

С.Ф. Доценко, А.В. Ингеро

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА ЦУНАМИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЦУНАМИРАЙОНИРОВАНИЯ ПОБЕРЕЖЬЯ

Дано описание компьютерной системы прогноза цунами в Черном море для произвольно расположенного распределенного источника генерации. Описаны входные данные, математическая модель эволюции цунами, как длинноволнового процесса, выходная информация и интерфейс системы. Приведены примеры рассчитанных с использованием компьютерной системы прогноза цунами сценария развития событий и распределения максимальных высот волн вдоль побережья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, цунами, прогнозирование, компьютерная система, сценарии событий, районирование побережья.*

Введение. Интерес к изучению цунами в районах Мирового океана, где это явление происходит сравнительно редко, существенно усилился, особенно после произошедших в последние годы в различных районах Земного шара катастрофических цунами. Эти события привлекли к проблеме внимание мировой общественности и стимулировали развертывание европейской системы раннего предупреждения о цунами в северо-восточной Атлантике, Средиземном море и прилегающих морях, включая Черное море [1]. В МГИ НАН Украины проблема черноморских цунами рассматривается в контексте морских природных катастрофических явлений в регионе, включая сгонно-нагонные колебания уровня моря, штормовые волны, волны-убийцы, сейши и др. [2].

Исследовательские программы для расчета цунами в бассейнах с реальной батиметрией давно получили широкое распространение. Разработка компьютерной системы прогноза цунами – более сложная задача. Такая система предполагает возможность быстрой адаптации к новым районам Мирового океана, гибкость по отношению к изменениям разрешения модели, возможность телескопирования, автоматического изменения положения и параметров очага цунами, визуализацию волновых полей, мареограмм, нахождение экстремальных характеристик волн и другой информации. Давно и успешно работы по разработке компьютерных систем для прогноза волн цунами проводятся в лаборатории цунами Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск, Россия) [3], в дальневосточных организациях (Южно-Сахалинск, Владивосток) [4], в Центре исследования цунами Национального управления океанических и атмосферных исследований (Сиэтл, США) [5] и др., ориентированных, в основном, на тихоокеанские цунами.

Ниже описаны основные модули компьютерной системы прогноза цунами в Черном море. Она может быть использована для исследовательских целей и прикладных работ, для оперативных прогнозов, в частности, в качестве элемента системы раннего предупреждения о черноморских цунами.

© С.Ф. Доценко, А.В. Ингеро, 2011

Основные модули компьютерной системы прогноза цунами. Компьютерная «Система прогноза цунами в Черном море», блок-схема которой показана на рис. 1, включает следующие основные модули: модуль ввода данных; модуль расчета параметров начального возмущения моря и эволюции волны цунами в бассейне Черного моря; модуль выходных данных, полученных в результате вычислительного эксперимента.



Рис. 1. Блок-схема «Системы прогноза цунами в Черном море»

Входными данными компьютерной системы являются сетка глубин и топографии местности, параметры эллиптической зоны генерации цунами (оси эллипса, смещение дна в центре очага, ориентация большой оси эллипса по отношению к параллелям), задаваемые пользователем, шаг интегрирования по времени, пункты регистрации расчетных мареограмм (их пе-

речень в зависимости от поставленной задачи может изменяться). Выходные данные в графической и текстовой формах включают поле смещений уровня моря, его экстремальные подъемы и понижения в бассейне в заданные моменты времени и мареограммы для выбранных точек бассейна.

В данной версии системы вводится топография Черноморской впадины на квадратной сетке, имеющей $2\,397 \times 1\,779$ узлов с пространственным шагом 500 м. На границе бассейна глубина принята равной 5 м.

