

Использование геоинформационной системы для отображения результатов моделирования распространения длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря

© 2017 А.Ю. Базыкина*, Е.В. Жук, А.Х. Халиулин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: aleksa.44.33@gmail.com*

Поступила в редакцию 09.01.2017 г.

Исследование распространения волн типа цунами в прибрежной зоне представляет собой важную практическую задачу в области океанологии. Цунами в Черном море – явление редкое, однако уровень сейсмоактивности в регионе не позволяет исключить генерацию сильных цунами при подводных землетрясениях. С помощью вычислительных экспериментов стало возможным анализировать особенности трансформации волн типа цунами и определять изменения уровня моря в прибрежной зоне. Представлено использование геоинформационной системы с целью визуализировать результаты моделирования распространения длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря. В рамках теории нелинейных длинных волн создана программная модель «Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря», которая интегрирована в геоинформационную систему «Черное море». Разработан программный модуль, который обеспечивает обмен данными между геоинформационной системой и моделью, позволяя проанализировать закономерности трансформации волнового поля и дать количественную оценку амплитудных характеристик волн при их распространении в направлении различных участков черноморского побережья. Результаты работы программного модуля представлены на примере Феодосийского залива. Построены мгновенные поля смещений уровня моря в заливе и поля горизонтальных скоростей, рассчитаны значения изменения максимальных повышений и понижений уровня моря в бассейне, а также мареограммы в заданных зонах, позволяющие оценить цунамиопасность побережья Феодосийского залива.

Ключевые слова: геоинформационная система, волны типа цунами, распространение нелинейных длинных волн, волны в бухтах и заливах, цунамиопасность черноморского побережья.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-3-74-81

Введение

Морское побережье всегда подвержено интенсивному волновому воздействию. Характер береговой линии и рельефа дна влияет на распространение длинных волн в прибрежных районах морских бассейнов [1]. Неоднородность геометрических параметров глубин и береговой линии может приводить к значительному усилению волн. Вопрос о том, как влияют краевые эффекты, обусловленные геометрией береговой черты произвольной формы и рельефом дна, на формирование поля длинных волн вблизи берега, нуждается в исследовании.

Волны типа цунами представляют собой поверхностные гравитационные длинные волны, которые возникают в море вследствие крупномасштабных возмущений, таких как землетрясения, извержения подводных вулканов, оползни, резкие изменения метеорологических условий и т. п. В Черном море

цунами возникают достаточно редко: за последние две тысячи лет в этом регионе отмечено около 20 событий [2, 3]. Из исторических описаний следует, что волны цунами, пришедшие в Сухуми (20 г. н. э.), Херсонес (Севастополь) (103 г. н. э.), Варну (543 г. н. э.), Босфор (557 г. н. э.), Евпаторию (1341 г.), Форос (1427 г.), на север Турции (1598 г.), были катастрофическими, высота подъема уровня моря достигала 2 – 3 м, что приводило к большим наводнениям и разрушениям [4].

Это явление может произойти в любом месте побережья, оно вызывается как подводными землетрясениями, так и сухопутными.

При распространении длинной волны типа цунами по мелководью ее передний склон замедляется, а задний движется быстрее. Форма волны трансформируется: гребень становится выше, а впадина – глубже. В результате передний склон волны становится все круче, гребень начинает обрушиваться вперед, и, выплеснувшись на берег, волна производит массовые разрушения.

Исследование и анализ особенностей распространения волн типа цунами и своевременный прогноз этих волн могут предотвратить гибель людей и уменьшить материальный ущерб. Под руководством С.Ф. Доценко проводились работы по численному моделированию распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря [5 – 9]. Такие модели нуждаются в надежном информационном обеспечении, для чего и создаются геоинформационные системы (ГИС), помогающие автоматизировать процессы обработки и представления полученных данных. Был создан комплекс программ, позволяющий осуществить оцифровку мареограмм, оценку частотных спектров, выборку энергонесущих колебаний и расчеты времени распространения и продолжительности цунами для различных пунктов побережья [10]. Целесообразной представляется также идея об интеграции моделей в ГИС, осуществляющую оценку эволюции волн и их амплитудных характеристик. Подобные системы освещены в работах [11, 12].

