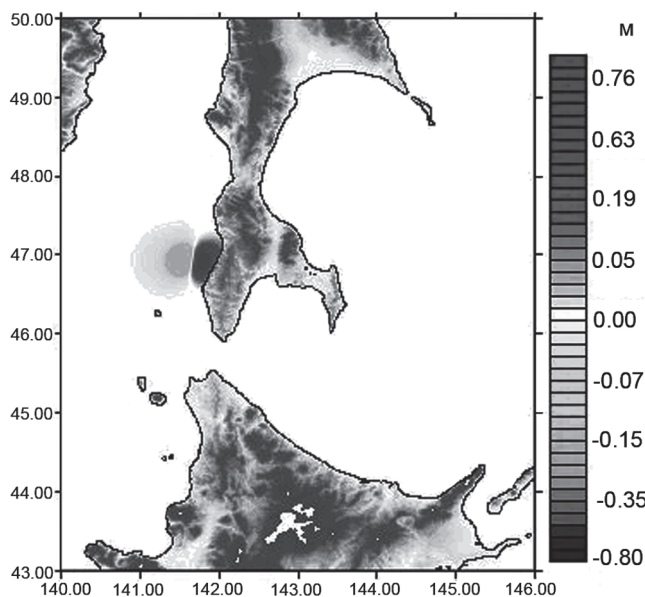


Рис. 1. Рассчитанный очаг цунами 2 августа 2007 г.

бассейна, g – ускорение силы тяжести, n – коэффициент шероховатости дна. В расчетах используется значение $n = 0.0025 \text{ м}^{-1/3}\text{с}$, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька).

Численная модель реализована в виде комплекса NAMI-DANCE, являющегося модификацией известного японского кода TUNAMI [5, 10, 15]. Этот комплекс рекомендован, в частности, ЮНЕСКО для расчетов распространения цунами [11], и его первый вариант уже использовался для моделирования цунами 2004 г. в Индийском океане [2] и оценки цунами-риска Япономорского побережья России [6].

Источник цунами выбран в соответствии с известным решением Окада [14], использующим данные о параметрах землетрясения. Последние приводятся на сайте Геофизической службы РАН [12]. Эпицентр землетрясения локализован в точке с координатами 141.72° в.д., 46.75° с.ш. на глубине 10 км. Длина разрыва, определяемая по афтершокам, – 35 км, его ширина – 15 км и смещение по разрыву – 3 м. Простираие разрыва (strike) – 6° , угол смещения по падению (dip) – 67° и вдоль разрыва (slip) 91° . Рассчитанный в соответствии с решением Окада источник цунами показан на рис. 1. Он представляет собой знакопеременное смещение с максимальным поднятием на 72.5 см и опусканием на 20.9 см, так что максимальная высота волны в очаге – 93.4 см.

В расчетах батиметрия Охотского моря с шагом 500 м была получена интерполяцией из известной одноминутной батиметрии GEBCO Digital Atlas. Накат волны на берег не моделировался, и в расчетах

используются условия полного отражения (приближение вертикальной стенки на глубине примерно 3 м). Распространение волны цунами в Татарском проливе иллюстрирует рис. 2. Цунами в районе Невельска–Холмска появляется практически сразу, через 20 мин волна подходит к Приморью и через 80 мин доходит до о. Хоккайдо. Времена прихода волны к пунктам на о. Хоккайдо были получены Японским метеорологическим агентством [9] на основе лучевой теории, и ожидаемое время прихода волны цунами к Вакканай (Wakkanai) составило 1 час 13 мин.

Максимальное распределение высот цунами в Татарском проливе показано на рис. 3, подтверждая, что основной удар пришелся на юго-западную часть о. Сахалин. На рис. 4 приведено рассчитанное распределение высот цунами вдоль побережья о. Сахалин, сопоставленное с немногочисленными данными наблюдений [4, 13]. Как и следовало ожидать, измеренные высоты заплесков оказываются выше, чем рассчитанные высоты волн вдали от берега, из-за дополнительного усиления волны в приустьевой области.

МАРЕОГРАФНЫЕ ДАННЫЕ

В рамках эксперимента по регистрации длинных волн задолго до цунами в центральном ковше Холмского торгового порта (47.04672° с.ш., 142.04256° в.д.) был установлен автономный регистратор волнения (АРВ) с дискретностью 1 с, разработанный на приборостроительном предприятии г. Углич. 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 используется твердотельная память большой емкости. В результате наряду с “бумажной” мареограммой низкого качества, полученной стандартным мареографом, удалось получить цифровую запись цунами, которая приведена на рис. 5. На записи видно, что цунами началось с подъема воды примерно 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.