Для задания параметров эллиптического очага цунами использованы эмпирические соотношения для осей эллипса по данным для евроазиатского региона [6] и максимальные смещения дна в центре очага для тихоокеанских цунами [7], определяемые по магнитуде M землетрясения:

$$\begin{aligned} L &= W; \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5);, \\ \lg L &= 0,6M - 2,5; \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5); \\ \lg a_0 &= 0,8M - 5,6, \end{aligned} \quad (1)$$

где L и W – большая и малая оси эллипса соответственно (в км), a_0 – максимальное смещение дна (начальное смещение уровня моря в м) в эпицентре.

Формулы (1) использованы в расчетном модуле системы для нахождения начального смещения поверхности моря в эллиптической области с центром в точке (x_0, y_0) по формуле

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2(\pi r/2) \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1), \quad (2)$$

где

$$r = 2 \sqrt{\left(\frac{x_1}{L}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{W}\right)^2},$$

$x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$, $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha - (x - x_0)\sin\alpha$; α – угол наклона продольной оси эллипса к оси x , отчитываемый против часовой стрелки.

В расчетном модуле компьютерной системы реализован конечно-разностный алгоритм расчета полей на основе системы нелинейных уравнений динамики поверхностных длинных волн в полных потоках с учетом квадратичного по скорости донного трения [8]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

с условием скольжения на твердой береговой границе, означающем равенство нулю нормальной к границе проекции полного потока жидкости:

$$V_n = 0. \quad (6)$$

Начальные условия задаются в виде

$$U = V = 0, \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (7)$$

В задаче (3) – (7) переменные x, y – зональная и меридиональная координаты; t – время; $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора полного горизонтального потока жидкости на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещения поверхности жидкости от горизонтального положения; $\zeta_0(x, y)$ – начальное смещение свободной поверхности жидкости (2); $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ – динамическая глубина жидкости; $H(x, y)$ – глубина бассейна в невозмущенном состоянии; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ – локальная скорость распространения длинных волн; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр Маннинга.

В расчетном модуле находится решение задачи (3) – (7) методом конечных разностей по явно-неявной по x, y и одношаговой по времени t схеме на разнесенных для проекций полного потока и смещений поверхности моря сетках (сетка Аракавы C) с шагами, соответствующими заданию батиметрии бассейна [8]. По результатам вычислительных экспериментов шаг по времени принят равным 1 с.

Программный комплекс позволяет визуализировать и сохранять в памяти компьютера карты распространения волн из зон генерации эллиптической формы в Черноморском бассейне, находить мареограммы в 69 пунктах морского побережья, оценивать время распространения цунами от сейсмических источников до побережья, рассчитывать спектры колебаний морской поверхности, находить экстремальные смещения уровня и высоты волн. Прибрежные пункты регистрации мареограмм пронумерованы против часовой стрелки, начиная с Одессы. Перечислим некоторые опорные пункты: 1 – Одесса; 5 – Черноморское; 8 – Евпатория; 12 – Херсонесский маяк; 17 – Ялта; 21 – Судак; 30 – Анапа; 34 – Туапсе; 36 – Сочи; 39 – Сухуми; 42 – Батуми; 59 – Варна; 65 – Вилково; 69 – Ильичевск.

Интерфейс системы (без и в режиме увеличения масштаба) приведен на рис. 2. Выходные данные представляют собой карты смещений уровня в определенные пользователем моменты времени в виде файлов *GS Surfer ASCII *.grd* формата, содержащих поле уровня моря в заданный момент времени. На экран выводится графическое отображение мареограммы для выбранного пункта регистрации и числовые файлы в *ASCII delimited* формате **.dat* для мареограмм в выбранных пользователем (из 69) прибрежных пунктах.

Интерфейс системы включает стандартные элементы (меню, панель кнопок быстрого доступа, строку состояния), а также область задания начальных условий, список пунктов регистрации мареограмм, карту и область для визуализации мареограмм, кнопки управления. Система позволяет задавать положение эпицентра и новых пунктов регистрации цунами, автоматически определяет текущие координаты, расстояния, допускает процедуры масштабирования.

