

УДК 517.465

Е.Н. Пелиновский<sup>1</sup>, А.И. Зайцев<sup>2</sup>**ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ  
НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ УКРАИНЫ**Институт прикладной физики РАН<sup>1</sup>,  
СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск<sup>2</sup>

Обсуждается проблема прогноза высот волн цунами на Украинского побережье Черного моря. Выполнены расчеты прогностических цунами, источники которых равномерно распределены в бассейне Черного моря (всего 55 событий). Их результаты сопоставлены с результатами численного моделирования исторических событий (1939 и 1966 годов) и данными немногочисленных измерений. На этой основе выдан предварительный прогноз высот волн цунами вдоль Украинского побережья Черного моря.

*Ключевые слова:* цунами, численное моделирование; Чёрное море.

**Введение**

Район Черного моря не отличается большой сейсмической активностью [1]. Совсем недавно опубликован каталог цунами в Черном море, составленный специалистами из Греции и Болгарии [5]. Он составлен по тому же принципу, что и так называемый Новый европейский каталог цунами, принятый сейчас странами Европейского Союза. В нем содержится описание 29 случаев цунами, из которых три случая (815 до н.э., 557 до н.э. и 1341) признаются ошибочными. Таким образом, остается 26 событий. Источники цунами расположены на побережья Крыма, Болгарии и Турции, и в большинстве своем цунами возникло в результате землетрясения. 22 случая цунами признаются достоверными и почти достоверными (3 и 4 балла по принятой сейчас 4-бальной системе достоверности). Интенсивность цунами оценена по новой 12-бальной шкале, разработанной Пападопулосом и Имамурой [6]. За период с 544 года случилось всего два события большой интенсивности (больше 7 баллов), так что период повторяемости таких событий составляет примерно 750 лет. Число средних цунами (с интенсивностью от 4 до 7) равно 5, и они зафиксированы с 1650 года. Таким образом, период повторяемости «средних» цунами равен 72 года в среднем. Важно подчеркнуть, что в Черном море не было сильных цунами (с интенсивностью, больше 10), подобных случившемуся в 1908 году в Италии (Мессинское цунами) или в 1956 году в Греции. Поэтому опасность цунами в Черном море ниже, чем в Средиземном море или на Дальнем Востоке, но не может игнорироваться.

**Методика расчетов**

Как и в наших расчетах для российского побережья Чёрного моря [3], мы использовали гидродинамический очаг (рис. 1), который представляет собой в сечении окружность диаметром 65 км. Высота волны в очаге 4 м (3 м выше уровня моря и 1 м ниже). Такие параметры имеют в среднем очаги цунами от подводных землетрясений с магнитудой 7 [4]. Такой источник в океане с постоянной глубины излучает волны одинаково во всех направлениях, так что возможная анизотропия распределения высот волн вдоль побережья связана только с расстоянием до очага и переменной глубиной бассейна.

Расчёты характеристик волн цунами производились с помощью авторского кода NAMI-DANCE [2], основанного на уравнениях мелкой воды в декартовых координатах. В расчетах была использована 1-минутная батиметрия Мирового океана (GEBCO1 Digital Atlas, British Oceanographic Data Centre) с добавлением более точной прибрежной батиметрии, шаг по сетке равняется в среднем 0,5 км. Вся акватория Чёрного моря равномерно по-

крывалась гидродинамическими источниками с шагом по долготе  $0,8652$  градуса (в среднем  $71,2$  км), и по широте  $0,6504$  ( $72,2$  км). Общее количество очагов составило  $55$ . Выполненные выше расчеты распространения цунами от различных источников так же могут быть использованы и для оценки цунами риска Украинского побережья Черного моря. Учитывая то, что береговая линия Украины является одной из самых длинных и сильно изрезанной, мы разбили береговую линию на две части: западную и восточную. Западная часть включает в себя западную часть Крымского полуострова и береговую линию западнее. Все источники цунами мы разбили на три группы по отношению к западной части Черноморского побережья Украины, назвав их близкие, средние и далекие (рис. 2). Эта часть побережья на рисунке выделена штрих пунктирной линией. Это позволит нам оценить роль различных зон в генерации цунами, опасных для Украинского побережья.