В настоящий момент отделом морских информационных систем и технологий ФГБУН «Морской гидрофизический институт РАН» ведутся разработки подобных информационных систем [13, 14] с использованием картографического сервера *Mapserver* [15]. Для обеспечения пользователей специальным инструментом по оперативному реагированию созданы программные модули, которые позволяют визуализировать результаты работы, проведенной под руководством С.Ф. Доценко (численное моделирование распространения нелинейных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне моря, в бухтах и заливах). Эти модули позволяют визуализировать эволюцию волн при их распространении по мелководью и в прибрежной зоне, а также дают количественную оценку их амплитудных характеристик. Таким образом, для пользователя становится доступной возможность достаточно быстрого прогнозирования вероятной опасности на интересующем участке черноморского побережья в результате воздействия на него длинных волн типа цунами.

Описание модели «Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря»

В горизонтальной плоскости Oxy (x, y – декартовы координаты точки на плоскости) рассмотрим бухту, глубина которой $h = h(x, y)$ непрерывно изменяется по известному закону.

Для описания распространения поверхностной длинной волны воспользуемся нелинейной моделью длинных волн. Она оперирует осредненными по глубине проекциями горизонтальных скоростей $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$, где t – время, и смещением свободной поверхности жидкости $\zeta = \zeta(x, y, t)$.

В рамках этого подхода нелинейная динамика длинных волн в двумерном случае с учетом квадратичного донного трения описывается системой трех уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= -k \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta)}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= -k \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta)}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \zeta)v]}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; $k = 2,6 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент квадратичного донного трения.

Начальные условия для системы уравнений (1) требуют задания полей u , v и ζ в начальный момент времени $t = 0$. Будем считать, что при $t = 0$ жидкость в бухте находится в невозмущенном состоянии, т. е.

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = \zeta(x, y, 0) = 0. \quad (2)$$

Через открытую границу ($0 \leq x \leq L$, $y = 0$, L – длина жидкой границы) в бухту входит плоская волна в форме полусинусоиды, которая моделируется посредством граничных условий

$$\zeta = a_0 \sin\left(\frac{\pi C t}{\lambda}\right), \quad (3)$$

$$v = \frac{g}{C} \zeta \quad \left(0 \leq x \leq L, y = 0, 0 \leq t \leq \frac{\lambda}{C}\right), \quad (4)$$

$$C = \sqrt{gh}, \quad (5)$$

где a_0 – максимальное начальное смещение свободной поверхности жидкости; λ – начальная длина волны; $C = C(x, 0)$ – локальная скорость распространения линейных длинных волн.

На жидких участках границы задаются условия свободного выхода линейных длинных волн из расчетной области:

$$\frac{\partial v}{\partial t} - C_1 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (0 \leq y \leq M_1, x = 0, t > 0), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + C_n \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (0 \leq y \leq M_n, x = L, t > 0), \quad (7)$$

где C_1 , C_n – локальные скорости распространения линейных длинных волн вдоль $x = 0$ и $x = L$ соответственно; M_1 и M_n – длина жидких границ вдоль $x = 0$ и $x = L$.

На жидкой границе, через которую поступает волна ($y = 0$), условие свободного выхода волн применяется только после полного входа волны в бухту:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - C \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (0 \leq x \leq L, y = 0, t \geq \lambda / C). \quad (8)$$

На твердых участках береговых границ принимались условия непротекания жидкости вдоль оси y и x соответственно:

$$\mathbf{v}_n = 0, \quad (9)$$

где \mathbf{v}_n – нормальная к границе области проекция горизонтальной скорости жидкости.

Начально-краевая задача (1) – (9) решается численно методом конечных разностей по явно-неявной схеме. Для смещений свободной поверхности жидкости ζ и проекций горизонтальных скоростей u и v используются разнесенные сетки (сетка Аракавы C). Шаги интегрирования по пространству и времени рассчитываются из условия Куранта.

Возможности созданной программы позволяют исследовать распространение нелинейных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне реальной и модельной геометрии. На входе задается массив распределения глубин исследуемой зоны, на выходе получаем данные, на основе которых можно дать оценку эволюции и трансформации длинных волн типа цунами в данной акватории. Таким образом, основное внимание при решении задачи уделено особенностям распространения волны типа цунами и распределению амплитудных волновых характеристик в прибрежной зоне.

В качестве примера рассмотрим распространение одиночной длинной волны типа цунами в Феодосийском заливе Черного моря [8]. Феодосийский залив расположен у юго-восточного берега Крымского п-ова. В широтном направлении размер залива составляет 20 км, в долготном – 40 км. Глубина у входа составляет 30 – 35 м. Феодосийский залив характеризуется ровным пологим дном (рис. 1).