Мареографные записи цунами на о. Хоккайдо приведены в [9], они показаны на рис. 6. Здесь же показаны время землетрясения, а также времена объявления и аннулирования тревоги цунами. Как видим, колебания уровня моря во время цунами были достаточно большими, особенно в пунктах Вакканай и Румои (Rumoi).

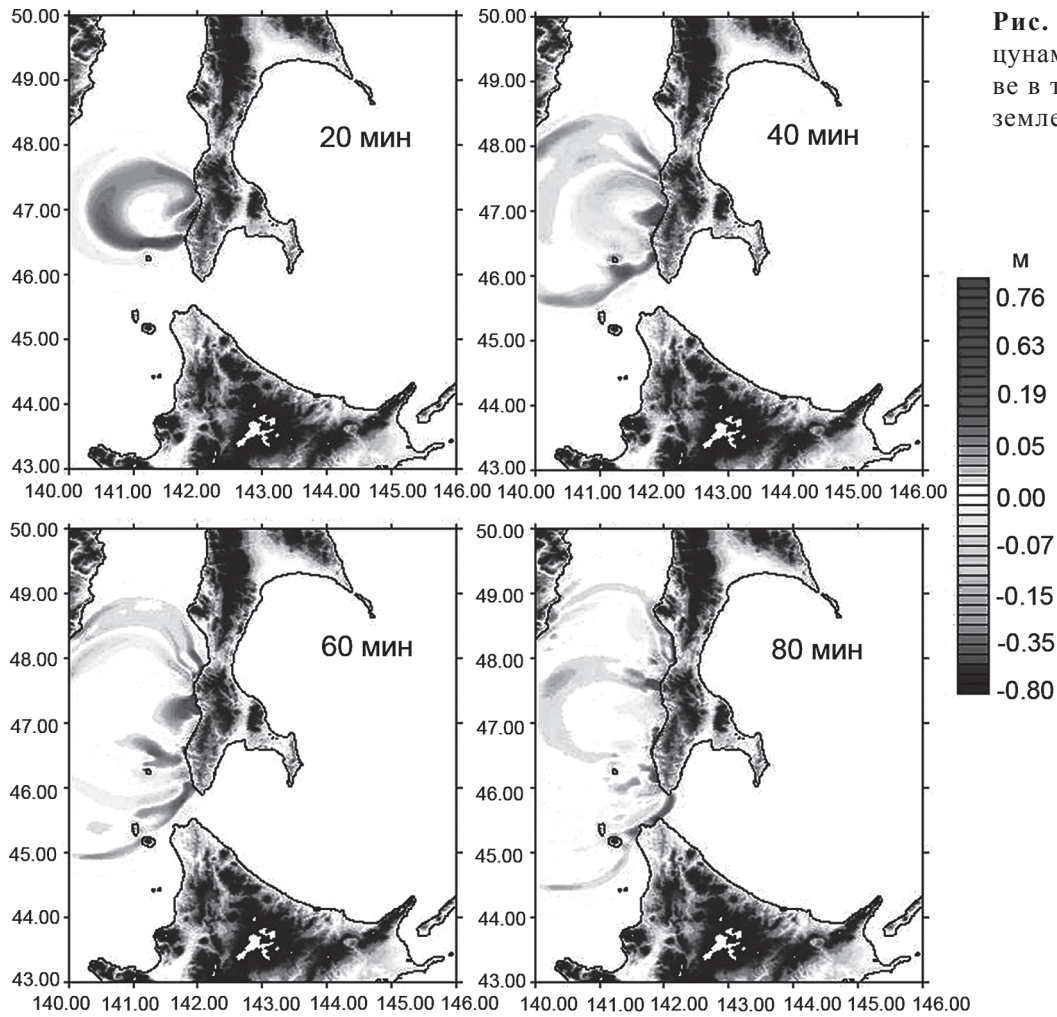


Рис. 2. Распространение цунами в Татарском проливе в течение 80 мин после землетрясения.