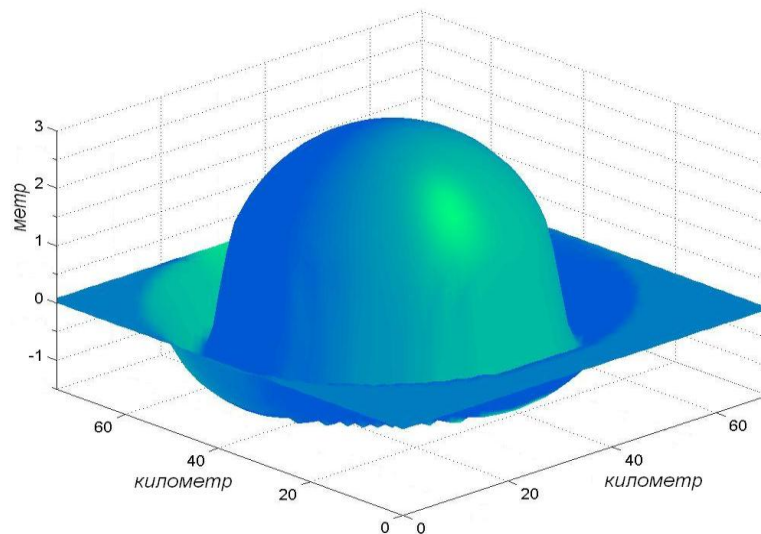


Рис. 1. Гидродинамический очаг

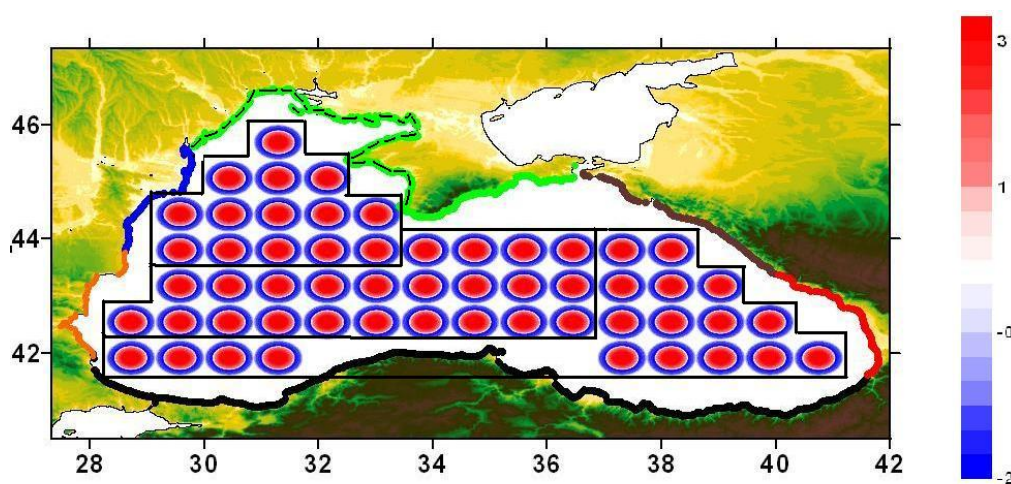
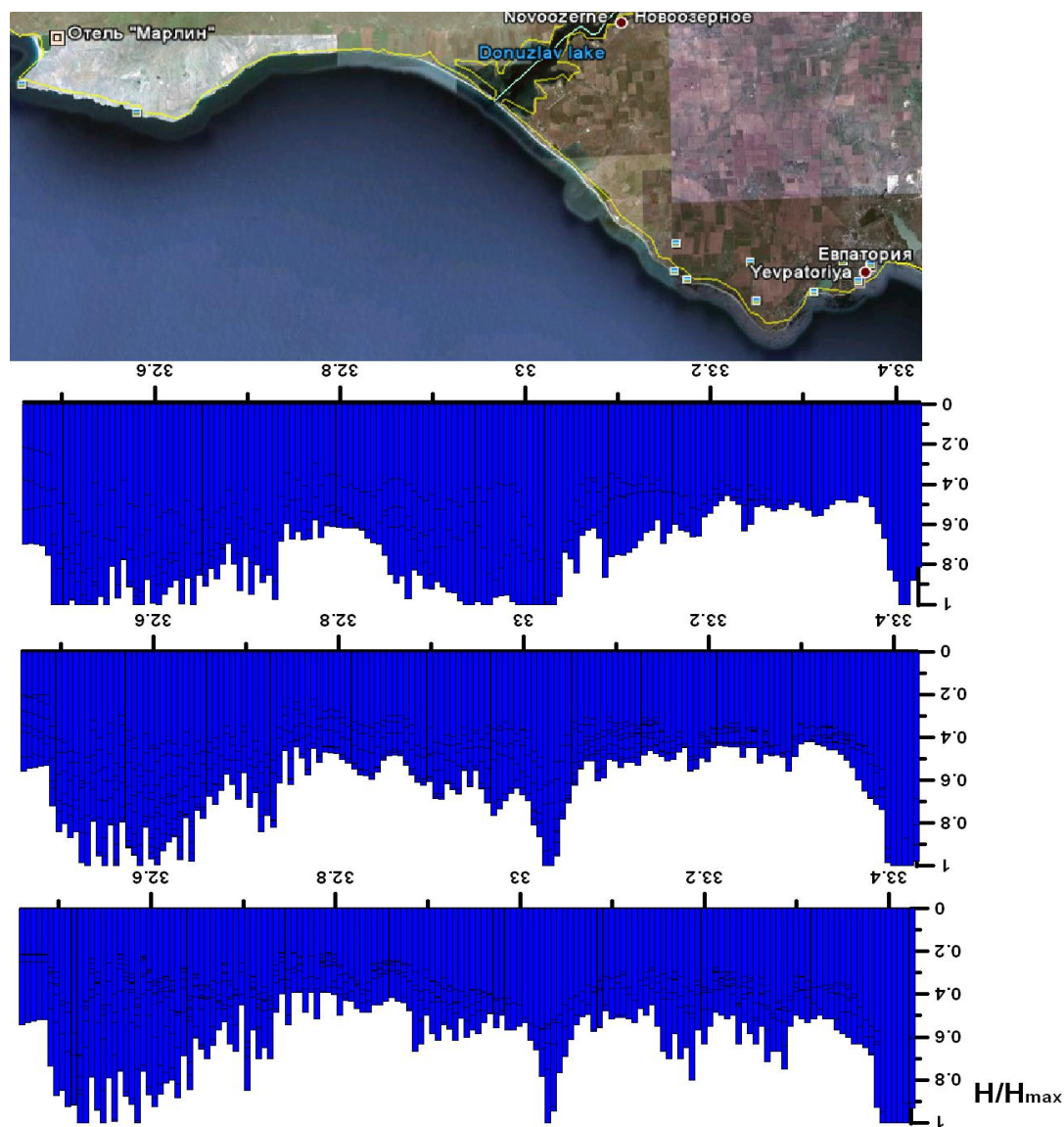