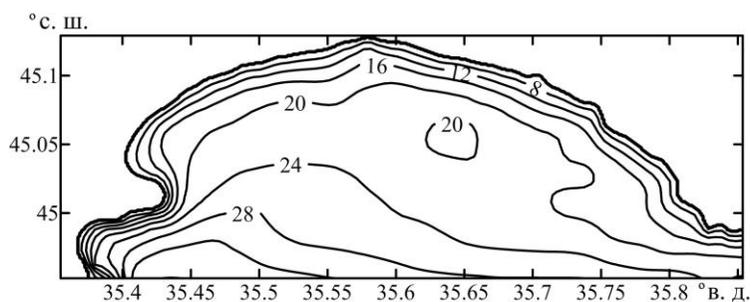


Рис. 1. Батиметрия Феодосийского залива

На входе задается массив глубин и количество расчетных узлов по долготе и широте (соответственно n_x и n_y). Для массива, который описывает рельеф дна Феодосийского залива, $n_x = 389$, $n_y = 196$. Расчетная сетка равномерная, с шагами по пространству $\Delta x = \Delta y = 100$ м, что составляет по долготе $0,00125^\circ$ и по широте $0,0009009^\circ$. Шаг по времени задавался равным 1 с. Приблизительная скорость распространения волны оценивается по формуле (5).

Для интеграции программной модели «Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря» в ГИС «Черное море» разработан программный модуль, обеспечивающий обмен данными между ГИС и моделью, а также запуск модели.

В начале работы программного модуля необходимо указать граничные координаты расчетной области и задать исходные параметры волны (рис. 2). В качестве примера были заданы следующие значения: начальная высота входящей в Феодосийский залив длинной волны $height = 1$ м, начальная длина волны $length = 10$ км. $Output\ time\ interval = 10$ с показывает интервал, с которым необходимо вывести мгновенные распределения волновых амплитудных характеристик в исследуемой области.

The image shows a software dialog box titled "WAVE MODEL PARAMETERS". It is divided into two main sections: "Simulation region" and "Wave initial parameters".

Simulation region:

- Latitude left: 44.9525
- Longitude left: 35.3547
- Latitude right: 45.1282
- Longitude right: 35.8522
- Radio buttons: Standard depth massive, User depth massive

Wave initial parameters:

- Latitude: 44.953
- Longitude: 35.355
- Height, m: 1
- Length, km: 10
- Output time interval, s: 10

An "OK" button is located at the bottom center of the dialog.

Рис. 2. Интерфейс ввода параметров модели «Распространение поверхностных длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря»

На выходе получаем поля уровня моря в исследуемой области и проекций горизонтальных скоростей в долготном и широтном направлениях с заданным интервалом по времени.

ГИС позволяет визуально представить полученные данные. На рис. 3 показано распределение уровня моря и поле вектора скорости в Феодосийском заливе в момент времени $t = 2030$ с.

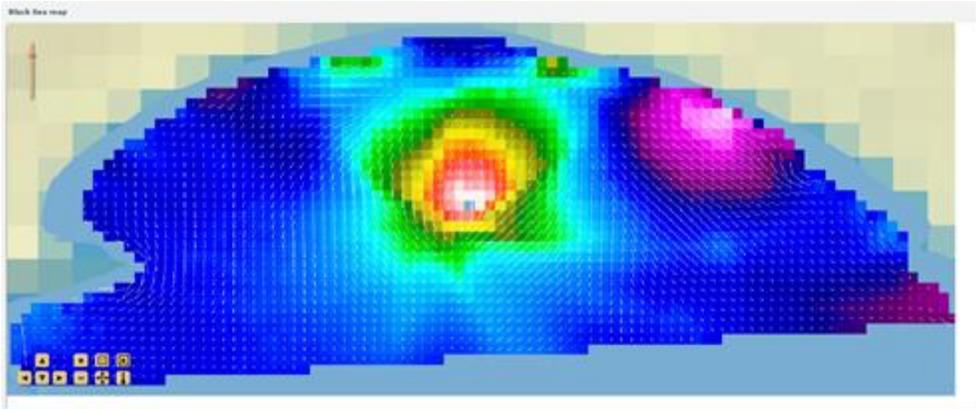


Рис. 3. Распределение уровня моря и горизонтальных скоростей в момент времени $t = 2030$ с при распространении нелинейной длинной волны в Феодосийском заливе (с начальными параметрами волны $a_0 = 1$ м, $\lambda = 10$ км)

Помимо вышеописанных данных получаем значения изменения максимальной и минимальной высоты волны в заливе с течением времени с привязкой к долготе и широте. На рис. 4 изображена зависимость максимальной высоты волны в заливе от времени.

