

С. Ф. Доценко, А. В. Ингеро

Численный анализ цунамиопасности побережья Азовского моря

(Представлено академиком НАН Украины В. Н. Еремеевым)

У рамках нелінійної теорії довгих хвиль виконано розрахунки поширення цунамі в Азовському морі. Розглянуто чотири кругових джерела цунамі сейсмічного походження в південній частині моря. Зони підвищеної хвильової енергії виникають уздовж північного узбережжя — морська коса та у південно-східній частині басейну — мілина. Зроблено висновок про низький рівень цунамінебезпеки узбережжя Азовського моря.

О цунами сейсмического происхождения в Азовском море фактически ничего не известно [1]. Во многом это связано с практической асейсмичностью этого региона. Эпицентры относительно слабых исторических подводных землетрясений сосредоточены в южной и юго-западной частях моря [2]. Наиболее сильные землетрясения зафиксированы в 1978 и 1990 гг. в северной и южной частях моря. Глубины очагов составили около 33 км, а магнитуды не превысили 4,5.

Азово-Черноморский район является зоной высокой циклонической активности атмосферы, что не позволяет исключить возможность генерации здесь сильных метеоцунами, проявляющихся в затоплении прибрежных территорий и в сильных колебаниях уровня моря у берега. При определенных направлениях и длительностях ветра возможно возбуждение значительных (3 — 5 м) подъемов и понижений уровня Азовского моря у берега, что подтверждено результатами численного моделирования [3, 4].

Вопрос об эффективности генерации цунами в Азовском море сейсмическими источниками остается актуальным и малоизученным [1]. Математическое моделирование методом конечных элементов распространения волн типа цунами в Азовском море, вызванных начальными смещениями свободной поверхности, выполнено в статье [5].

Ниже приведены результаты численного моделирования особенностей распространения волн цунами и их высот вдоль побережья Азовского моря. Для различных магнитуд сейсмических источников рассмотрено распространение волн цунами из четырех гипотетических круговых очагов в южной части бассейна. Расчеты выполнены на сетке с разрешением 500 м. Проведен анализ максимальных повышений и понижений уровня моря у берега при подводных землетрясениях различной магнитуды.

1. Рассматривается бассейн переменной глубины, соответствующий Азовскому морю (рис. 1). Его рельеф дна достаточно прост. При удалении от берега наблюдается медленное увеличение глубины, зафиксированной в центральной части моря на отметке 13,5 м. В Таганрогском заливе глубина увеличивается от устья Дона (2–3 м) по направлению к открытой части моря, достигая 8–9 м на границе залив — море.

Для описания распространения волн цунами была использована нелинейная модель длинных волн (в полных потоках) с учетом квадратичного по скорости течения донного трения [6]. Реакция моря на подводное землетрясение задается в виде начального смещения поверхности моря при нулевом начальном поле скорости.

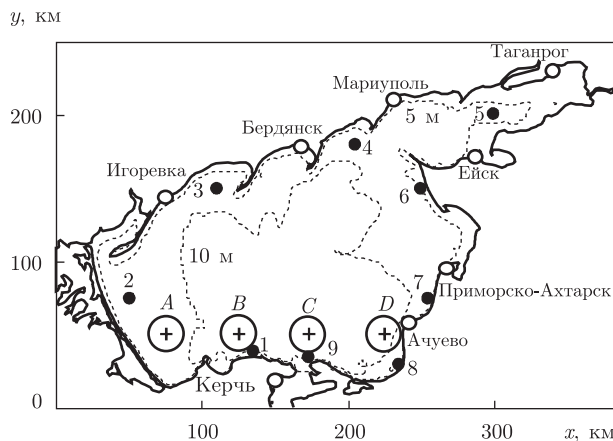


Рис. 1. Расчетная область с указанием положений очагов цунами A, B, C, D и точек 1–9 регистрации расчетных колебаний уровня Азовского моря

Движение жидкости описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gk^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

с условием скольжения на твердой береговой границе, означающим равенство нулю нормальной к границе проекции полного потока жидкости, т. е.

$$V_n = 0, \quad (4)$$

и условием свободного выхода линейных волн из Азовского моря в Керченский пролив, а именно:

$$\frac{\partial V}{\partial t} - C \frac{\partial V}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Начальные условия задавались таким образом:

$$U = V = 0, \quad \zeta = \zeta_0(x, y) \quad (t = 0). \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6) 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; $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$ — динамическая глубина жидкости; $H(x, y)$ — глубина бассейна; $C = \sqrt{gH(x, y)}$ — локальная скорость распространения длинных волн; g — ускорение свободного падения; $k = 0,013$ — параметр Маннинга.

