

## Численный анализ распространения и усиления волн цунами сейсмической генерации в Азовском море

Выполнен численный анализ эволюции цунами в Азовском море. Расчеты на сетке с шагом 500 м для магнитуд 6 – 7 подводных землетрясений проведены для 18 круговых зон генерации, покрывающих практически всю акваторию моря. Показано, что в результате отражений от берегов формируются колебания уровня, напоминающие волновую толчею. Небольшие области повышенной волновой активности возникают в зонах нерегулярности береговой черты северного побережья и отмелей в юго-восточной части бассейна. На основе найденных значений экстремальных подъемов и понижений уровня моря можно говорить о низкой цунамиопасности побережья Азовского моря.

**Ключевые слова:** Азовское море, цунами, уравнения длинных волн, численное моделирование, амплитудные характеристики волн.

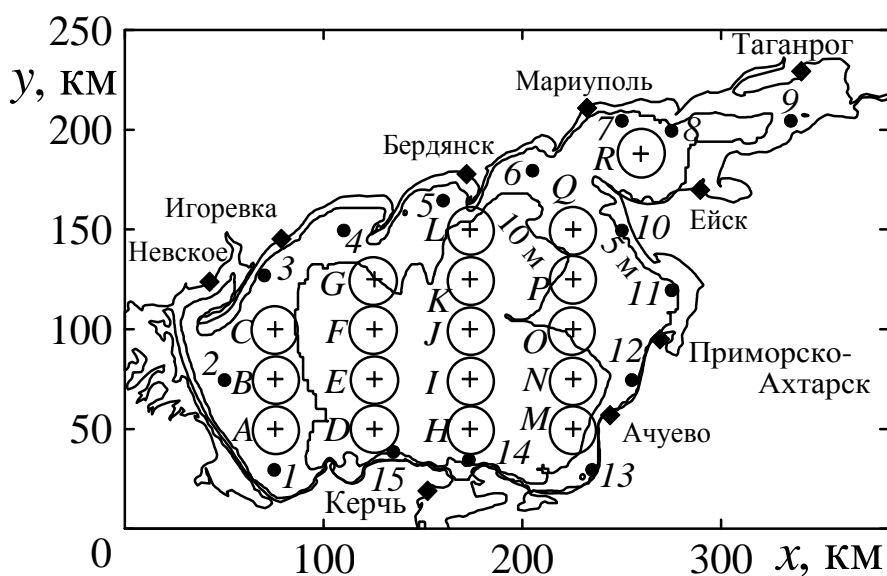
**Введение.** О цунами сейсмогенной природы в Азовском море практически ничего не известно [1]. В значительной степени это связано со слабой сейсмичностью этого региона. Эпицентры исторических относительно слабых подводных землетрясений сосредоточены в его южной и юго-западной частях [2]. Наиболее сильные 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.

В то же время 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 у берега. Во всяком случае, возможно возбуждение полей ветра значительных (3 – 5 м) подъемов и понижений уровня Азовского моря в прибрежной зоне при определенных направлениях и длительности ветра, что подтверждено результатами численного моделирования [3, 4]. Тем не менее вопрос об эффективности генерации цунами в Азовском море сейсмическими источниками остается актуальным и мало исследованным [1]. Численное моделирование методом конечных элементов распространения волн типа цунами в Азовском море, вызванных начальными смещениями свободной поверхности, выполнено в работе [5].

Ниже изложены результаты численного моделирования закономерностей распространения волн цунами в Азовском море и высот волн цунами вдоль морского побережья. Для различных магнитуд сейсмических источников рассмотрено распространение волн цунами из нескольких гипотетических круговых очагов генерации, покрывающих практически всю акваторию Азовского моря. Расчеты выполнены на прямоугольной сетке с пространственным

разрешением 500 м. Также проведен анализ максимальных подъемов и понижений уровня у берега, вызванных подводными землетрясениями различной магнитуды.

**Математическая модель.** Рассматривается ограниченный бассейн переменной глубины, соответствующий Азовскому морю (рис. 1). Рельеф дна этого бассейна достаточно прост. При удалении от берега глубина моря медленно и плавно нарастает, достигая в центральной части 13,5 м. Основная площадь морского дна характеризуется глубинами 5 – 13 м. Область наибольших глубин находится в центре моря. Распределение глубин близко к осесимметричному, но осесимметричность изобат нарушается их небольшой вытянутостью на северо-востоке в сторону Таганрогского залива. В Таганрогском заливе глубина бассейна увеличивается от устья Дона (2 – 3 м) по направлению к открытой части моря, достигая на границе залив – море 8 – 9 м.