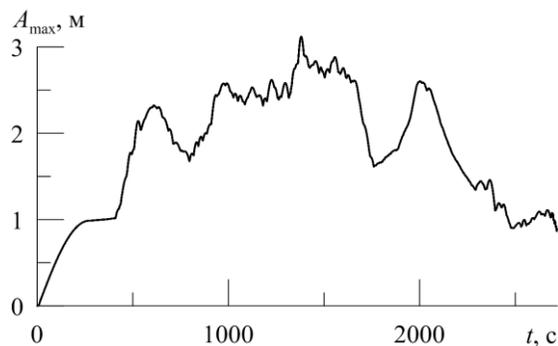
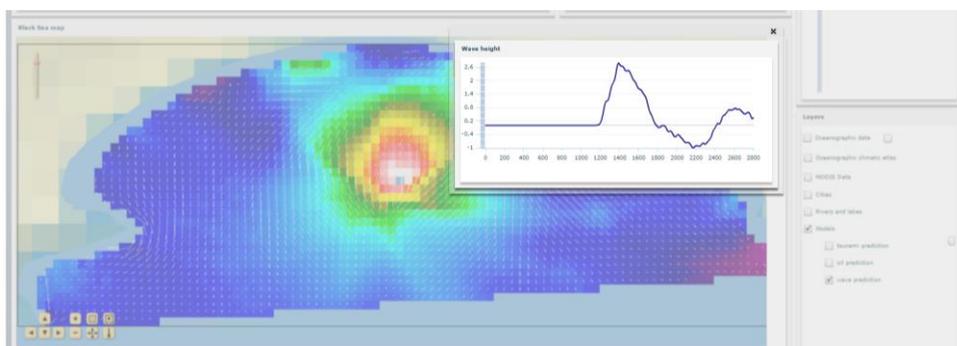
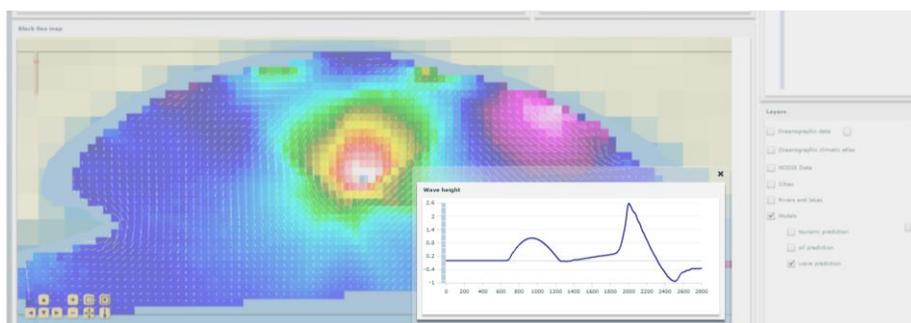


Рис. 4. Распределение максимальной высоты уровня моря с течением времени при распространении одиночной нелинейной длинной волны в Феодосийском заливе (с начальными параметрами волны $a_0 = 1$ м, $\lambda = 10$ км)

Визуально оценив экстремальные смещения уровня моря и определив их привязку к координатам, пользователь может получить мареограммы в тех зонах расчетной области, которые представляются наиболее опасными. Выделим, к примеру, два локальных максимума на рис. 4, которые указывают на усиление волны в моменты времени 1380 и 2000 с. На рис. 5 представлены мареограммы зон усиления волны в Феодосийском заливе. Видно, что в этих областях происходят как повышения уровня моря, так и экстремальные понижения.



а



б

Рис. 5. Мареограммы в зонах усиления волны в Феодосийском заливе: а – $45,05^\circ$ с. ш., $35,59^\circ$ в. д.; б – $45,10^\circ$ с. ш., $35,69^\circ$ в. д.