Глубина бассейна задавалась на прямоугольной сетке 695×501 узлов с пространственным шагом 500 м. Расчетная область ограничена как твердой береговой границей, так и жидким участком, соответствующим входу в Керченский пролив.

Решение задачи (1)–(6) выполнено методом конечных разностей на разнесенных для U , V и ζ прямоугольных сетках (сетка С Аракавы) с шагами $\Delta x = \Delta y = 500$ м. На границе расчетной области $H = 1$ м, на входе в Керченский пролив $H \approx 5$ м в соответствии с заданной сеткой глубин. Программно реализована явно-неявная одношаговая по времени схема расчета волн [7]. Шаг интегрирования по времени $\Delta t = 5$ с выбран путем численных экспериментов.

Начальное смещение поверхности моря в круговой области радиуса R_0 с центром в точке (x_0, y_0) задавалось в виде

$$\zeta_0 = a_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_0}\right) \quad \text{при } r \leq R_0, \quad \zeta_0 = 0 \quad \text{при } r > R_0, \quad (7)$$

где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$. Радиус R_0 выражен через большую L и малую W оси эллиптической зоны генерации, согласно формуле $R_0 = \sqrt{LW}/2$ (равенство площадей эллипса и круга). Оси L и W (в км) определяли в зависимости от магнитуды землетрясения (M) по эмпирическим формулам

$$L = W, \quad \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5), \quad (8)$$

$$\lg L = 0,6M - 2,5, \quad \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5) \quad (9)$$

для евразийского региона [8].

Максимальное смещение (в м) поверхности моря a_0 в зоне подводного землетрясения рассчитывали по формуле

$$\lg a_0 = 0,8M - 5,6 \quad (6,7 \leq M \leq 8,5) \quad (10)$$

для цунамигенных землетрясений в Тихом океане [9]. Для $M = 6$ и $M = 7$ вычислены с применением формул (8)–(10) значения $R_0 = 9,5$ км, $a_0 = 0,16$ м и $R_0 = 19,2$ км, $a_0 = 1$ м соответственно (при $M = 6$ для нахождения a_0 производилась экстраполяция по формуле (10)).

2. Анализ цунами включал расчет распространения пространственной волны цунами. Распределения $\zeta(x, y, t)$ в различные моменты времени зависят от положения и магнитуды очага цунами, особенностей рельефа дна и отражений от границы бассейна. Для линейной модели высоты поверхностных волн пропорциональны амплитуде a_0 начального смещения уровня моря, для нелинейной — они зависят от a_0 нелинейным образом.

Численный анализ характеристик цунами выполнен для четырех круговых очагов цунами A , B , C и D в южной части Азовского моря (см. рис. 1). Помимо пространственной структуры волнового поля, анализировались расчетные мареограммы цунами в точках бассейна 1–9.

На рис. 2 показано распространение волн цунами в Азовском море из очага D на внешней границе Темрюкского залива. При опускании центральной части начального поднятия свободной поверхности ζ_0 формируется знакопеременная кольцевая волна (см. a на рис. 2). Волна, распространяющаяся на восток, отражается от берега Темрюкского залива (см. b)

