

А.В.Ингерров, Н.К.В.Санникова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ДЛИННЫХ ВОЛН В БАССЕЙНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Выполнен численный анализ распространения длинных волн из эллиптического очага цунами в северо-западной части Черного моря. Для 10 пунктов западного побережья Крыма рассчитаны величины максимальных вертикальных заплесков и экстремального понижения поверхности жидкости у берега. Показано, что наиболее интенсивные волны формируются у ближайших к очагу участков побережья. Наибольшие подъемы и понижения уровня моря не превышают по абсолютной величине начального смещения поверхности моря в очаге цунами. Первая волна цунами (волна повышения) не всегда является максимальной по высоте, а понижения поверхности моря в подошедшей к берегу системе волн могут быть даже более значительными по абсолютной величине, чем ее подъемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, волны цунами, нелинейные длинные волны, накат на берег, эллиптический очаг генерации, численное моделирование.*

В последние годы в связи с развитием европейской системы раннего предупреждения о цунами, в зону ответственности которой входит Северная Атлантика, Средиземное море и прилегающие моря, обострился интерес к изучению цунамиопасности побережья Черного моря. За последние две тысячи лет здесь отмечено около 20 случаев аномальных колебаний уровня моря, которые можно отнести к явлению цунами сейсмогенной природы [1]. Цунами наблюдались практически вдоль всего черноморского побережья и вызывалось как подводными, так и сухопутными землетрясениями. Для четырех событий прошлого века (два цунами 1927 г., цунами 1939 и 1966 гг. вдоль крымского и кавказского участков побережья) имеются инструментальные данные о колебаниях уровня моря. Обобщенные данные о них содержатся в [2].

В северо-западной части Черного моря цунами практически не наблюдались. В значительной степени это обусловлено слабой сейсмичностью этой части Черноморской котловины [3].

Вследствие небольшого объема данных измерений и относительно слабых проявлений зарегистрированных волн цунами вдоль берега единственной возможностью анализа закономерностей распространения цунами в бассейне Черного моря и получения оценок высот волн вдоль побережья является проведение вычислительных экспериментов по распространению и накату волн на берег. Численный анализ распространения цунами в бассейне Черного моря представлен в [4 – 8].

Ниже изложены результаты численного анализа особенностей распространения волн цунами от эллиптического очага в северо-западной части моря. Для 10 пунктов западного Крыма рассчитаны максимальные вертикальные заплески и минимальные понижения поверхности жидкости у берега. Использована нелинейная модель длинных волн с квадратичным по скорости донным трением. Расчеты распространения и усиления волн вы-

полнены на прямоугольной сетке с пространственными шагами 1000 м, а наката на берег 250 м.

Математическая модель. Рассмотрим бассейн, форма береговой черты и распределение глубин которого моделируют северо-западную часть Черного моря. Расчет распространения волны проводился в области, ограниченной как твердой береговой границей с вертикальной стенкой на глубине 5 м, так и жидкими прямолинейными границами: меридиональной западной $B_1 = \{(x, y): x = 0 \text{ км}, 0 \leq y \leq 67 \text{ км}\}$, зональной южной $B_2 = \{(x, y): 0 \leq x \leq 393 \text{ км}, y = 0\}$ и меридиональной восточной $B_3 = \{(x, y): x = 393 \text{ км}, 0 \leq y \leq 42 \text{ км}\}$. Глубина бассейна задана на прямоугольной сетке с пространственными шагами 1000 м.

Расчет наката волн на берег проводился в области $ABCD$, ограниченной участком западного побережья Крыма (CD) и открытыми частями границы: $AB = \{(x, y): x = 241 \text{ км}, 68 \leq y \leq 218 \text{ км}\}$, $BC = \{(x, y): 241 \leq x \leq 364 \text{ км}, y = 218 \text{ км}\}$, $AD = \{(x, y): 241 \leq x \leq 356 \text{ км}, y = 68 \text{ км}\}$. Глубина бассейна в этой области задана на прямоугольной сетке с пространственными шагами 250 м.

Генератор волн – вертикальные смещения эллиптического участка дна, происходящие при $t \geq 0$ по закону

$$h(x, y, t) = h_0(x, y)q(t), \quad (x, y) \in G, \quad (1)$$

конкретный вид которого будет представлен ниже. В формуле (1) t – время; x – зональная координата; $q = 0$ при $t \leq 0$.