Рис. 2. Разделение источников в Черном море (западная часть) на три зоны: близкие, средние и далекие

Рассмотрим теперь более детально распределение характеристик цунами вдоль различных участков Украинского побережья. Данная модель позволяет рассчитывать накат волн цунами на берег, однако, эти расчеты требуют большого времени и лучшего знания прибрежной батиметрии и береговой топографии. Поэтому здесь такие расчеты не производились, и фактически вычислялся уровень воды в последней мористой точке (на глубине около  $5$  м), где исполь-

зованы условия полного отражения. Такая ситуация соответствует наличию «стенки» на малых глубинах, и данный прием активно используется, когда надо выполнить большой объем вычислений для сравнительного анализа цунами в различных пунктах побережья.

Рассмотрим теперь одну из частей Украинского побережья Черного моря в районе Донузлавского озера - Евпатории. Рис. 3 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. Распределение высот схожи вне зависимости от расположения источника, что свидетельствует о роли прибрежной батиметрии. В районе Евпатории относительные высоты не более 0–5. В районе Донузлавского озера относительные высоты в пределах 0,7-0,9. Более подробно результаты представлены в табл. 1.



**Рис. 3. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх – от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Евпатории)**

Далее рассмотрим восточную часть Черноморского побережья Украины. Она включает в себя восточную часть Крымского полуострова до Керченского пролива. Все источники цунами мы разбили на три группы по отношению к этой части побережья Украины, назвав их близкие, средние и далекие (рис. 4). Эта часть побережья на рис. 4 выделена штрих пунктирной линией, что позволит нам оценить роль различных зон в генерации цунами, опасных для Украинского побережья.