**Р и с. 1.** Азовское море. Буквами *A, B, ..., R* отмечены круговые очаги генерации цунами радиусом 12,56 км при магнитуде  $M = 6,5$ , использованные в вычислительных экспериментах. Цифрами 1 – 15 обозначены точки бассейна, в которых рассчитывались колебания уровня моря

Глубина бассейна задавалась на прямоугольной сетке  $695 \times 501$  узел с пространственным шагом 500 м. Расчетная область ограничена как твердой береговой границей, так и жидким участком границы, совпадающим с входом в Керченский пролив.

Для описания процесса распространения пространственных волн цунами воспользуемся нелинейной эволюционной моделью поверхностных длинных волн с учетом квадратичного по скорости течения донного трения. Реакцию жидкости на подводное землетрясение будем моделировать начальным возмущением морской среды в виде смещения свободной поверхности жидкости при нулевом поле скорости.

В рамках этой модели, записанной в полных потоках, движение жидкости описывается системой трех уравнений [6]

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

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

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

На твердой береговой границе задается условие скольжения, означающее равенство нулю нормальной к границе проекции вектора скорости течения, то есть

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0. \quad (4)$$

На входе в Керченский пролив использовано условие свободного выхода линейных волн из Азовского моря

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

Начальные условия задачи задавались в виде

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

В начально-краевой задаче (1) – (6) переменные  $x, y$  – зональная и меридиональная координаты;  $t$  – время;  $\mathbf{V} = (U, V)(x, y, t)$  – вектор полного горизонтального потока жидкости с проекциями  $U$  и  $V$  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;  $D = H(x, y) + \zeta(x, y, t) > 0$  – полная (динамическая) глубина жидкости;  $\mathbf{n}$  – внутренняя нормаль к границе расчетной области;  $C = \sqrt{gH(x, y)}$  – локальная скорость распространения длинных волн;  $g$  – ускорение свободного падения;  $k = 0,013$  – параметр Маннинга.

Задача (1) – (6) решалась методом конечных разностей на разнесенных для  $U, V$  и  $\zeta$  прямоугольных сетках (сетка  $C$  Аракавы) с пространственным шагом  $\Delta x = \Delta y = 500$  м. На границе расчетной области глубина бассейна  $H$  равна 1 м, исключая вход в Керченский пролив, где она бралась равной около 5 м в соответствии с заданной сеткой глубин. Применена явно-неявная одношаговая по времени схема [7]. По результатам численных экспериментов шаг интегрирования по времени выбран равным 5 с.

Начальное смещение свободной поверхности, вызванное подводным землетрясением, задавалось сосредоточенным в круговой области радиусом  $R_0$ . Он рассчитывался по большой  $L$  и малой  $W$  осям эллиптического очага

цунами по формуле  $R_0 = \sqrt{LW} / 2$  (эквивалентный эллиптическому круговой очаг). Оси эллиптической зоны генерации  $L$  и  $W$  находились, как функции магнитуды землетрясения  $M$ , по эмпирическим формулам, полученным для евразийского региона [8]:

$$L = W, \lg L = 0,24M - 0,16 \quad (M < 6,5), \quad (7)$$

$$\lg L = 0,6M - 2,5, \lg W = 0,15M + 0,42 \quad (M \geq 6,5), \quad (8)$$

где  $L$  и  $W$  задаются в километрах. Для определения максимального смещения поверхности моря  $a_0$  (м) в зоне подводного землетрясения использована полуэмпирическая формула

$$\lg a_0 = 0,8M - 5,6 \quad (6,7 \leq M \leq 8,5), \quad (9)$$

полученная по данным о цунамигенных землетрясениях в Тихом океане [9].

Начальное возмущение свободной поверхности моря в круговой области бассейна радиусом  $R_0$  с центром в точке  $(x_0, y_0)$  задавалось в виде

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

где  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ . Значения  $R_0$  и  $a_0$  даны в таблице.

