

С. Ф. Доценко, А. В. Ингеро́в

Численные оценки цунамиопасности Крымско-Кавказского побережья Черного моря

(Представлено академиком НАН Украины В. Н. Еремеевым)

Лінійну модель довгих хвиль було застосовано для оцінки параметрів хвиль цунамі уздовж узбережжя Південного берегу Криму, в прикерченській зоні та північно-східній частині Чорного моря. Дослідження проведено числовим методом для восьми можливих положень еліптичних зон генерації на материковому схилі басейну. Амплітудні характеристики цунамі розраховано у 27 пунктах чорноморського узбережжя України і Росії.

Известно 22 случая аномальных колебаний уровня Черного моря, которые можно отнести к явлению цунами [1–3]. Оно наблюдалось вдоль всего побережья и вызывалось землетрясениями в море и на суше. Для четырех землетрясений 20 в. цунами зарегистрированы инструментально [3]. Исторические свидетельства говорят в пользу того, что события в районах Сухуми (20 г.), Севастополя (103 г.), Варны (543 г.), пролива Босфор (557 г.), Евпатории (1341 г.), Фороса (1427 г.), на севере Турции (1598 г.) и у восточного побережья Черного моря (1909 г.) имели катастрофические проявления с высотами волн до 2–3 м [1, 2].

Снижению потерь от аномальных колебаний морской поверхности вдоль черноморского побережья должно способствовать создание региональной системы раннего предупреждения о цунами как элемента общеевропейской наблюдательной системы [4]. Решение о создании Межправительственной координационной группы по системе раннего предупреждения и уменьшения последствий цунами в Северо-Восточной Атлантике, Средиземном море и прилегающих морях (ICG/NEAMTWS), включая Черное море, принято в июне 2005 г. на Ассамблее МОК ЮНЕСКО в Париже как реакция мирового сообщества на катастрофическое цунами 26 декабря 2004 г. в Юго-Восточной Азии.

К сожалению, имеющиеся данные наблюдений не позволяют дать научно обоснованные оценки цунамиопасности побережья Черного моря. Подобный анализ требует разработки региональных численных моделей. Для Черного моря такие расчеты проводились в работах [5, 6]. Ниже предложена численная модель более высокого пространственного разрешения и представлены результаты более детального, чем ранее, анализа цунамиопасности участка морского побережья, включающего Крымский полуостров, прикерченский район и северо-восточное побережье Черного моря.

1. Рассматривается область Черного моря, показанная на рис. 1, ограниченная как береговыми (твердыми), так и свободными (жидкими) границами. Твердые границы — Южный берег Крыма и северо-восточная часть кавказского побережья. Область включает открытую часть моря с глубинами около 2000 м, материковый склон с глубинами от 2000 до 100 м и шельфовую зону с глубиной 100 м и менее. Выделенная часть моря является расчетной областью численной модели распространения цунами.

Батиметрия бассейна и рельеф местности задавались на сетке 1055×389 точек с пространственным шагом 500 м. На границах бассейна глубина составляла не менее 5 м.

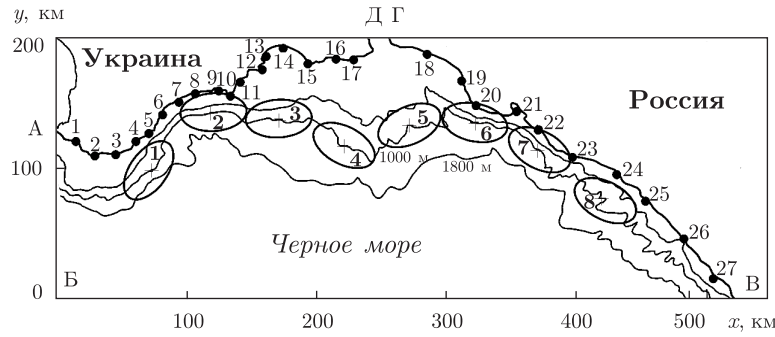


Рис. 1. Расчетная область АВВГДА эволюционной модели цунами, положение береговых пунктов (1 — 27) и эллиптических зон сейсмической генерации волн (1 — 8) на материковом склоне для магнитуды $M = 7$

Для описания двухмерного распространения цунами в бассейне переменной глубины использована линейная модель длинных поверхностных волн, что оправдано при глубинах более 5 м. Задача генерации волн заменена эволюционной, в которой реакция моря на подводное землетрясение задается в виде начального смещения поверхности моря, повторяющего остаточные смещения дна бассейна после землетрясения, при нулевом начальном поле скорости.