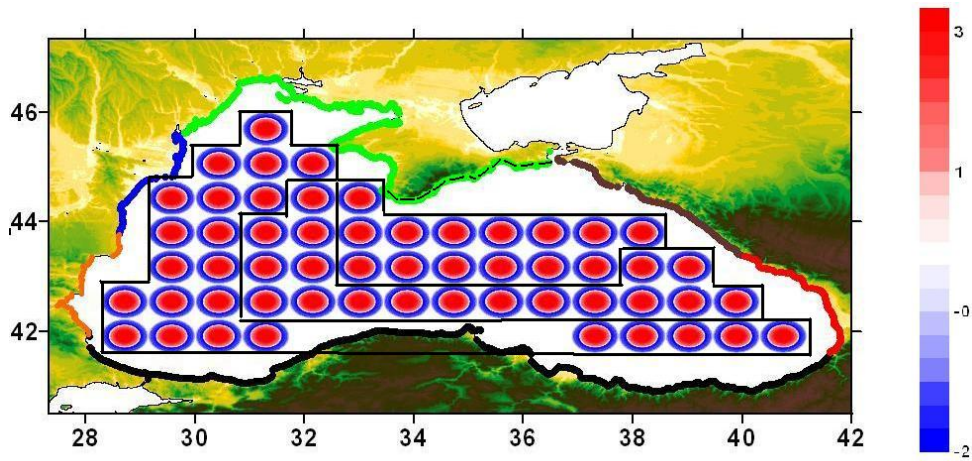


Рис. 4. Разделение источников в Черном море (восточная часть) на три зоны: близкие, средние и далекие