**Значения  $R_0 = 0,5\sqrt{LW}$  и  $a_0$  для различных магнитуд подводных землетрясений, найденные с использованием формул (7) – (9)**

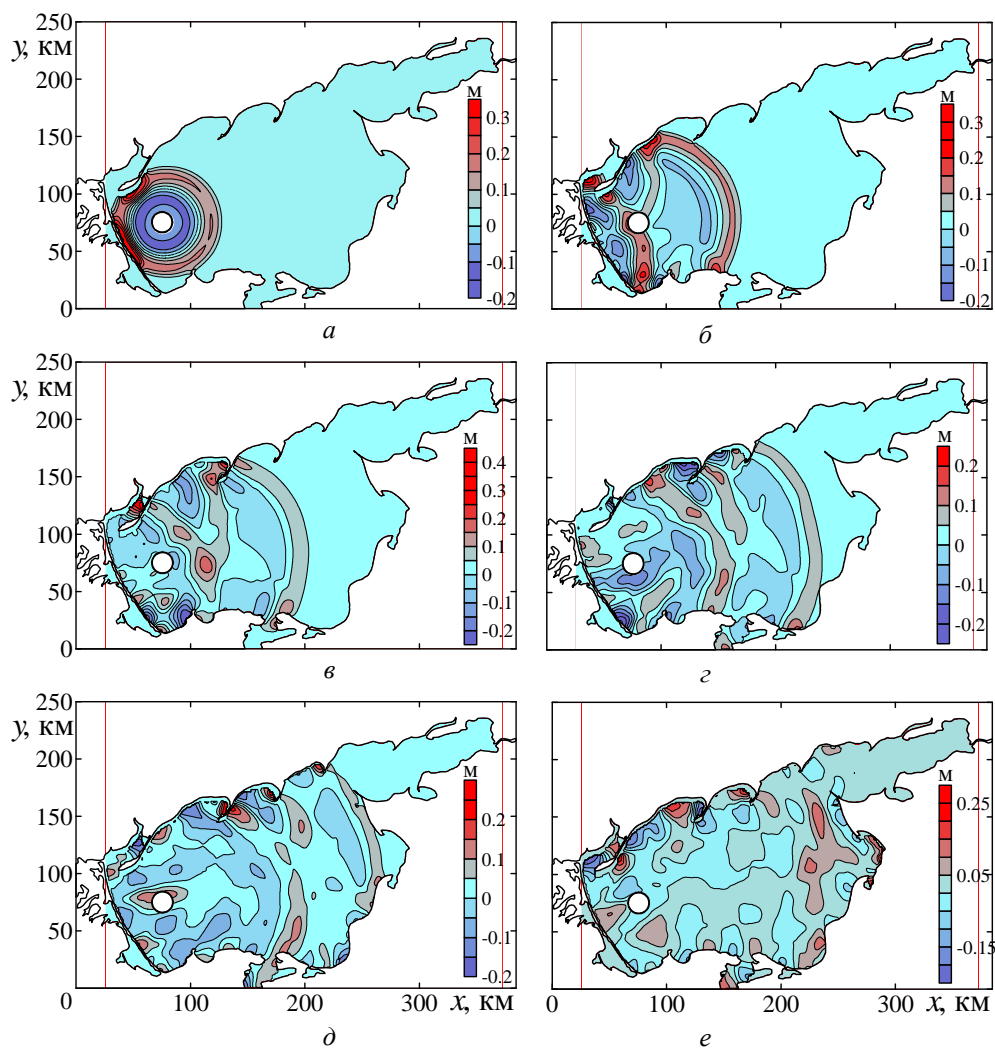
$M$	$R_0$ , км	$a_0$ , м
6	9,53	0,16
6,25	10,94	0,25
6,5	12,56	0,40
6,75	15,50	0,63
7	19,23	1,00

**Результаты численного анализа.** Анализ включал расчет пространственной структуры волн цунами в различные моменты времени. Распределение  $\zeta(x, y, t)$  существенно зависит от особенностей рельефа дна бассейна, конфигурации берегов, положения и магнитуды очага цунами. Для линейной модели высоты поверхностных волн пропорциональны амплитуде  $a_0$  начального смещения уровня моря.

Численный анализ характеристик волн выполнен для 18 круговых очагов цунами  $A, B, \dots, R$  различной магнитуды, достаточно равномерно распределенных по акватории Азовского моря (рис. 1). Характеристики волн анализировались в точках бассейна 1 – 15.