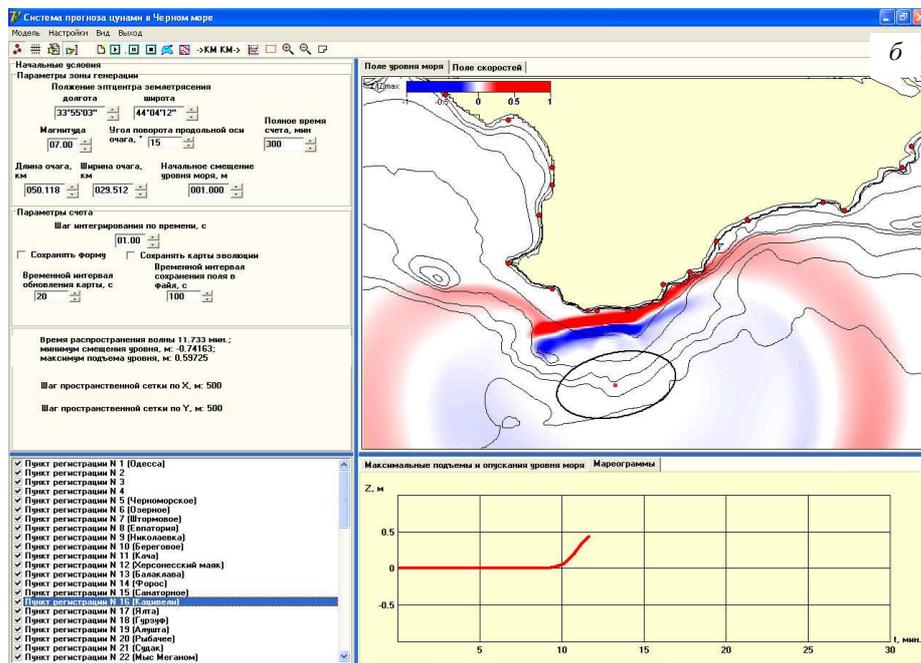
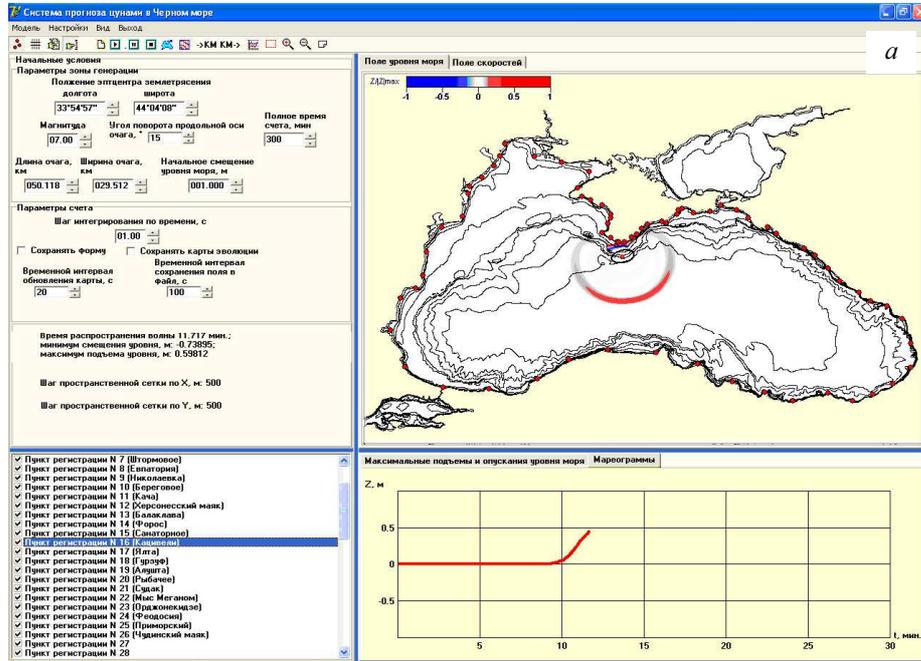


Рис. 2. Вид главного окна компьютерной «Системы прогноза цунами в Черном море»: а – номинальный масштаб; б – увеличенный масштаб.