Движение жидкости описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + gH\nabla\zeta = 0, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

с условием скольжения:

$$V_n = 0 \quad (2)$$

на твердых береговых участках границы (ВГ, ДА), условием свободного выхода волн из расчетной области через жидкие участки границы (АБ, БВ, ГД):

$$\frac{\partial V_n}{\partial t} - C \frac{\partial V_n}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

и начальными условиями:

$$\mathbf{V} = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (4)$$

Здесь x, y — зональная и меридиональная координаты; t — время; $\mathbf{V}(x, y, t) = (Hu, Hv)$ — полный горизонтальный поток жидкости; (u, v) — проекции осредненной по глубине горизонтальной скорости течения; $\zeta(x, y, t)$ — смещение уровня моря от горизонтального положения; \mathbf{n} — внутренняя нормаль к границе расчетной области; $V_n = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$ — нормальная к границе области проекция полного потока жидкости; $\zeta_0(x, y)$ — начальное смещение уровня при подводном землетрясении; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$; $H(x, y)$ — глубина бассейна при невозмущенной свободной поверхности моря; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ — локальная скорость распространения линейных длинных волн; g — ускорение свободного падения.

Начальное смещение уровня моря, вызванное подводным землетрясением, задавалось сосредоточенным в эллиптической области с большой и малой осями L и W соответственно [7]. Длины осей эллиптического очага зависят от магнитуды землетрясения M . Для их

нахождения использованы полученные в работе [8] обобщенные эмпирические зависимости для евразийского региона:

$$L = W, \quad \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5), \quad (5)$$

$$\lg L = 0,6M - 2,5, \quad \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5), \quad (6)$$

где L и W задаются в километрах. Для слабых землетрясений очаги цунами являются круговыми, при $M > 6,5$ — эллиптическими.

Максимальное смещение (в м) поверхности моря a_0 в зоне подводного землетрясения можно задать, используя эмпирическую формулу [9]:

$$\lg a_0 = 0,8M - 5,6 \quad (6,7 \leq M \leq 8,5), \quad (7)$$

найденную, по данным о цунамигенных землетрясениях, в Тихом океане.

Расчет начального смещения поверхности моря в эллиптической области с центром в точке (x_0, y_0) производился по формуле:

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2 \frac{\pi r}{2} \quad (r \leq 1), \quad \zeta_0 = 0 \quad (r > 1), \quad (8)$$

где $r = 2\sqrt{x_1^2/L^2 + y_1^2/W^2}$, $x_1 = (x - x_0) \cos \alpha + (y - y_0) \sin \alpha$, $y_1 = (y - y_0) \cos \alpha - (x - x_0) \sin \alpha$; α — угол наклона большой оси эллипса к оси x , отсчитываемый против часовой стрелки.

Задача (1)–(4) решалась методом конечных разностей с использованием явно-неявной одношаговой по времени схемы на разнесенных для проекций скорости и смещений поверхности моря сетках с шагами $\Delta x = \Delta y = 500$ м, соответствующими заданию батиметрии бассейна. По результатам вычислительных экспериментов, шаг по времени был принят равным 1 с.