Выводы

Созданные специальные программные модули, встроенные в ГИС «Черное море», позволяют качественно решать задачи моделирования длинных волн типа цунами в зоне сопряжения суши и моря, дают количественную оценку их амплитудных характеристик при распространении волн по мелководью и в прибрежной зоне, а также обеспечивают интуитивно понятный интерфейс и визуализацию результатов моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 298 с.
2. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли. – 1997. – 33, № 1. – С. 86 – 96.
3. Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В. Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // Океанология. – 2004. – 44, № 5. – С. 679 – 685. – URL: http://meteo.geofaq.ru/books/612759_D9E3D_docenko_s_f_ivanov_v_a_prirodnye_katastrofy_azovo_chemomors.pdf (дата обращения: 20.12.2016).
4. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 174 с.
5. 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.

6. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Численный анализ распространения и усиления цунами на северо-западном шельфе Черного моря // Там же. – 2010. – № 5. – С. 11 – 20.
7. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Характеристика волн цунами сейсмического происхождения в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования // Там же. – 2013. – № 3. – С. 25 – 34.
8. *Bazykina A.Yu., Dotsenko S.F.* Propagation of tsunami-like surface long waves in the bays of a variable depth // *Physical Oceanography* – 2016. – No. 4. – С. 3 – 12. – doi:10.22449/1573-160X-2016-4-3-11
9. *Базыкина А.Ю., Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Особенности распространения волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря // Тез. докл. науч. конф. «Мировой океан: модели, данные и оперативная океанология». – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2016. – С. 47 – 48.
10. *Белокопытов В.Н., Халиулин А.Х., Годин Е.А. и др.* Программное обеспечение для морских экологических исследований // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 32 – 42.
11. *Wijesundara W.A.A.P.* GIS Based Tsunami Risk Assessment in Weligma, Sri Lanka // *Universal J. Geosci.* – 2014. – 2, No. 8. – P. 242 – 250. – doi:10.13189/ujg.2014.020802
12. *Mathur Dhruvesh. K., Udani Praful.M.* Tsunami detection & assessment using remote sensing and gis // *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.* – 2015. – 3, Issue 6. – P. 810 – 817. – URL: <http://oaji.net/articles/2015/786-1451214155.pdf>
13. *Жук Е.В., Годин Е.А., Ингеров А.В., Халиулин А.Х.* Опыт разработки ГИС Черного моря на основе бесплатного программного обеспечения // *Геопрофи.* – 2016. – № 2. – С. 36 – 40.
14. *Zhuk E., Khaliulin A., Zodiatis G., Nikolaidis A., Isaeva E.* Black Sea GIS developed in MHI // *Proc. SPIE 9688. Fourth Intern. Conf. on Remote Sensing and Geoinform. of the Environment (RSCy2016), August 12, 2016.* – 2016. – 96881C. – doi:10.1117/12.2241631
15. URL: <http://mapserver.org> (дата обращения: 6.01.2017).

Applying the geo-information system to display the results of modeling the tsunami type long waves' propagation in the Black Sea coastal area

A.Yu. Basykina*, E.V. Zhuk, A.Kh. Khaliulin

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: aleksa.44.33@gmail.com*

Study of the tsunami type waves' propagation on the coastal regions represents an important practical task in oceanology. Tsunami in the Black Sea is a rare phenomenon; however the seismic activity level in the region does not permit to exclude generation of strong tsunami waves due to the underwater earthquakes. The computation experiments make it possible to analyze the features of the tsunami type waves' transformation and to determine the sea level changes in the coastal zone. It is shown that the geo-information system is applied to visualize the results of modeling the tsunami type long waves' propagation in the Black Sea coastal zone. Within the framework of the nonlinear long waves' theory, the software model "Propagation of surface long waves of tsunami type in the Black Sea coastal zone" is developed; it is integrated into the geo-information system "Black Sea". Developed is the software module providing data exchange between the geo-information system and the model that permits to analyze the features of the wave field transformation and to quantify the waves' amplitude characteristics when they propagate towards different sections of the Black Sea coast. The results of the software module are represented on the example of the Feodosiya Gulf. The instantaneous fields of sea level displacements in the gulf and the horizontal velocities' fields are constructed; the values of the sea level maximum elevation and sink in the basin are calculated, and the mareograms in the specified zones which allow estimating tsunami hazard for the Feodosiya Gulf coast are built.

Keywords: geo-information system, tsunami type waves, nonlinear long wave propagation, waves in gulfs and bays, tsunami hazard for the Black Sea coast.