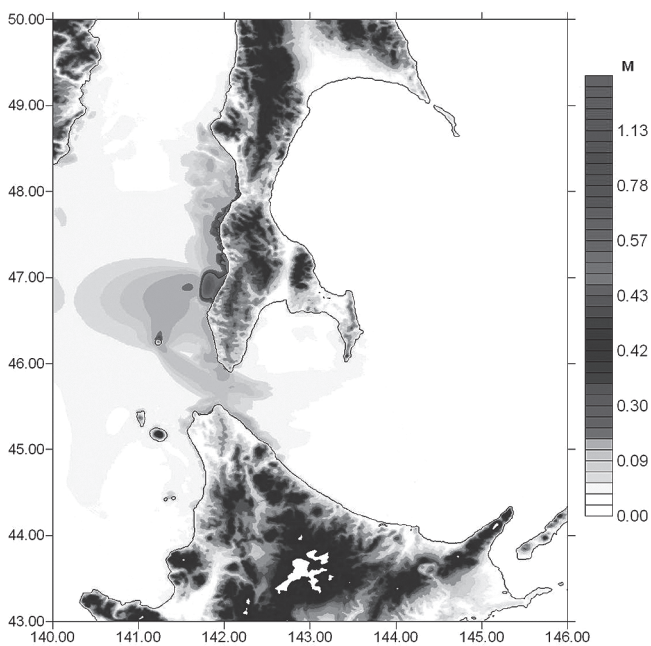


Рис. 3. Рассчитанное распределение максимальных высот волн в Татарском проливе.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Инструментальная запись цунами в порту г. Холмска, приведенная на рис. 5, использована для сопоставления с результатами численного моделирования (рис. 7). При этом средний уровень воды в 5.1 м устранен из измеренной мареграммы. Укажем также, что рассчитанная мареграмма относится не к порту, а к достаточно удаленной мористой точке (расстояние от берега 2.5 км, глубина 19 м). Тем не менее, рассчитанные высоты волн находятся в хорошем согласии с наблюдениями. Ход кривых в среднем оказывается также одинаковым в наблюдениях и расчетах. Различия связаны с высокочастотными колебаниями, так как расчетная мареграмма не включает в себя сейшевые колебания в порту, представленные на инструментальной записи.

Рассчитаны также мареграммы волн цунами в пунктах на побережье о. Хоккайдо (рис. 8). Волна высотой 17 см через 70 мин после землетрясения приходит в Вакканай. Согласно оценкам, сделанным

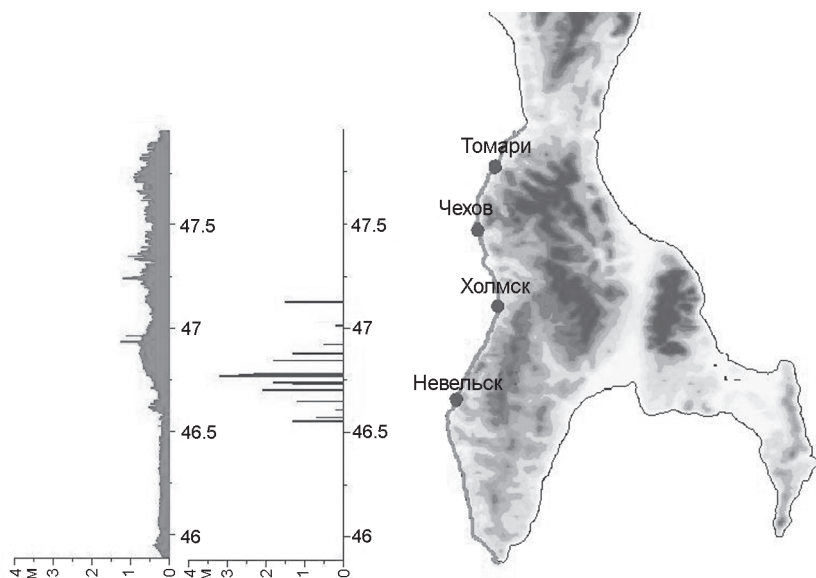


Рис. 4. Рассчитанные (слева) и измеренные (справа) высоты волн цунами вдоль о. Сахалин.

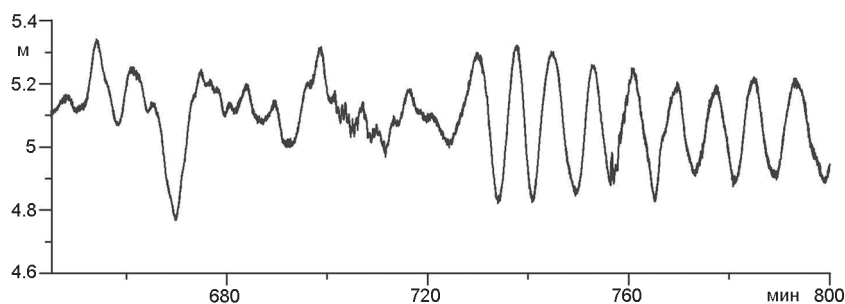


Рис. 5. Цифровая запись цунами 2 августа 2007 г. в порту г. Холмска (время отсчитывается от момента землетрясения).