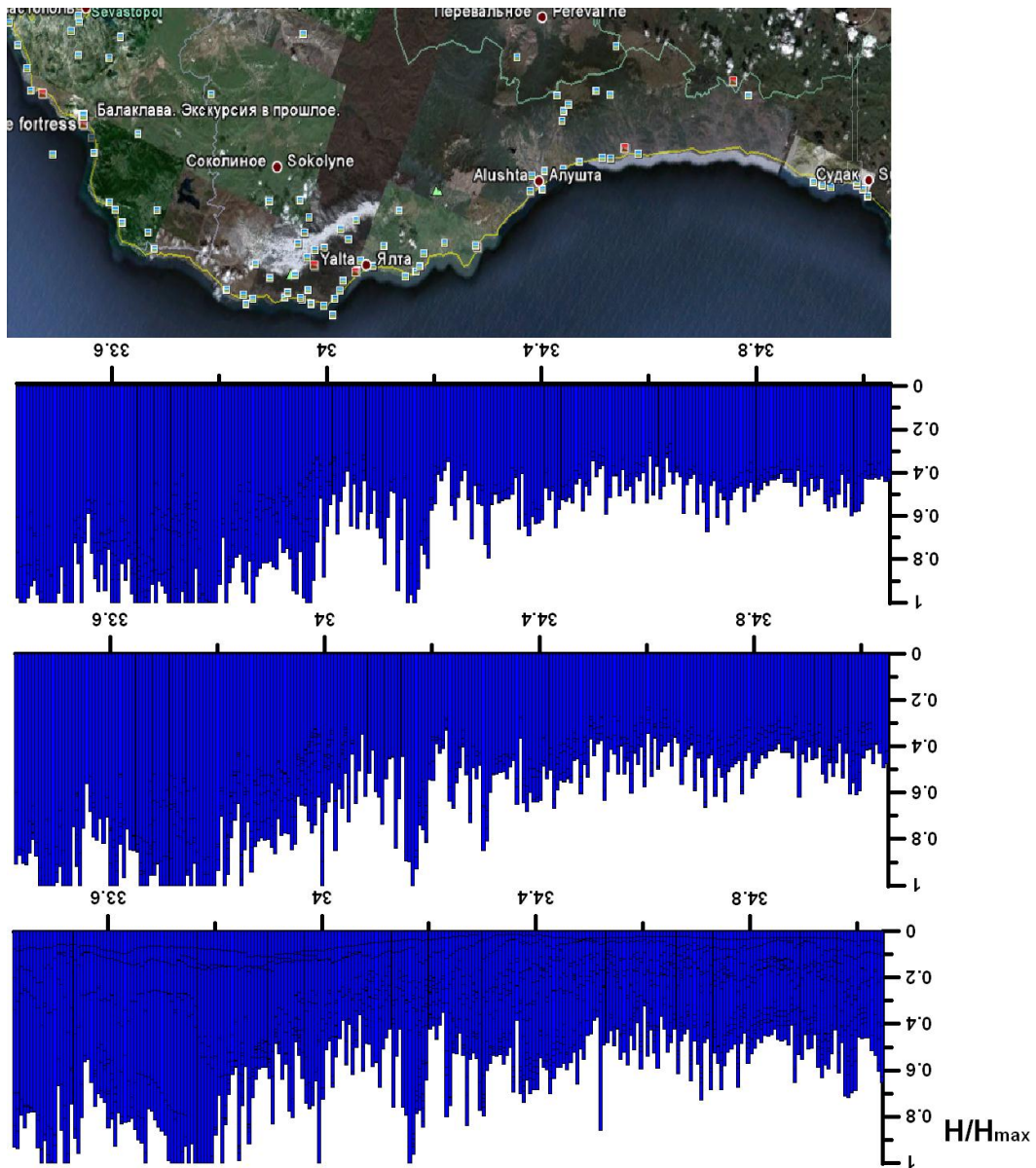


Рис. 5. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх – от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Ялта – Судак)

Рассмотрим так же одну из частей Украинского побережья Черного моря, центральную часть Крымского полуострова в районе Ялта – Судак. Рис. 5 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. От средне удалённых и от дальних источников можно видеть «провал» до 0,6 (в относительных единицах) западнее п. Южное. В самом п. Южном высоты волн цунами находятся в пределах 0,6–0,7. Следует отметить, что в районе Одессы высоты наблюдаются не менее 0–8 от средне удалённых и дальних источников. Распределения от всех видов источников, независимо от удалённости, практически схожи. В районе западнее Ялты наблюдаются максимальные высоты, в пределах 0,8–1. В Ялте «провал» до 0,4–0,5, несмотря на то, что восточнее Ялты снова «подъём» до 1. Таким образом, около Ялты высота цунами меняется сильно из-за донной и береговой топографии. Район Алушты – Судака спокоен, относительные высоты не более 0,5. Более подробно результаты представлены в табл. 1.

Рассмотрим другую часть Украинского побережья Черного моря, восточную часть Крымского полуострова в районе Феодосия – Керчь. Рис. 6 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. На всех трёх графиках можно видеть «подъёмы» до 0,9 в районе п. Орджоникидзе (западнее Феодосии) и в районе г. Керчь и Керченского пролива. На всей остальной части можно видеть относительные высоты не более 0,4.