2. Расчеты волн цунами выполнены для восьми эллиптических очагов (см. рис. 1). Их центры расположены на изобате 1000 м материкового склона, большие оси ориентированы вдоль изобаты, что характерно для цунамигенных подводных землетрясений [10]. Для расчета параметров начального сейсмического возмущения моря использовались формулы (5)–(8). Очаги покрывают Южнобережно(Крымско)-Кавказскую зону повышенной сейсмической активности [11, 12], которая создает наибольшую потенциальную цунамиопасность для Крымского полуострова и северо-восточного побережья Черного моря. Южнобережная сейсмоактивная зона Черноморской впадины характеризуется наибольшим выделением энергии в верхнем 15-километровом слое литосферы и значительным вкладом землетрясений с магнитудами $M \geq 5$ [11, 12]. Очаг 1 близок к зоне сейсмической генерации цунами 26 июня 1927 г.

Характеристики волн цунами для диапазона магнитуд подводных землетрясений $M = 6,0$ – $7,5$ анализировались по расчетным мареограммам в 27 пунктах побережья моря, показанных на рис. 1, в частности, пункт 1 соответствует Балаклаве, 4 — Ялте, 6 — Алуште, 9 — Судаку, 13 — Феодосии, 19 — Анапе, 21 — Новороссийску, 22 — Геленджику, 25 — Туапсе, 27 — Сочи.

При опускании начального возвышения поверхности моря (8) образуются две направленные волны поднятия серповидной формы, распространяющиеся в противоположных направлениях по нормали к большой оси очага цунами (рис. 2). Волна, излученная в глубоко-

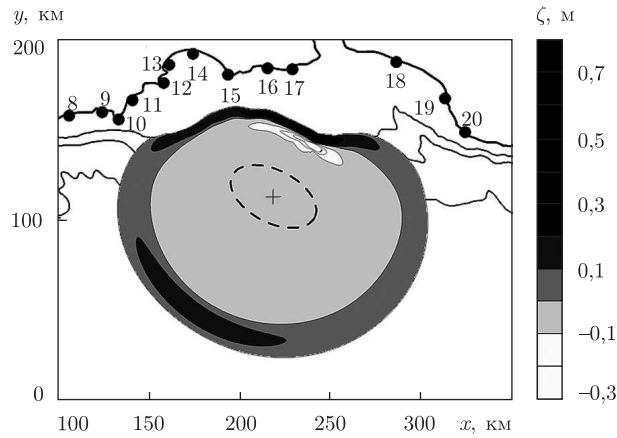


Рис. 2. Пространственное распределение смещений поверхности моря в волне цунами, излученной из эллиптического очага 4 при $M = 7$ (показан штриховой линией) в момент времени $t = 10$ мин

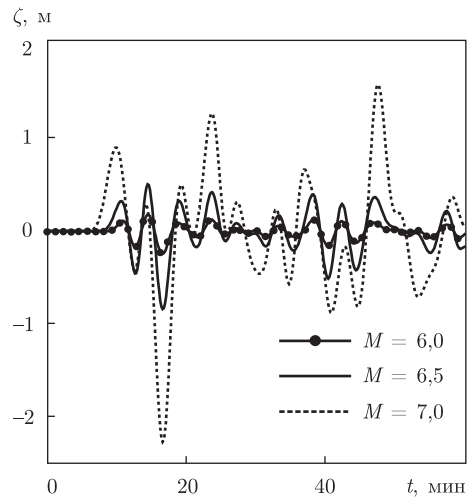


Рис. 3. Колебания уровня моря в районе Ялты (береговой пункт 4), вызванные цунами при землетрясениях различной магнитуды в очаге 1

водную часть бассейна, выходит через открытые границы АБ и БВ (см. рис. 1) и в последующем не оказывает влияния на динамику волн в расчетной области. Волна, распространяющаяся к береговой черте, усиливается по мере распространения к берегу и подвержена значительной топографической трансформации (рефракции) в шельфовой зоне. Это проявляется в преобразовании серповидного гребня волны в прямолинейный, вытянутый вдоль изобат. При отражении волны от берега образуются захваченные шельфом знакопеременные волны, распространяющиеся вдоль берега в противоположных направлениях от зоны наката волны на береговую границу.