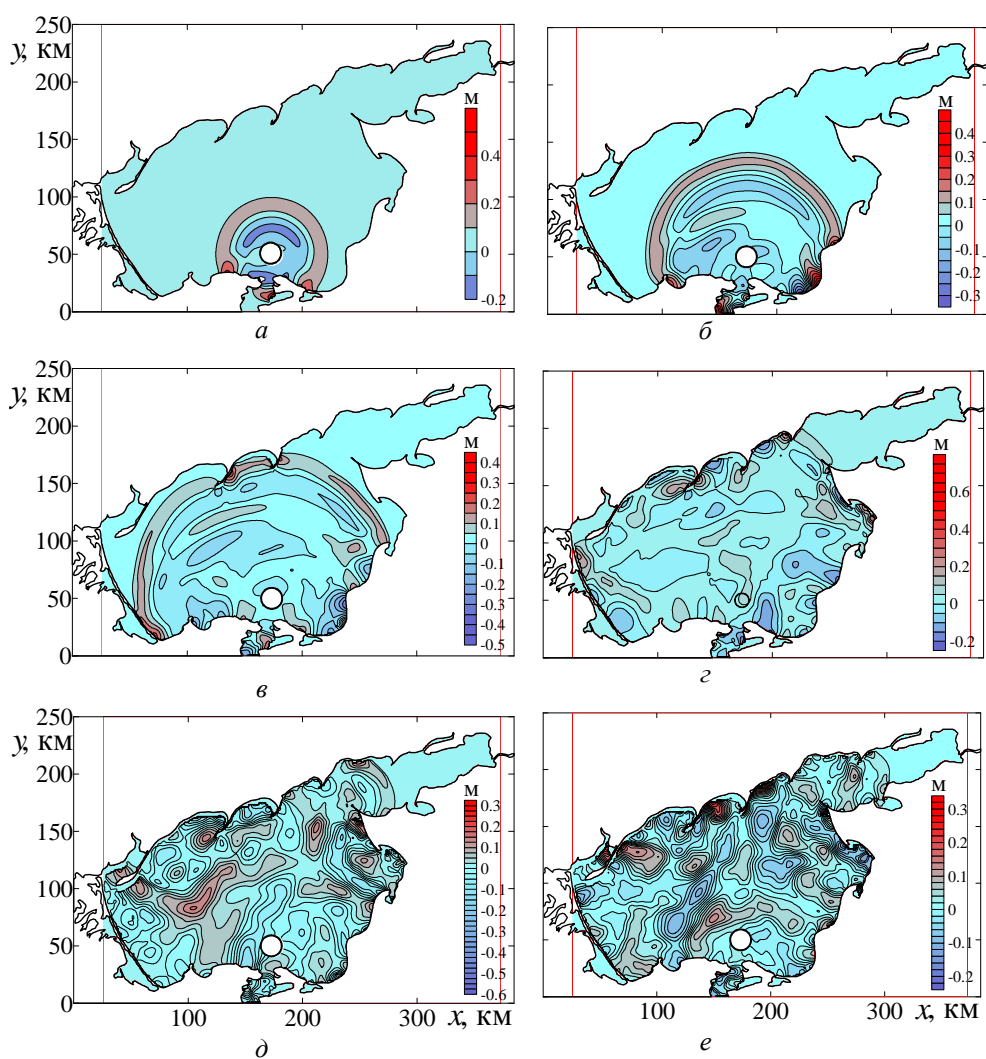
Распространение цунами в Азовском море из очага  $B$ , расположенного в западной части бассейна вблизи Арабатской стрелки, иллюстрирует рис. 2. Начальный этап эволюции цунами такой же, как и в бассейне постоянной глубины [10], а именно: при опускании центральной части начального поднятия уровня моря формируется знакопеременная кольцевая волна (рис. 2,  $a$ ).

При дальнейшем развитии волнового процесса часть волны, излученной в западном направлении, отражается от Арабатской стрелки (рис. 2, б) и начинает распространяться на восток. В результате формируются две группы волн (рис. 2, в – д), бегущих в зональном направлении в район Таганрогского залива. В дальнейшем, после отражений от берегов, образуется волновое поле типа волновой толчи, охватывающее всю акваторию моря (рис. 2, е). Некоторое усиление волн происходит в зонах нерегулярности береговой черты (песчаные косы на северном берегу), а также в районах моря, примыкающих к Темрюку и Приморско-Ахтарску. Усиления цунами ( $\max(\zeta)/a_0 > 1$ ), излученного из очага В, в зоне Таганрогского залива не происходит. Аналогичный вывод следует и из расчетов эволюции начального поднятия уровня в зоне Керченского пролива, приведенных в работе [5].