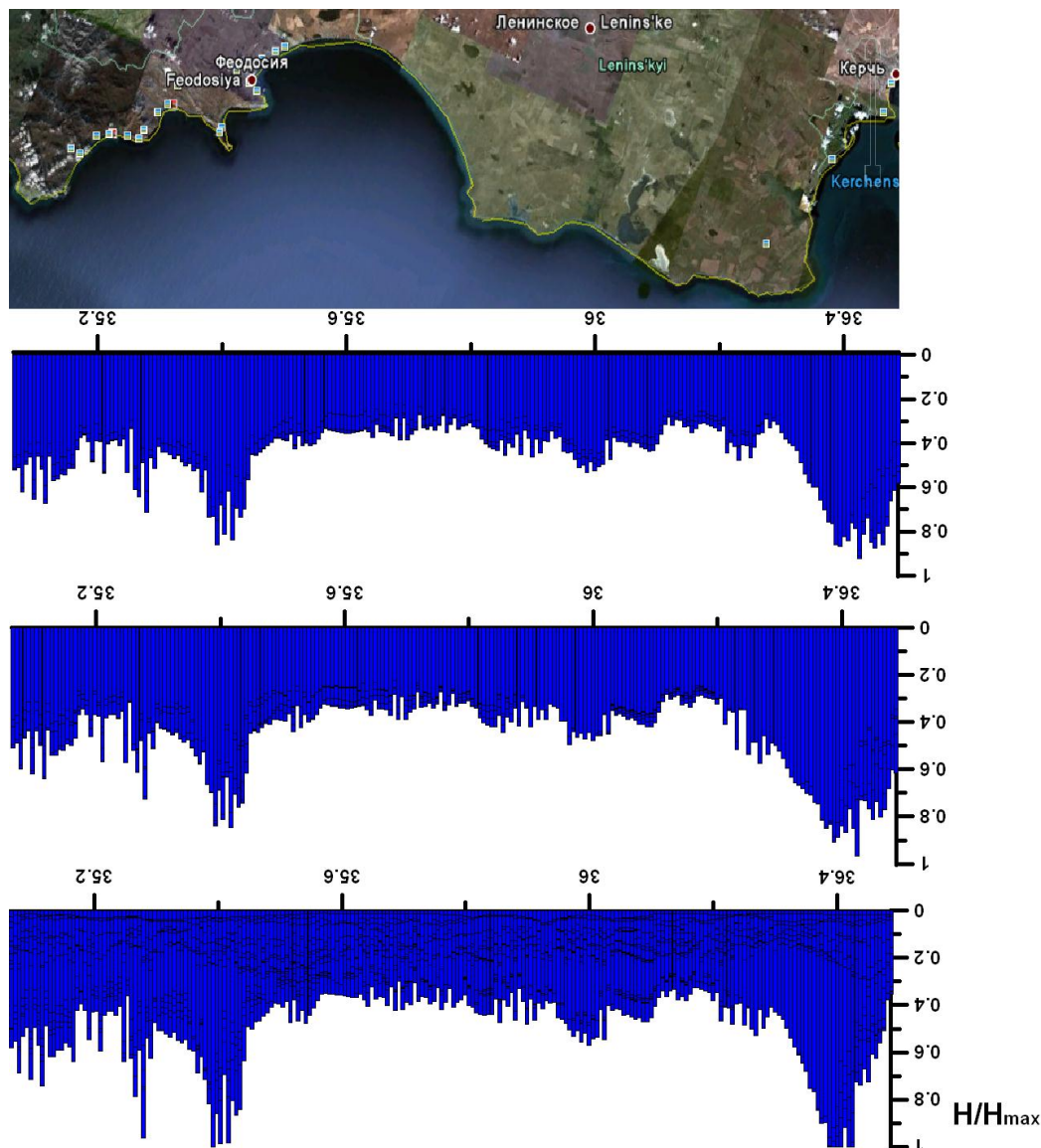


Рис. 6. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх — от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Феодосия – Керчь)

### Оценки высот цунами на побережье Украины

Результаты выполненных модельных расчетов для основных пунктов побережья Черного моря сведены в табл. 1 и представлены на рис. 1. Здесь же представлены рассчитанные высоты волн от двух исторических событий (Турецкое цунами 1939 года и Анапское цунами 1966 года), результаты моделирования которых описаны в прошлом отчете за 2010 год. Наконец, два наиболее сильные сейсмические события в Черном море (1942 и 1944 годов) с магнитудой более 6,5, использованные в прошлом отчете как прототипы возможных цунами, также были использованы для расчета высот волн цунами на различных участках побережья.

Описанные выше данные использованы для выдачи прогностических значений высот волн цунами в данных пунктах. Как мы уже указывали, в нашем распоряжении нет «расчетных» параметров сильных землетрясений, которые были бы ответственны за цунами в Черном море с повторяемостью раз в 100 лет. Поэтому прогноз выдается на основании моделирования уже имеющихся цунами 20 столетия, прогностических цунами с магнитудой более 6.5 и «гидродинамических» цунами, позволяющих сопоставить высоты цунами в различных пунктах. Кроме того, накат волн на берег пока не рассматривается, так что высоты волн цунами задаются в последней мористой точке примерно на глубине 5 м. Тем не менее, для удобства мы даем для них названия близлежащих населенных пунктов. Вдольбереговая дискретность этих точек имеет масштаб около 0,9 км. Прогностическое значение высоты волны определялось как максимальное значение из всех данных для каждого пункта с точностью до 0.5 м. В дальнейшем, эти цифры могут быть использованы для построения детальной схемы цунамирайонирования населенных пунктов с учетом заплеска берега волн цунами.