Электронная карта формируется послойно и включает базовую карту Черного моря, изобаты, расчетную сетку, пункты регистрации волн цунами, а так же слой, отображающий поле уровня моря в процессе работы модели.

Пункты регистрации снабжены всплывающими подсказками с наименованием пункта и его государственной принадлежностью. Все пункты регистрации отнесены к изобате 5 м.

Поле уровня моря динамически обновляется через заданный пользователем временной интервал (в приведенном примере 20 с). Файл с расчетным полем уровня моря сохраняется каждые 100 с. Назначение основных кнопок быстрого доступа описано в таблице.

Таблица. Назначение кнопок быстрого доступа
«Системы прогноза цунами в Черном море»

Кнопка	Назначение
	Отображение пунктов регистрации;
	Отображение расчетной сетки;
	Переход в режим редактирования перечня пунктов регистрации расчетных мареограмм (возможность добавления, удаления, изменения параметров существующих пунктов регистрации);
	Режим визуального задания (по карте) положения эпицентра;
	Задание условий для нового варианта вычислений;
	Запуск вычислительного эксперимента;
	Пауза в расчетах;
	Остановка вычислительного эксперимента;
	Выделение региона для последующего увеличения;
	Увеличение (может выполняться многократно);
	Возврат к предыдущему масштабу карты;
	Возврат к исходному масштабу карты.

Применение компьютерной системы в исследовательских целях.

Применим описанную выше прогностическую систему для нахождения волнового поля и характеристик цунами вдоль черноморского побережья.

На рис. 3 приведены поля уровня в различные моменты времени в случае цунами, возбужденного подводным сейсмическим источником, находящимся в море к югу от Крымского полуострова.

Цунами в Черном море характеризуется усилением волн при распространении к берегу и их сильным захватом шельфовой зоной бассейна и представляет наибольшую опасность для ближайшего к очагу цунами участка берега [9].

Типичные расчетные мареограммы для пяти пунктов в случае очага цунами, положение которого показано на рис. 2, приведены на рис. 4. На них четко прослеживается зависимость времени начала колебаний уровня от расстояния между береговым пунктом и очагом цунами.