Интенсивность цунами в заданном пункте побережья зависит от положения очага цунами и магнитуды землетрясения. Вычислительные эксперименты показали, что во всех рассматриваемых береговых пунктах при $a_0 > 0$ приход первой волны цунами проявляется в повышении уровня моря. Характерные мареограммы для пункта 4 (Ялта), соответствующие подводным землетрясениям в очаге 1 различной магнитуды, показаны на рис. 3.

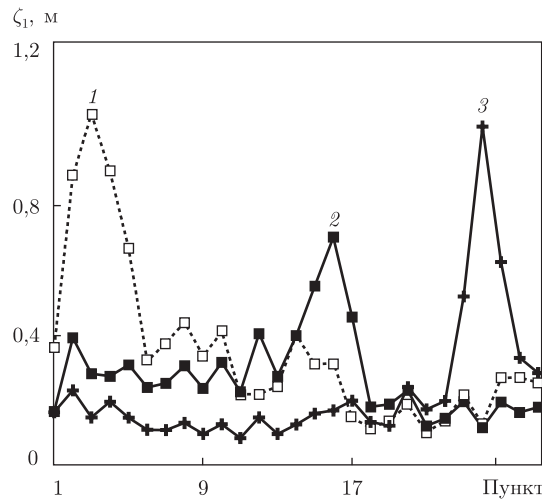


Рис. 4. Распределения высоты первого гребня волны цунами вдоль побережья Черного моря для зон сейсмической генерации 1, 4 и 8 (кривые 1, 2 и 3 соответственно) при подводных землетрясениях с магнитудой $M = 7$

С ростом магнитуды землетрясения амплитуда волны в прибрежной зоне возрастает за счет увеличения a_0 , L и W (см. формулы (5)–(7)). Даже в тех случаях, когда начальная высота подъема поверхности моря a_0 в эпицентре одинаковая, усиление цунами происходит за счет увеличения горизонтальных размеров очага с ростом магнитуды M . Первая волна цунами (волна повышения), как показано на рис. 3, не всегда является максимальной по высоте, а понижения поверхности моря в подошедшей к берегу системе волн могут быть даже более значительными, чем его подъемы. Этот эффект ярко выражен при больших магнитудах землетрясений. Периоды колебаний уровня для приведенных мареограмм составляют 5–15 мин, что согласуется с общепринятыми оценками для периодов волн цунами [7]. При увеличении магнитуды землетрясения M характерные периоды колебаний морской поверхности изменяются мало, но происходит уменьшение относительного вклада высокочастотных составляющих.

Важная характеристика черноморских цунами — время распространения волн от зоны генерации до берега. Для мареограмм на рис. 3 время распространения от очага 1 до Ялты составляет менее 10 мин. При магнитуде $M = 7$ максимальная высота волн на побережье (возвышение гребня над предшествующей подошвой волны) может достигать 2,78 м. С уверенностью можно говорить о высокой опасности такого цунами для прибрежной зоны южного побережья Крымского полуострова.

Для интегральной оценки уровня опасности цунами вдоль побережья моря необходим анализ распределений высот волн цунами вдоль твердых границ расчетной области при различных положениях сейсмического источника. Количественную оценку цунамиопасности в рамках рассматриваемой модели можно проводить, анализируя различные характеристики волн, численные значения которых зависят от длины рассматриваемого временного ряда колебаний свободной поверхности моря.

Некоторые закономерности распределений амплитудных характеристик волн цунами вдоль побережья Черного моря иллюстрирует рис. 4. На нем даны высоты первых гребней длинных волн ζ_1 в 27 пунктах побережья (см. рис. 1) для трех положений сейсмического источника на материковом склоне. Распределения ζ_1 вдоль берега крайне неравномерны, но