Для описания процесса распространения волн цунами используется нелинейная двумерная эволюционная модель поверхностных длинных волн с учетом квадратичного по скорости донного трения. В рамках этой модели волновое движение жидкости в полных потоках описывается системой трех уравнений:

$$U_t + (U^2/D)_x + (UV/D)_y = -gD\zeta_x - gk^2D^{-7/3}U\sqrt{U^2 + V^2}, \quad (2)$$

$$V_t + (UV/D)_x + (V^2/D)_y = -gD\zeta_y - gk^2D^{-7/3}V\sqrt{U^2 + V^2}, \quad (3)$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = 0, \quad (4)$$

где $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции полного горизонтального потока жидкости на оси x и y соответственно; $\zeta(x, y, t)$ – смещение свободной поверхности жидкости от горизонтального положения равновесия; $D = H(y) + \zeta(x, y, t) - h(x, y, t) > 0$ – полная глубина жидкости с учетом смещений свободной поверхности и деформаций дна бассейна; g – ускорение свободного падения; $k = 0,013$ – параметр Маннинга. Значениям $h > 0$ соответствует локальный подъем, $h < 0$ – локальное опускание дна бассейна.

В начальный момент времени жидкость неподвижна, а ее свободная поверхность горизонтальная, а поэтому

$$U = V = 0, \quad \zeta = 0 \quad (t = 0). \quad (5)$$

При расчете распространения волн на твердой береговой границе задается условие непротекания (скольжения)

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

на жидких границах расчетных областей $AB, BC, AD, B_1, B_2, B_3$ использовано условие свободного выхода линейных длинных волн из расчетной области

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} - C \frac{\partial V_n}{\partial n} = 0, \quad (7)$$

где $V_n = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$ – проекция полного потока на внутреннюю нормаль, $\mathbf{V} = (U, V)$ (x, y, t) – вектор полного горизонтального потока жидкости, $\mathbf{n}$ – внутренняя нормаль к границе расчетной области, $C = \sqrt{gH(x, y)}$ – локальная скорость распространения длинных волн.

Для описания наката волн на западное побережье Крымского п-ова (CD) использовался алгоритм, близкий к используемому в POM (Princeton Ocean Model) [9].

Смещения дна бассейна (1) в эллиптической области с центром в точке (x_0, y_0) задавались в виде

$$h_0 = a_0 \begin{cases} \cos^2(\pi\xi/2), & \xi \leq 1, \\ 0, & \xi > 1, \end{cases} \quad \xi = 2\sqrt{\frac{x_1^2}{L^2} + \frac{y_1^2}{W^2}}, \quad (8)$$

$$q = 0 \quad (t < 0), \quad t/T \quad (0 \leq t \leq T), \quad 1 \quad (t > T). \quad (9)$$

Здесь L и W – большая и малая оси эллиптической зоны деформации дна соответственно; (x_0, y_0) – центр очага цунами; $a_0 = h_0(x_0, y_0)$ – максимальное смещение дна бассейна; T – длительность деформаций дна; $x_1 = (x - x_0)\cos\alpha + (y - y_0)\sin\alpha$, $y_1 = (y - y_0)\cos\alpha + (x - x_0)\sin\alpha$, α – угол наклона большой оси эллипса к оси x , отсчитываемый против часовой стрелки. Смещения дна (1), (8), (9) описывают локальные изменения глубины бассейна с остаточными деформациями $h = h_0(x, y)$ ($t \geq T$).

Оси эллиптической зоны генерации принимались равными $L = 50$ км и $W = 30$ км (соответствуют магнитуде землетрясения $M = 7$) и найдены по эмпирическим формулам для Евразийского региона [10]. Максимальное смещение поверхности моря a_0 в зоне землетрясения равно 1 м согласно полуэмпирической формуле из [11] для цунамигенных землетрясений Тихоокеанского региона с магнитудой $M = 7$. Глубина моря в очаговой зоне – 100 м, большая ось вытянута параллельно изобате (характерно для цунамигенных подводных землетрясений [12]): $\alpha = 0,8\pi$. Координаты его центра: $x_0 = 316$ км, $y_0 = 103$ км. Длительность деформаций дна $T = 5$ с.

Задача (2) – (9) решалась методом конечных разностей с использованием явно-неявной одношаговой по t схеме на разнесенных для проекций скорости и смещений поверхности моря расчетных сетках. Шаги интегрирования по пространству соответствуют заданию батиметрии расчетных областей: 1000 и 250 м. В вычислительных экспериментах шаги интегрирования по времени были приняты равными 2 и 1 с.

Результаты численного анализа. Процесс распространения цунами в северо-западной части моря из очага иллюстрирует рис.1. В результате смещений дна бассейна (8), (9) формируется локальное возмущение жидкости, в результате эволюции которого образуется пространственная волна цунами. Для кратковременных подвижек форма свободной поверхности при $t = T$ практически повторяет распределение остаточных деформаций дна бассейна $\zeta = h_0(x, y)$ [13].