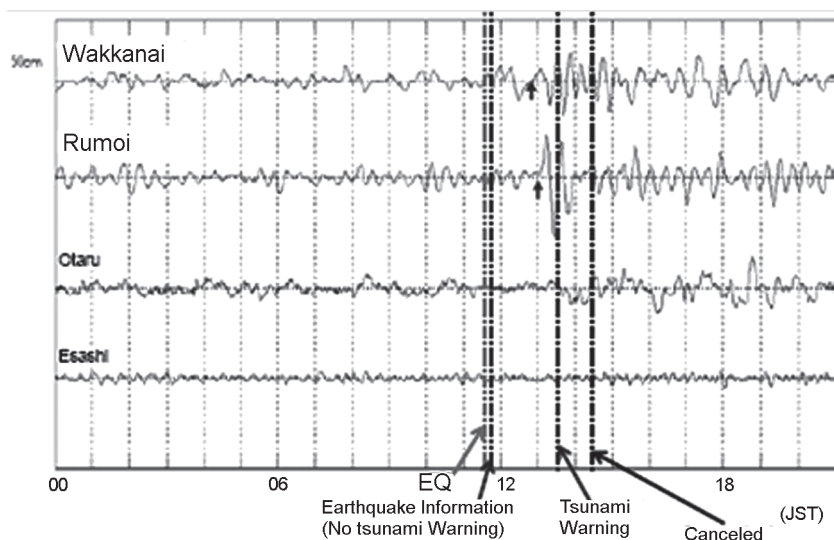


Рис. 6. Мареографная регистрация цунами на о. Хоккайдо, по [9].

в Японии на основе лучевой программы [9], время прибытия волны в данный пункт составляет 73 мин. Через 110 мин расчетная волна подходит к пункту 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 метеорологи-

ческого агентства [9] сделали заключение уже после цунами, что наблюдаемые колебания уровня моря в этих пунктах не связаны с Невельским землетрясением, а имеют метеорологическое происхождение. На наш взгляд, цунами достаточно заметно на мареограммах (рис. 6), а также в расчетах, чтобы отрицать его связь с землетрясением на о. Сахалин.

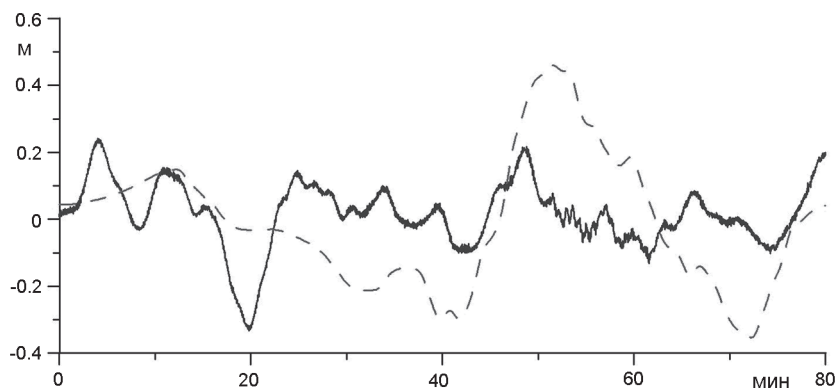


Рис. 7. Сопоставление расчетного колебания уровня моря (штриховая линия) с измеренным (сплошная линия) в порту г. Холмска во время цунами 2 августа 2007 г.