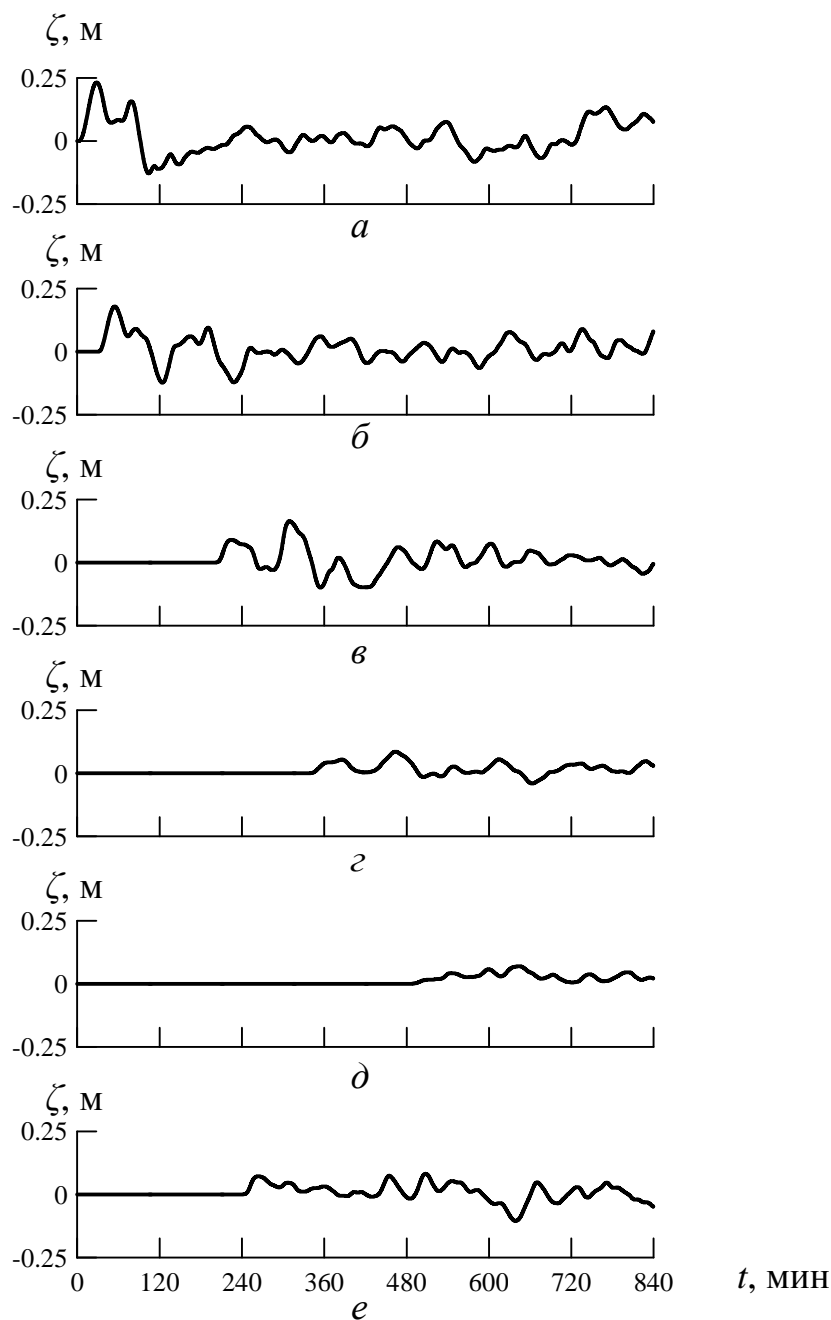
**Р и с. 2.** Распространение волны цунами из очага В ( $M = 7$ ): а –  $t = 1$  ч; б –  $t = 2$  ч; в –  $t = 3$  ч; з –  $t = 4$  ч; д –  $t = 5$  ч; е –  $t = 6$  ч

Образование и распространение цунами из очага  $H$ , расположенного у входа в Керченский пролив, происходит аналогичным образом (рис. 3). На начальной стадии формируется близкая к кольцевой знакопеременная волна (рис. 3,  $a$ ). Она обладает некоторой направленностью распространения (серповидная волна понижения уровня, следующая за головной волной повышения) в сторону больших глубин в центральной части бассейна. Далее близкая к кольцевой головная волна распространяется в сторону северного побережья (рис. 3,  $b, в$ ). В результате отражений от берегов формируется волновое поле типа волновой толчи, охватывающее всю акваторию Азовского моря (рис. 3,  $д, е$ ). Как и для очага  $B$ , некоторое локальное усиление волнового поля происходит вблизи участков нерегулярности береговой черты (песчаные косы вдоль северного побережья) и банки Еленина. Усиления волн в Таганрогском заливе в рассмотренный временной интервал не наблюдается.