обладают ярко выраженной закономерностью: максимальные подъемы уровня моря наблюдаются, как правило, в ближайших к источнику цунами точках побережья. Выполненные расчеты подтвердили возможность существенного усиления волн у побережья. Так, в ряде случаев подъем поверхности моря у границы бассейна превышал его начальное значение в зоне генерации в 1,9–2,3 раза. По оценкам максимальных подъемов уровня моря во время цунами, излученных из рассмотренных очагов, определены точки побережья, для которых при магнитуде $M \geq 7$ подъем поверхности моря превышает 1,5 м. К ним относятся пункты 4 (Ялта), 8, 10 (мыс Меганом), 16, 20, 22 (Геленджик) и 24 (Джубга). Для пунктов 8, 20, 22 и 24 подъем уровня моря при $M = 7$ достигает 2,0–2,4 м, что в немалой степени обусловлено близостью к этим пунктам зон генерации.

3. Подведем итог выполненного исследования. Линейная модель длинных волн применена для численного анализа цунамиопасности южного побережья Крымского полуострова, прикерченской зоны и северо-восточной части Черного моря. Расчеты цунами на сетке с шагом 500 м выполнены для восьми эллиптических очагов в Южнобережно(Крымско)-Кавказской зоне повышенной сейсмической активности. Анализ колебаний уровня моря проведен для 27 пунктов побережья.

Благодаря рефракции и асимметрии зон сейсмической генерации, в процессе эволюции начального возмущения моря формируется направленная к берегу волна цунами. В отдельных точках побережья подъем поверхности моря может в два и более раз превышать ее начальное смещение в очаге цунами. Чаще всего цунами наибольшей высоты образуются на ближайшем к очагу участке берега. По полученным оценкам весьма велика вероятность образования опасных цунами при подводных землетрясениях с магнитудами $M \geq 7$.

Время распространения волн из зон генерации до ближайших участков берега, например до Ялты, не превышает 10 мин. Малая заблаговременность события не позволяет реализовать оперативные меры по защите населения и береговой инфраструктуры от сильных цунами на ближайших к зоне генерации участках побережья. Необходима разработка превентивных мер по снижению негативных последствий возможных цунами для населения и хозяйственных объектов в прибрежной зоне Черного моря.

1. *Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П.* Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.
2. *Никонов А. А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. АН. Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 86–96.
3. *Доценко С. Ф., Ингеров А. В.* Характеристики черноморских цунами по данным измерений // Мор. гидрофиз. журн. – 2007. – № 1. – С. 21–31.
4. *Доценко С. Ф., Еремеев В. Н.* Оценки необходимости и возможности раннего предупреждения о цунами на побережье Черного моря // Там же. – 2008. – № 5. – С. 57–66.
5. *Доценко С. Ф., Коновалов А. В.* Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // Там же. – 1995. – № 6. – С. 3–16.
6. *Yalçiner A., Pelinovsky E., Talipova T. et al.* Tsunami in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // J. Geophys. Res. – 2004. – **109**, No C12023. – 13 p.
7. *Мурти Т. С.* Сейсмические морские волны цунами. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 447 с.
8. *Уломов В. И., Полякова Т. П., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В.* Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – Вып. 1. – Москва: Ин-т физики Земли РАН, 1993. – С. 99–108.
9. *Пелиновский Е. Н.* Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.
10. *Соловьев С. Л., Го Ч. Н.* Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. – Москва: Наука, 1974. – 310 с.
11. *Чекунов А. В.* Сейсмическая эмиссия и разноэтажная тектоника в Черноморском регионе // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1990. – № 11. – С. 27–31.

12. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофиз. журн. – 1991. – № 3. – С. 14–19.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 10.11.2008

S. F. Dotsenko, A. V. Ingerov

Numerical estimates of the tsunami hazard along the Crimean-Caucasian coast of the Black Sea

The linear shallow-water model is applied to estimate tsunami parameters along the coast of the South Crimea, in the zone near the Kerch Strait, and in the north-eastern area of the Black Sea. The investigation is carried out numerically for eight possible positions of elliptic zones of generation on the marginal slope of the basin. Amplitude characteristics of a tsunami were estimated at 27 sites of the Black Sea coast of Ukraine and Russia.