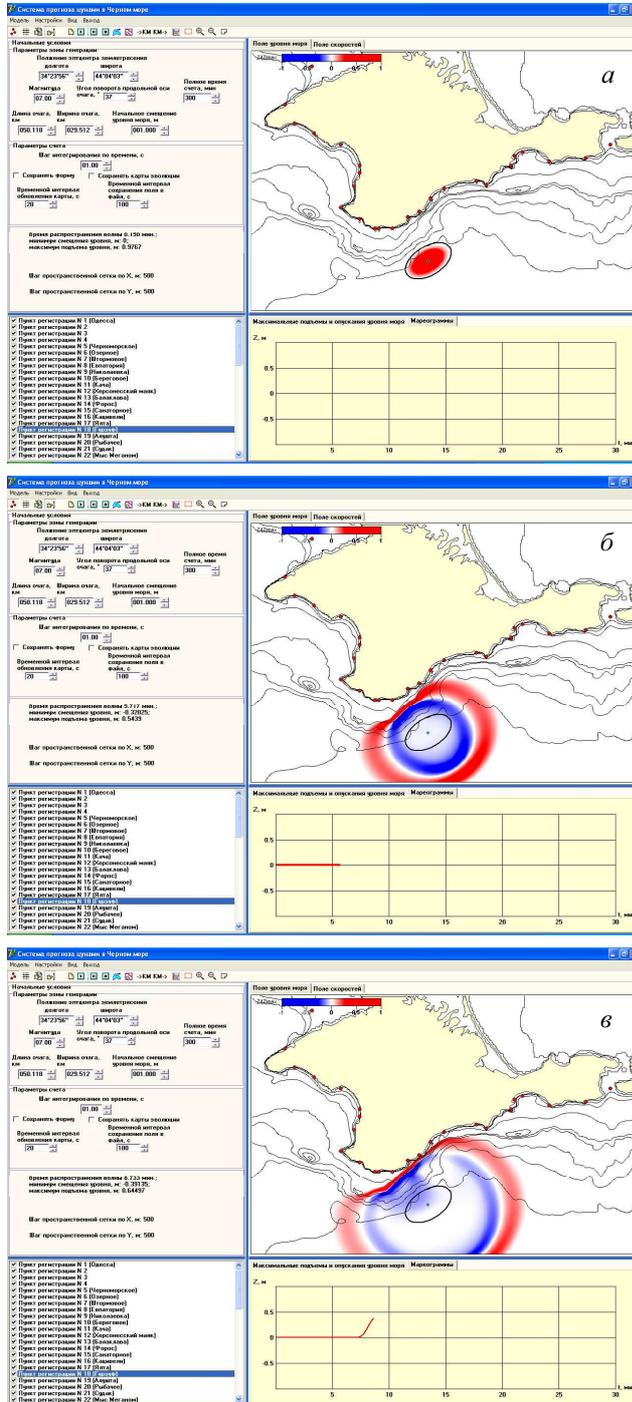


Рис. 3. Эволюция волны цунами из зоны подводного землетрясения магнитудой 7 единиц в Крымской сейсмо-активной зоне: а – $t=0$; б – $t=5,7$ мин; в – $t=8,7$ мин

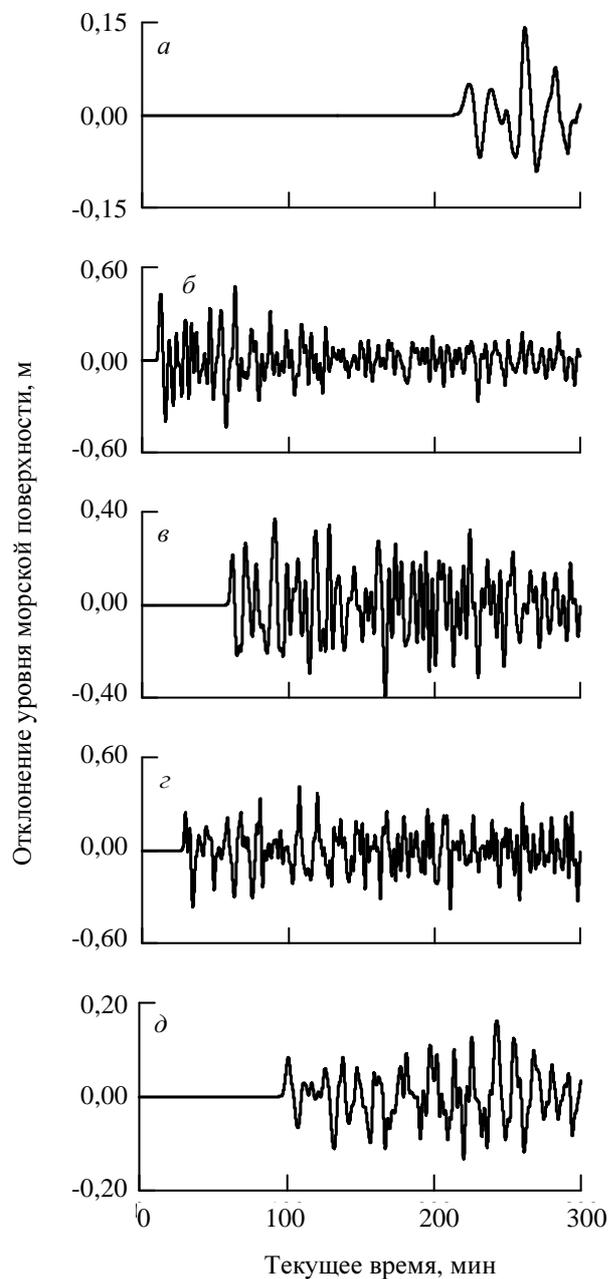


Рис. 4. Расчетные мареограммы в пунктах: *a* – Одесса; *б* – Ялта; *в* – Сочи; *г* – № 52 на побережье Турции; *д* – Варна.