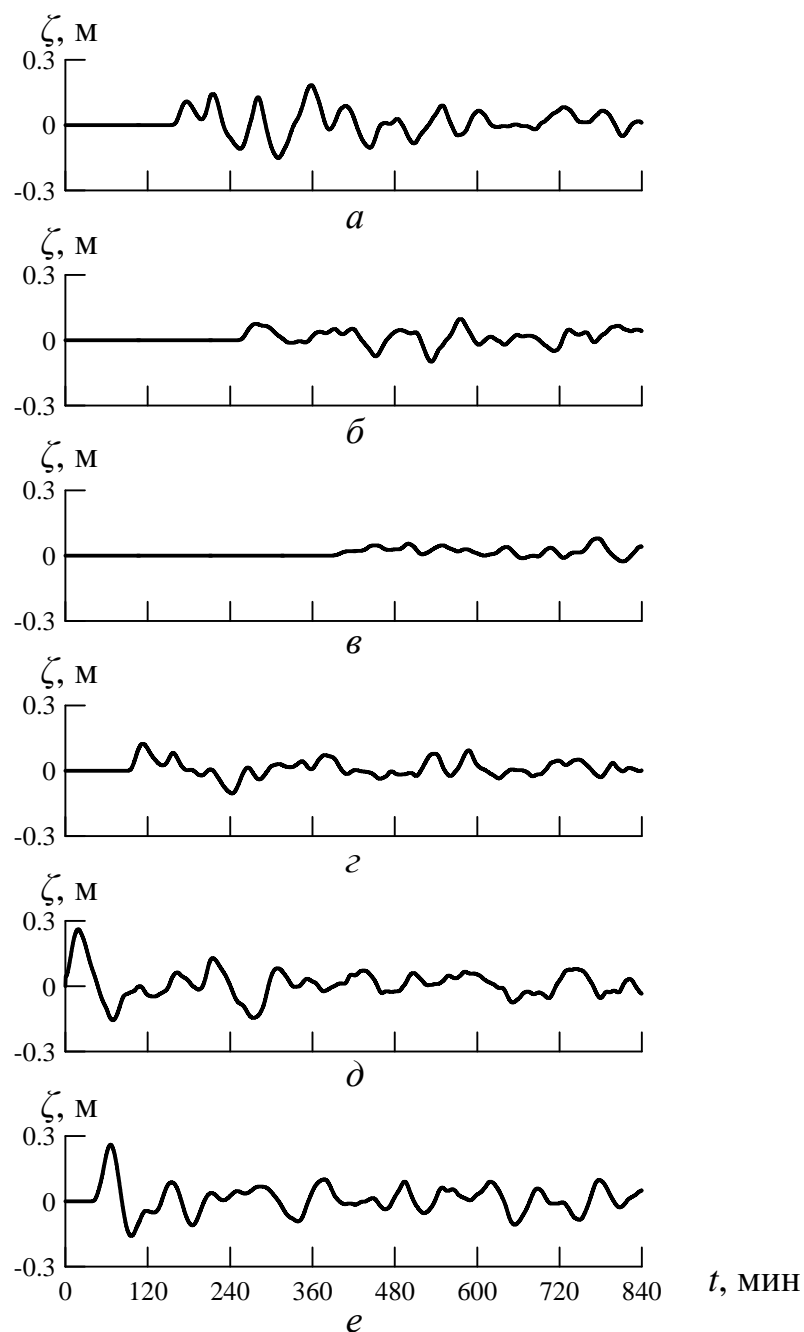


Р и с. 3. То же – для очага  $H$

Рассчитанные для очагов генерации  $A$  и  $H$  мареограммы позволяют оценить экстремальные характеристики смещений уровня в различных точках Азовского моря (рис. 4, 5). На мареограммах четко прослеживается момент прихода волн в заданный пункт побережья. Наиболее интенсивные волны наблюдаются в ближайших к очагу цунами точках бассейна (рис. 4,  $a$ ; 5,  $d$ ).