Таблица 1

Сводные данные о высотах волн цунами на побережье Украины

Пункт	Относительное распределение	Цунами 1966 г. (м)	Цунами 1939 г. (м)	Событие 1944 г. (м), относит. распр.	Событие 1942 г. (м) относит. распр.	Наблюдения (м)	Прогноз высоты волны (м)
Затока	1	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Ильичевск	0.9	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Одесса	0.8	0.1	0.1	0.5	0.1		0.5
Южное	0.7	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Очаков	0.7	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Донузлавское озеро	0.8	0.1	0.1	0.3	0.2		0.5
Евпатория	0.5	0.4	0.1	0.4	0.2	1 (1869)	1.0
Ялта	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	0.4 (1927)	1.0
Алушта	0.5	0.4	0.2	0.6	0.4	0.7 (1927)	1.0
Судак	0.5	0.4	0.5	1	0.4		1.0
п. Орджоникидзе	0.9	0.6	0.6	0.7	0.7		1.0
Феодосия	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5 (1939)	0.5
Керчь	0.8	1.2	0.4	0.5	1	0.5 (1939)	1.0

Подчеркнем еще раз, что предлагаемые оценки высот волн цунами не включают локальные эффекты, связанные с возможностью оползневых эффектов. Они основаны только на информации о землетрясениях в бассейне Черного моря и уже прошедших цунами. По-

этому исполнители отчета рассматривают выдаваемый прогноз как предварительный, который будет уточняться в дальнейшем.

### Выводы

В данной работе исследована проблема цунами риска для Украинского побережья Черного моря. Цунами в Черном море не является экзотическим событием (за 2000 лет произошло уже 26 событий), так что повторяемость цунами оценивается примерно один раз в 77 лет. Большинство событий произошло у побережья Украины. Исследована сравнительная защищенность различных участков побережья от возможных цунами, возникающих в открытом море. Для этого выбрано около 50 гидродинамических источников, равномерно расположенных в бассейне Черного моря. На этой основе выделены зоны более сильного и более слабого риска цунами. Показано, что сильные цунами могут проявиться на всем побережье Черного моря. В то же время объем количественной информации об исторических цунами крайне мал, поэтому для предварительного прогноза высот цунами мы использовали результаты численного моделирования исторических событий (цунами 1939 и 1966 годов) и возможных прогностических событий. Результаты моделирования показывают, что высоты волн цунами вдоль побережья распределены неравномерно, не превышая 1 м вблизи населенных пунктов. Эти значения могут быть использованы для детального цунамирайонирования отдельных населенных пунктов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (09-05-00971, 11-05-00216, 11-05-92002 ННС\_а, 11-05-90740), МК-6734.2010.5 и ГК № 02.740.11.0732.

### Библиографический список

1. **Доценко, С.Ф.** Природные катастрофы Азовско-Черноморского региона / С.Ф. Доценко, В.А. Иванов. – Севастополь: НПЦ «Экоси-гидрофизика», 2010. – 174 с.
2. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Изв. АИН РФ Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
3. **Пелиновский, Е.Н.** Оценка и картирование опасности цунами в Чёрном море / Е.Н. Пелиновский, А.И. Зайцев. – Н. Новгород: ИПФАН2010, 2010
4. **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135–154.
5. **Papadopoulos, G.A.** Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue / G.A. Papadopoulos [at al.] // Natural Hazards and Earth Systems, 2011. V. 11. P. 945–963.
6. **Papadopoulos, G.A.** A proposal for a new tsunami intensity scale / G.A. Papadopoulos, F. Imamura // Proceedings International Tsunami Symposium 2001, Seattle, Session 5 (5-1). 2001. P. 569–577.
7. **Yalciner, A.** Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [at al.] // J. Geophys. Research. 2004. V. 109. N. C. 12. C. 12023.

*Дата поступления  
в редакцию 26. 07.2011*

**E.N. Pelinovsky, A.I. Zaytsev**

### THE ESTIMATION AND MAPPING OF TSUNAMI DANGEROUS AT THE UKRAINIAN BLACK SEA COAST

In the present work the forecasting of tsunami heights for Ukrainian Coast of the Black Sea is discussed. The numerical simulation of the prognostic events (55) which sources are distributed uniformly in a basin of the Black Sea is performed. Their results are compared with results of the numerical simulations of the historic events (1939 and 1966) and data of tsunami observations. It is used to predict possible tsunami wave heights along the Ukrainian coast of the Black Sea.

*Key words:* tsunami, numerical modeling, Black sea.