При опускании начального возвышения поверхности моря, образуются две направленные волны повышения серповидной формы, распространяю-

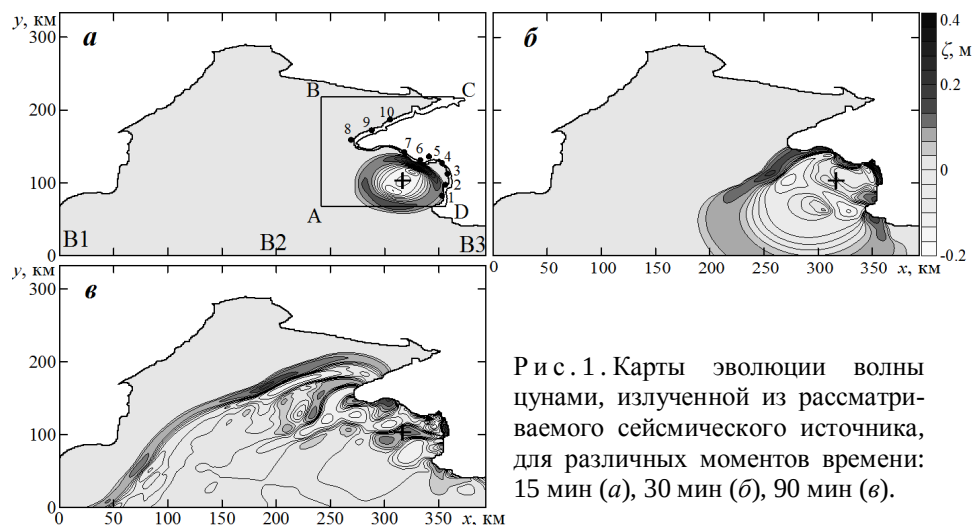


Рис. 1. Карты эволюции волны цунами, излученной из рассматриваемого сейсмического источника, для различных моментов времени: 15 мин (а), 30 мин (б), 90 мин (в).

щиеся в противоположных направлениях по нормали к большой оси очага цунами (рис.1, а). Волна, излученная в глубоководную часть бассейна, имеющая меньшую высоту, выходит через открытые границы B1, B2, B3 и, в последующем, не оказывает влияния на динамику волн в расчетной области (рис.1, б). Глубина северо-западного шельфа медленно убывает при подходе к берегу и по этой причине происходит концентрация энергии волн, распространяющихся к побережью в северо-западном направлении (рис.1, б, в). Наиболее интенсивная волна, распространяется к западному побережью Крымского п-ова (рис. 1, б). В силу уменьшения глубины бассейна волна подвержена значительной топографической трансформации в шельфовой зоне. При отражении волны от берега образуются захваченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль берега в противоположных направлениях от зоны наката волны на береговую границу [14]. Этими причинами объясняется сложный характер эволюции волн вдоль западного побережья Крымского п-ова (рис.1, в).

Рассмотрим амплитудные характеристики волн цунами у западного побережья Крымского п-ова. Экстремальные подъемы и понижения уровня моря во время цунами в 10 пунктах побережья представлены на рис.2. Во всех пунктах величины максимального заплеска и минимального понижения поверхности жидкости у берега не превышают по абсолютной величине начального подъема поверхности моря $a_0 = 1$ м. Наибольший заплеск 0,9125 м наблюдается в районе пгт.Новофедоровка (пункт 4, рис.1, а). В Евпатории (пункт 5, рис.1, а) он не превышает 60 см, на м.Тарханкут (пункт 8, рис.1, а) 15 см (рис.5). Наиболее интенсивные волны формируются у ближайших к очагу участков побережья.

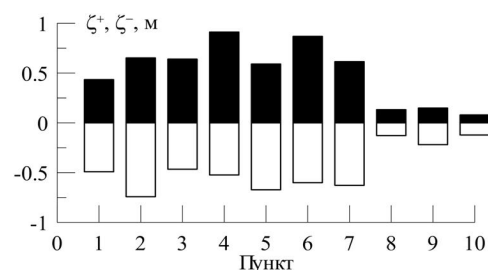


Рис. 2. Максимальные заплески (■) и минимальные понижения (□) уровня моря в 10 пунктах западного побережья Крымского п-ова за время 3 ч.

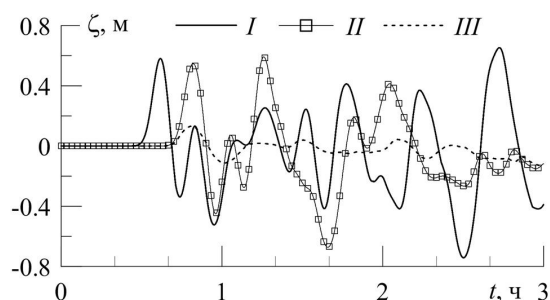


Рис. 3. Колебания линии уреза в трех пунктах западного побережья Крымского п-ова: кривая I – пункт 2; кривая II – пункт 5 (Евпатория); кривая III – пункт 8 (м.Тарханкут).