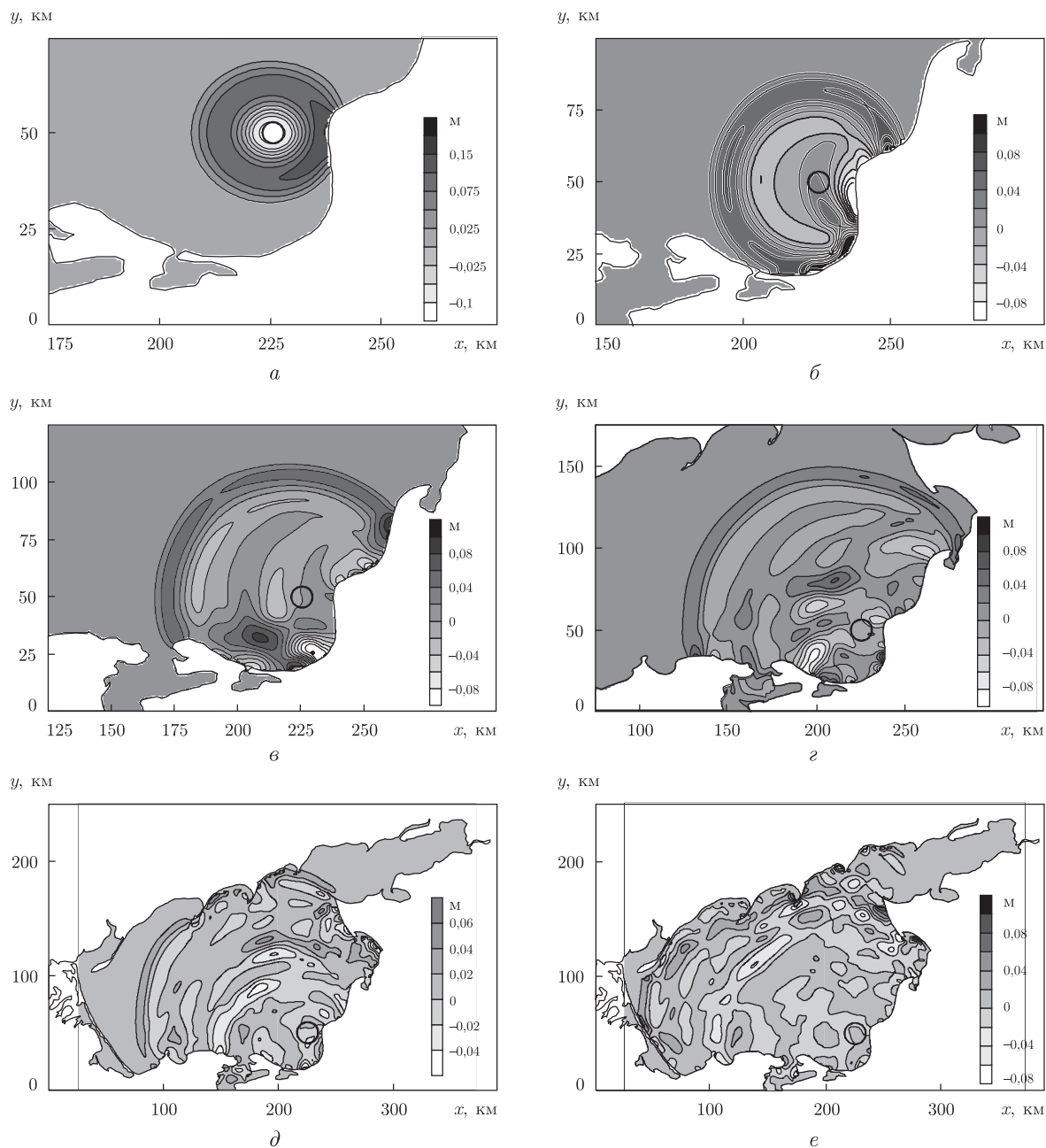


Рис. 2. Изменение по времени структуры волны цунами, излученной из очага D при землетрясении с $M = 6,5$:

$a - t = 15$ мин; $b - t = 45$ мин; $c - t = 80$ мин; $z - t = 150$ мин; $d - t = 230$ мин; $e - t = 300$ мин

и изменяет свое направление на западное. Благодаря интерференции прямых и отраженных волн в области за кольцевой головной волной формируется система повышений и понижений уровня моря (см. b, z). В последующем область, охваченная цунами, расширяется (см. d), происходит отражение волн от северного берега моря, охватывающее в результате колебания уровня всю акваторию моря, формируя достаточно хаотичное волновое поле (см. e). Некоторое локальное усиление волн происходит в окрестностях нерегулярностей

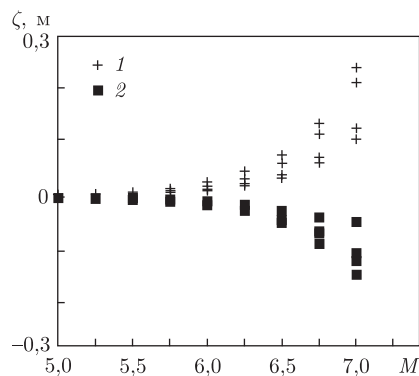


Рис. 3. Зависимость экстремальных повышений (1) и понижений (2) уровня моря в пункте 9 от магнитуды подводного землетрясения, найденная по реализациям длиной 14 ч

береговой черты (песчаных кос на северо-восточном берегу моря) и в районах моря, прилегающих к Темрюку и Приморско-Ахтарску.