Компьютерная система прогноза цунами может быть применена для выполнения районирования побережья Черного моря по степени опасности волновых колебаний уровня моря. На рис. 5 дано распределение экстремальных подъемов и понижений поверхности моря во всех 69 береговых пунктах, вызванных приходом цунами из очага, показанного на рис. 2. Они

найлены по расчетным колебаниям уровня моря в прибрежном пункте в течение 5 ч.

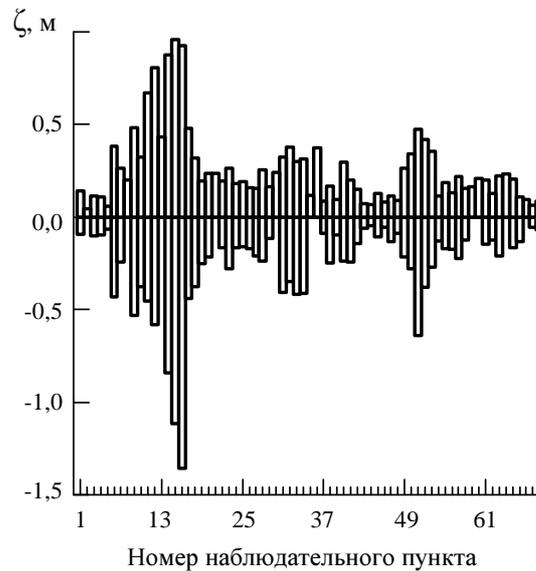


Рис. 5. Экстремальные подъемы ($\zeta > 0$) и понижения ($\zeta \leq 0$) уровня Черного моря в 69 пунктах побережья. Очаг цунами совпадает с показанным на рис. 2, б

Результаты расчетов показывают (см. рис. 5), что для заданного положения зоны генерации подъемы уровня моря у берега не превышают значения в очаге цунами, хотя понижения уровня по модулю могут превышать его. Распределение высот волн вдоль побережья моря крайне неравномерно. Как и ранее, волны наибольшей высоты образуются на ближайшем к сейсмическому источнику участке побережья. В данном случае – это район пос. Кацевели. Для проведения районирования черноморского побережья по интенсивности цунами необходимо выполнить серии вычислительных экспериментов для различных положений и магнитуд очагов цунами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *First session of Intergovernmental coordination group for the tsunami early warning and mitigation system in the North-East Atlantic, the Mediterranean and connected seas (ICG/ NEAMTWS)*. Rome, Italy, 21 – 22 November, 2005 // UNESCO, IOC, 2005. – 67 p.
2. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Возможные источники и механизмы формирования повышенной гидродинамической активности на шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2005. – вып. 13. – С. 73-94.
3. *Сайт «Tsunami Laboratory»*. [Электронный ресурс]. http://tsun.sccc.ru/tsun_hp.htm (Проверено 03.05.2010).

4. Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России. – Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. – 272 с.
5. Сайт «NOAA Center for Tsunami Research» [Электронный ресурс]. <http://nctr.pmel.noaa.gov/model.html> (Проверено 05.06.2010).
6. Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. и др. Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – 1993. – вып. 1. – М.: ИФЗ РАН. – С. 99-108.
7. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
8. Liu P.L.-F., Cho Y.-S., Briggs M.J., Lu U.K., Synolakis C.E. Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech. – 1995. – v. 302. – P. 259-285.
9. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Численное моделирование распространения и усиления волн цунами у Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2010. – № 1. – С. 3-15.

Материал поступил в редакцию 10.01.2011 г.