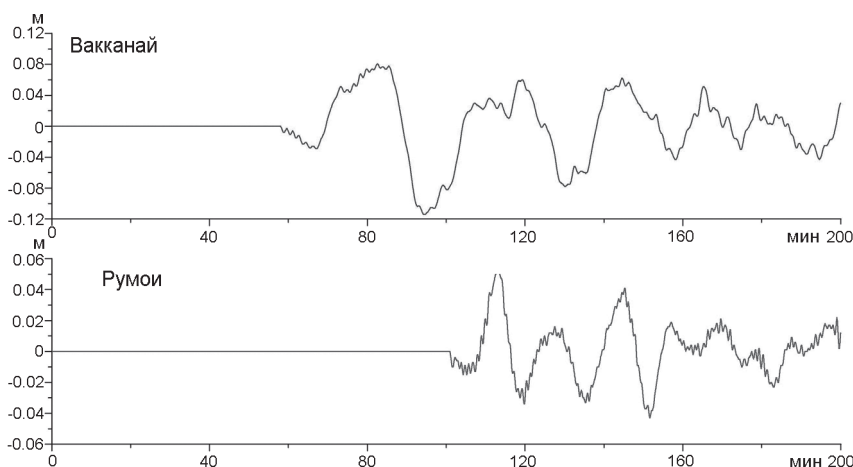


Рис. 8. Компьютерные мареограммы волн цунами в пунктах о. Хоккайдо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше расчеты волн цунами, возникших во время сильного землетрясения на юге о. Сахалин 2 августа 2007 г., подтвердили локальный характер цунами на о. Сахалин, где оно и было наиболее заметно. Приведены данные инструментальной регистрации цунами на о. Сахалин и о. Хоккайдо. Рассчитанная высота волн в порту г. Холмска находится в согласии с наблюдаемой, также хорошее согласие получается для времен прихода волны цунами на о. Хоккайдо. Важно отметить, что за прошедшие 130 лет в юго-западной части о. Сахалин произошло уже 9 случаев цунами [1, 3, 6–8]. Наиболее сильное цунами случилось в 1971 г. после землетрясения на о. Монерон с магнитудой 7.5. Поэтому проблема цунамирайонирования о. Сахалин является достаточно актуальной и здесь необходимы специальные исследования зон возможной генерации цунами и защищенности участков побережья от прихода удаленных цунами.

Выполнение этой работы поддержано грантами РФФИ (06-05-64087 и 08-05-00069), ИНТАС (05-109-5100 и 06-1000013-9236).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Го Ч.Н., Кайстренко В.М., Пелиновский Е.Н., Симонов К.В. Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР // Тихоокеан. ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9 – 17.
2. Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В. и др. Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 3. С. 388 – 392.
3. Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
4. Кайстренко В.М., Ломтев В.Л., Урбан Н.А. и др. Невельское цунами 2 августа 2007 г. // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Междунар. науч. симпоз., Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сент. 2007 г.: Тез. докл. / Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. С. 133.
5. Куркин А.А., Зайцев А.И., Ялчинер А., Пелиновский Е.Н. Модифицированный вычислительный комплекс “ЦУНАМИ” для оценки рисков, связанных с цунами // Изв. АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
6. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Чой Б., Ли Дж. Сравнительная оценка цунами, опасности япономорского побережья России на основе численного моделирования // Океан.

- нология. 2004. Т. 44, № 2. С. 179–188.
7. Соловьев С.Л., Ферчев М.Д. Сводка данных о цунами в СССР // Бюл. 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. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 164 с.
 9. Hasegawa Y. JMA service outline and operations and analysis for recent events // 22 Session of ICG/PTWS, Ecuador, 17020, September 2007. http://ioc3.unesco.org/ptws/documents/presentations/3.7_JMAreport_hasegawa4.pdf.
 10. <http://avi-nami.ce.mrttu.edu.tr>.
 11. [http://ioc3.unesco.org/ptws/21/\(documents\)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/21/(documents)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf).
 12. http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quakee.pl?mode=1&id=96.
 13. Kaystrenko V., Lomtev V., Urban N. et al. Manifestation of the August 2, 2007 Nevelsk tsunami // Geophys. Res. Abstr. 2008. V. 10. P. EGU2008-A-06626.
 14. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
 15. Yalciner A.C., Pelinovsky E., Zaytsev A. et al. Modeling and visualization of tsunamis: Mediterranean examples // Tsunami and Nonlinear Waves (Ed: Anjan Kundu), Springer, 2007. P. 273–283.

**A.I. Zaitsev, D.P. Kovalev, A.A. Kurkin, B.V. Levin, Ye.N. Pelinovskiy,
A.G. Chernov, A. Yalchiner**

Tsunami on Sakhalin on August 2, 2007: mareograph evidence and numerical simulation

Instrumental data on tsunami registration on Sakhalin Island and Hokkaido Island are presented. Numerical simulation of tsunami propagation in the Tatar Strait was performed. Results of numerical computations are in satisfactory agreement with the observed data.

Key words: tsunami, instrumental data, numerical simulation, Sakhalin.