**Р и с. 4.** Колебания уровня моря от цунами из очага  $A$  ( $M = 7$ ):  $a$  – пункт 1;  $b$  – пункт 2;  $в$  – пункт 5;  $г$  – пункт 7;  $d$  – пункт 9;  $e$  – пункт 12



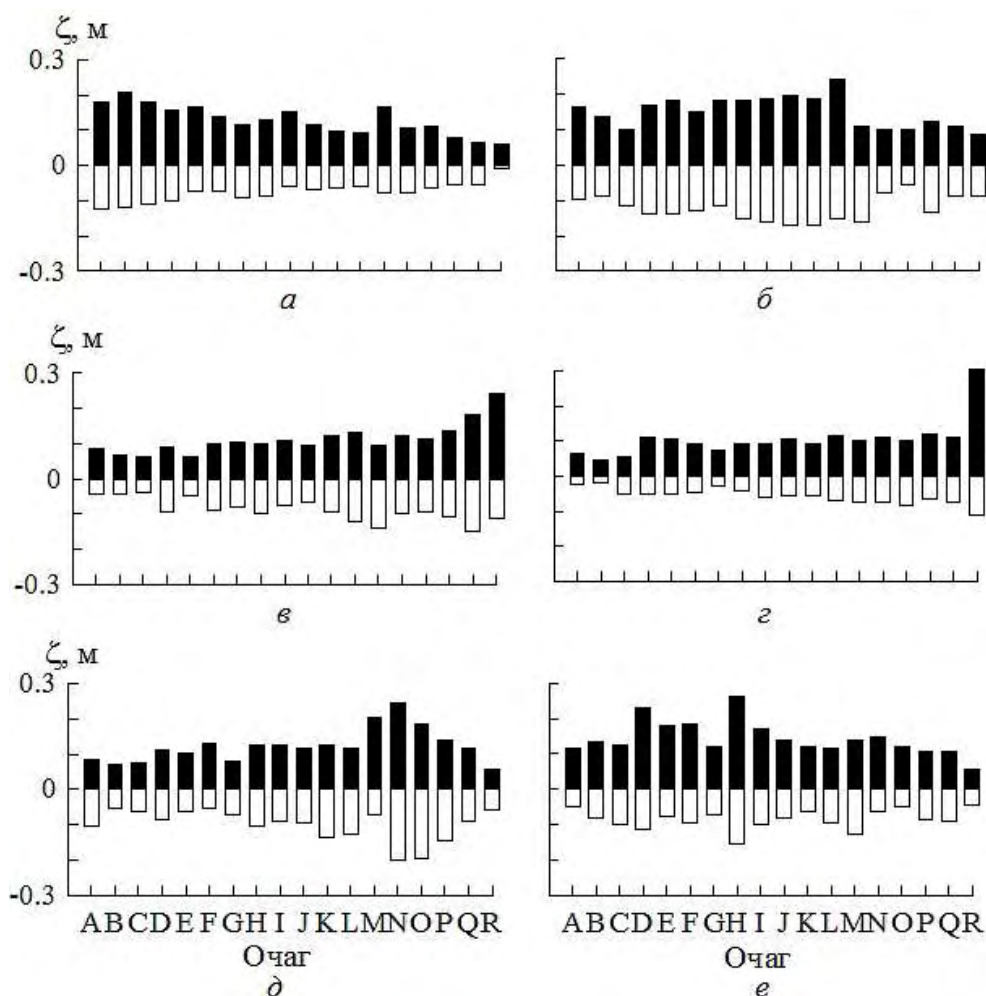
**Р и с. 5.** То же – для очага *H*: *a* – пункт 5; *б* – пункт 7; *в* – пункт 9; *г* – пункт 12; *д* – пункт 14; *е* – пункт 15

Даже при завышенной для бассейна магнитуде  $M = 7$  подводного землетрясения возбуждения интенсивных колебаний уровня моря не происходит. Так, подъемы и понижения уровня моря для очагов *A* и *H* не превышают  $(0,25 - 0,3)|a_0|$  и  $0,2 |a_0|$  по модулю соответственно. По визуальным оценкам,



периоды волн цунами достаточно велики (1,5 – 2 ч), что объясняется малой глубиной бассейна. Время распространения цунами из прикерченской зоны до пунктов северного побережья моря достаточно велико, например, до Мариуполя оно составляет более 4,5 ч.