Расчитанные в точках 1–9 мареограммы позволяют оценить экстремальные повышения и понижения уровня Азовского моря в различных точках побережья. Экстремальные смещения уровня моря для магнитуд подводных землетрясений $M = 5–7$ в точке входа в Керченский пролив со стороны Азовского моря иллюстрирует рис. 3. Они определялись по временным реализациям длиной 14 ч. Увеличение абсолютных значений экстремальных смещений уровня с ростом магнитуды по показательному закону — следствие монотонного изменения амплитуды начального смещения $a_0(M)$, согласно формуле (7).

Наиболее интенсивные волны наблюдаются на ближайшем к очагу цунами участке берега. Даже при завышенной для бассейна магнитуде, равной 7, подводного землетрясения не происходит возбуждения интенсивных колебаний свободной поверхности моря. Так, экстремальный подъем уровня моря при цунами от очагов $A–D$ (см. рис. 1) с $M = 7$ составил $0,41a_0$, экстремальное понижение уровня равно $-0,35a_0$.

Таганрогский залив — зона интенсивных сгонно-нагонных колебаний уровня моря, размах которых может достигать несколько метров. Подобные события сопровождаются ощутимыми экономическими потерями и негативными последствиями для экологии региона [10]. По сравнению с ними вклад возможных волн цунами существенно меньше. Усиления волн цунами, излученных из всех четырех зон генерации, в Таганрогском заливе не происходит ($\max |\zeta/a_0| = 0,09$ при $M = 7$ в пункте 5), что согласуется с расчетами эволюции начального поднятия уровня в прикерченской зоне Азовского моря [5].

3. В результате выполненного исследования можно сформулировать основные выводы.

Нелинейная модель длинных волн с учетом донного трения применена для численного анализа особенностей эволюции волн цунами в Азовском море на сетке с шагом 500 м. Для магнитуд землетрясений, равных 5–7, рассмотрено четыре положения круговой зоны генерации в южной части бассейна.

Показано, что только на начальном этапе эволюции волн можно выделить доминирующие направления передачи волновой энергии, но со временем, благодаря интерференции прямых и отраженных от берегов волн, формируются колебания уровня моря в виде достаточно хаотического волнового поля. Небольшие области повышенной волновой активности возникают в зонах нерегулярности береговой черты, в частности вдоль северного побережья — песчаные косы и в юго-восточной части моря — отмели.

Вызванные цунами экстремальные подъемы и понижения уровня моря в различных точках побережья Азовского моря не превышают по абсолютной величине 41% от амплитуды a_0 начального смещения свободной поверхности жидкости (при $M \leq 7$). Наибольшие подъемы уровня вызываются волнами, излученными из ближайшего к точке регистрации очага цунами. Можно утверждать, что цунамиопасность побережья Азовского моря в целом невысока, а генерация сильных цунами подводными землетрясениями в регионе маловероятна.

По результатам вычислительных экспериментов учет в модели донного трения вызывает уменьшение максимальных подъемов и понижений уровня. Вклад нелинейности в волновое поле не превышает 5–7% для экстремальных смещений уровня моря. Донное трение несколько уменьшает экстремальные смещения уровня и гасит высокочастотные колебания поверхности жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины в рамках научного украинско-российского проекта № 05-05-10 (У) (Постановление Президиума НАН Украины от 26.05.2010 № 155).

1. Никонов А. А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. АН. Физика Земли. – 1997. – **33**, № 1. – С. 86–96.
2. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофиз. журн. – 1991. – № 3. – С. 14–19.
3. Иванов В. А., Фомин В. В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2008. – 363 с.
4. Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2010. – 178 с.
5. Букатов А. Е., Завьялов Д. Д. Эволюция начального смещения свободной поверхности в Азовском море // Мор. гидрофиз. журн. – 2008. – № 1. – С. 3–11.
6. Liu P. L.-F., Cho Y.-S., Briggs M. J. et al. Runup of solitary waves on a circular island // J. Fluid Mech. – 1995. – **302**. – P. 259–285.
7. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1968. – 300 с.
8. Уломов В. И., Полякова Т. П., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. и др. 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. Гидродинамика волн цунами. – Новгород: Ин-т прикл. физики РАН, 1996. – 276 с.
10. Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 17.08.2010

S. F. Dotsenko, A. V. Ingerov

Numerical analysis of the tsunami danger of the Azov Sea beach

In the framework of a nonlinear theory of long waves, the numerical evaluation of tsunami propagation in the Sea of Azov is carried out. Four circular tsunami origins of seismic nature in the southern part of the sea are considered. Areas of higher wave energy are appeared near the sand bars of the northern coast and shoals in the south-eastern part of the basin. It is concluded that the tsunami damage on the coast of the Sea of Azov is low.