На рис.3 представлены колебания линии уреза в трех пунктах побережья. Первая волна цунами (волна повышения) не всегда является максимальной по высоте, а понижения поверхности моря в подошедшей к берегу системе волн могут быть даже более значительными, чем ее подъемы (рис.3, кривые I, II).

Выводы. Нелинейная модель длинных волн с квадратичным по скорости течения донным трением применена для численного анализа распространения длинных волн из эллиптического очага цунами в северо-западной части Черного моря. Для 10 пунктов западного побережья Крымского п-ова рассчитаны величины максимального вертикального заплеска и минимального понижения поверхности жидкости у берега.

Показано, что наиболее интенсивны волны распространяются к берегу в северо-западном и северо-восточном направлениях. У западного побережья Крымского п-ова вследствие рефракции и захвата волн шельфом при отражении от берега формируется неоднородная эволюционная картина, включающая области повышения и понижения уровня.

Анализ величин максимального заплеска и минимального понижения поверхности жидкости у берега вдоль северо-западного побережья Крымского п-ова показал, что во всех пунктах экстремальные подъемы и понижения уровня моря не превышают по абсолютной величине начального смещения морской поверхности в зоне подводного землетрясения. Наибольший заплеск (91 см) наблюдается в районе пгт.Новофедоровка. В Евпатории он не превышает 60 см.

Анализ колебаний линии уреза показал, что первая волна цунами (волна повышения) не всегда является максимальной по высоте, а волна понижения поверхности моря в подошедшей к берегу системе волн могут быть даже более значительной, чем волны повышения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Морской гидрофизический журнал.– 2007.– № 1.– С.21-31.
3. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал.– 1991.– № 3.– С.14-19.
4. Доценко С.Ф., Коновалов А.В. Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Морской гидрофизический журнал.– 1995.– № 6.– С.3-16.

5. *Зайцев А.И., Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г., Ялчинер А.С.* Моделирование цунами в Черном море // Известия Академии инженерных наук Российской Федерации. Прикладная математика и механика.– М.-Н. Новгород: НГТУ, 2002.– 3.– С.27-45.
6. *Доценко С.Ф.* Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал.– 2005.– № 3.– С.3-10.
7. *Куркин А.А.* Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне.– Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2005.– 330 с.
8. *Доценко С.Ф., Ингеров А.В.* Численный анализ распространения и усиления волн цунами на северо-западном шельфе Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2010.– № 5.– С.11-20.
9. *Oey L.-Y.* A wetting and drying scheme for POM // Ocean Model.– 2005.– v.9.– P.133-150.
10. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. и др.* Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии.– М.: ИФЗ РАН, 1993.– вып.1.– С.99-108.
11. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами.– Горький: ИПФ АН СССР, 1982.– 226 с.
12. *Соловьёв С.Л., Го Ч.Н.* Каталог цунами на западном побережье Тихого океана.– М.: Наука, 1974.– 310 с.
13. *Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Численное моделирование волн цунами.– Новосибирск: Наука, 1983.– 175 с.
14. *Доценко С.Ф., Санникова Н.К.В.* Анализ особенностей распространения цунами в шельфовой зоне бассейна // Морской гидрофизический журнал.– 2011.– № 6.– С.3-15.

Материал поступил в редакцию 15.07.2013

АНОТАЦІЯ Виконано чисельний аналіз розповсюдження довгих хвиль з еліптичного осередку цунамі у північно-західній частині Чорного моря. Для 10 пунктів західного узбережжя Криму розраховані величини максимальних вертикальних заплісків та екстремального пониження поверхні рідини біля берега. Показано, що найбільш інтенсивні хвилі формуються у найближчих до осередку ділянок узбережжя. Найбільші підйоми і пониження рівня моря не перевищують за абсолютною величиною початкового зсуву поверхні моря у осередку цунамі. Перша хвиля цунамі (хвиля підвищення) не завжди є максимальною за висотою, а пониження поверхні моря у системі хвиль, що підійшла до берега, можуть бути навіть більш значними за абсолютною величиною, ніж її підйоми.

ABSTRACT Numerical analysis of long wave propagation from the elliptical tsunami source in the north-west part of the Black Sea is carried out. For 10 points of the Crimea west coast maximum vertical run-ups and minimal draw-downs near the shore are calculated. It is shown that the most intensive waves are formed at the nearest section of the beach. Extreme level raises and absolute values of falls do not exceed initial sea surface elevation at the tsunami source. The first tsunami wave (wave of elevation) does not always have the maximum height, and sea surface lowering in the shore approaching wave system may be even greater in absolute value than its ups.