Представляет интерес расчет экстремальных характеристик колебаний уровня в различных точках побережья Азовского моря при землетрясениях с очагами  $A, B, \dots, R$ . Максимальные подъемы и понижения уровня моря во время цунами (для всех 18 возможных очагов) в нескольких пунктах вблизи берега представлены на рис. 6. Экстремальные значения  $\zeta$  по абсолютной величине не превышают  $0,3|a_0|$ . Сравнение рис. 1 и 6 показывает, что наибольшие подъемы уровня в данном пункте побережья связаны с цунами, излученном из ближайшего к пункту очага цунами. Что касается экстремальных понижений уровня моря, то их связь с положением очагов цунами явно не прослеживается.



**Р и с. 6.** Экстремальные подъемы (■) и понижения (□) уровня моря в пунктах 2 (*a*), 5 (*б*), 7 (*в*), 8 (*г*), 12 (*д*), 14 (*e*) за 14 ч при распространении цунами из очагов  $A, B, \dots, R$  ( $M=7$ )

**Выводы.** Нелинейная модель длинных волн с учетом донного трения применена для численного анализа на сетке с шагом 500 м эволюции волн цунами в Азовском море. Для магнитуд землетрясений 6 – 7 рассмотрено распространение цунами из 18 круговых зон генерации, покрывающих практически всю акваторию моря.

Показано, что только на начальном этапе эволюции волн можно выделить доминирующие направления передачи волновой энергии. В результате отражений от берегов формируются колебания уровня, напоминающие волновую толчею. Небольшие области повышенной волновой активности возникают в зонах нерегулярности береговой черты, в частности у песчаных кос вдоль северного побережья и отмелей в юго-восточной части моря.

Вызванные землетрясениями максимальные подъемы и понижения уровня в различных точках побережья Азовского моря не превышают по абсолютной величине  $0,3|a_0|$  (при магнитуде землетрясения 7). Наибольшие подъемы уровня соответствуют волнам цунами, излученным из ближайшего к пункту генерации очага. В целом можно утверждать, что уровень цунами-опасности побережья Азовского моря невысок и вероятность сейсмической генерации сильных цунами в этом бассейне невелика.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А.А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Изв. РАН. Физика Земли. – 1997. – 33, № 1. – С. 86 – 96.
2. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал. – 1991. – № 3. – С. 14 – 19.
3. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. – Севастополь: МГИ 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: МГИ НАН Украины, 2010. – 178 с.
5. Букатов А.Е., Завьялов Д.Д. Эволюция начального смещения свободной поверхности в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. – 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. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 300 с.
8. Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С. и др. Опыт картирования очагов землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – М.: ИФЗ РАН, 1993. – Вып. 1. – С. 99 – 108.
9. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982. – 226 с.

10. Доценко С.Ф., Сергеевский Б.Ю., Черкесов Л.В. Об эволюции осесимметричных возмущений жидкости // Морские гидрофизические исследования. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1978. – № 1. – С. 15 – 31.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: sf\_dotsenko@mail.ru

Материал поступил  
в редакцию 18.05.10

АНОТАЦІЯ Виконано чисельний аналіз еволюції цунамі в Азовському морі. Розрахунки на сітці з кроком 500 м для магнітуд 6 – 7 підводних землетрусів проведені для 18 кругових зон генерації, які покривають практично всю акваторію моря. Показано, що в результаті відбиттів від берегів формуються коливання рівня, що нагадують хвильову ступу. Невеликі області підвищеної хвильової активності виникають у зонах нерегулярності берегової риси північного узбережжя і мілин у південно-східній частині басейну. На основі знайдених значень екстремальних підйомів і знижень рівня моря можна говорити про низьку цунамінебезпеку побережжя Азовського моря.

**Ключові слова:** Азовське море, цунамі, рівняння довгих хвиль, чисельне моделювання, амплітудні характеристики хвиль.

ABSTRACT Evolution of tsunami in the Sea of Azov is numerically analyzed. Calculations on the grid with 500 m step for underwater earthquakes of 6 – 7 magnitudes are performed for 18 circular generation zones covering almost the whole water area of the sea. It is shown that the sea level fluctuations looking like a wave crowd are formed as a result of reflections from the coast. Small areas of the increased wave activity arise in the zones of coastline irregularities of the northern coast and shoals in the southeastern part of the basin. Based on the found values of extreme rises and falls of the sea level, the conclusion on low tsunami hazard along the Sea of Azov coast can be drawn.

**Keywords:** the Sea of Azov, tsunami, long wave equations, numerical modeling, amplitude characteristics of waves.