
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.465

А.И. Зайцев¹, Е.Н. Пелиновский², А. Ялченир³

ПРОГНОЗ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

СКБ «Средств автоматизации морских исследований» ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск¹,
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород²,
Технический университет Центральной Азии, Турция³

В настоящей работе обсуждается проблема прогноза высот волн цунами на российском 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 российского побережья Черного моря.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, Чёрное море.

Введение

Район Черного моря не отличается большой сейсмической активностью [13, 14], в Черном море за этот период случилось только одно сильное землетрясение с магнитудой больше 7 (вблизи побережья Болгарии), и то не сопровождавшееся цунами, а это значение является пороговым для объявления тревоги цунами на Дальнем Востоке России. Однако за это столетие было уже порядка десяти цунами (мы их обсудим далее), которые не оказались катастрофическими (в отличие от землетрясений) и имели локальные последствия. Исторические данные о цунами в Черном море имеются в разных литературных источниках [1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 17, 20, 23, 25, 26]. Всего отмечено 23 события, начиная с цунами на территории Абхазии в 20 году до нашей эры во время землетрясения с магнитудой более 6.5 до последнего цунами высотой 3-4 метра в 2007 году у берегов Болгарии, природа которого пока еще не выяснена. Большинство цунами вызвано относительно слабыми землетрясениями, и они имели локальный характер. В сводках практически невозможно найти количественные данные о цунами (до 20-го столетия), так что использовать их для оценки повторяемости цунами в конкретных пунктах невозможно. Тем не менее, даже слабые волны цунами пересекали Черное море и регистрировались на его противоположном берегу. Достаточно упомянуть цунами 1939 года в Турции, зарегистрированное мареографами в Крыму и на Кавказском побережье России. Тем более этот эффект будет замечен, если волны цунами будут иметь большую амплитуду. Мировой опыт показывает, что сильные цунами распространяются на далекие расстояния. Так, цунами 1883 года, вызванное извержением вулкана Кракатау, [21] и Индонезийское цунами 2004 года [22] были зарегистрированы мареографами в Тихом и Атлантическом океанах, а не только в Индийском океане. Поэтому оценки возможных цунами на российском побережье Черного моря должны обязательно включать в себя возможные события вдали от нашего побережья (удаленные цунами). Такие расчеты распространения цунами через акваторию Черного моря уже делались для исторических цунами 20-го столетия (1927, 1939, 1966 года) в работе [26] и они показали хорошее совпадение расчетных данных с измеренными.

Таким образом, уже существующая численная модель распространения цунами может быть использована для расчета возможных цунами в Черном море. Здесь мы применим метод оценки цунами потенциала прибрежных пунктов от удаленных источников, развиваемый в ряде работ [9, 18, 19, 24]. Для этого на первом этапе достаточно взять модельный (гидродинамический) очаг цунами и распределить его однородно в бассейне моря; после этого можно сравнить распределения высот волн вдоль побережья и выделить зоны слабого и сильного риска цунами, что позволит говорить о разной степени защищенности побережья. Результаты таких расчетов представлены в настоящей статье.

1. Методика расчетов

В наших расчетах 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 [16]. 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.

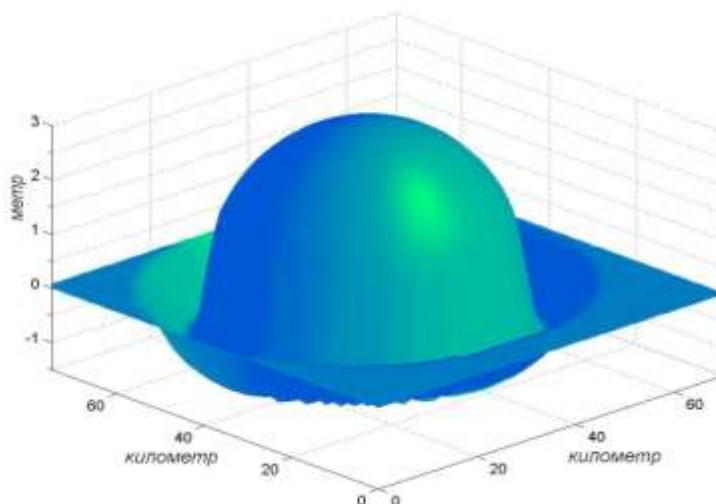


Рис. 1. Гидродинамический очаг

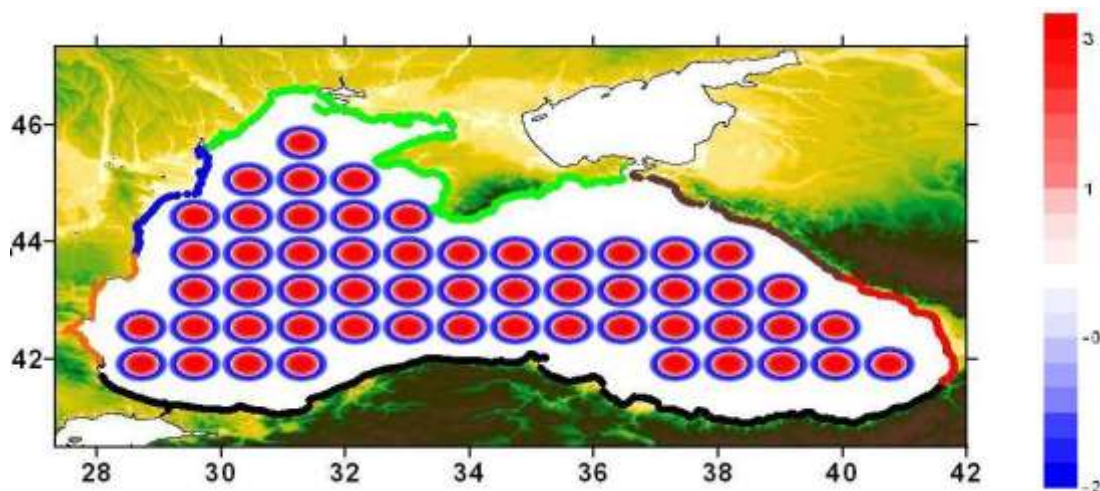


Рис. 2. Положение гипотетических очагов в Чёрном море

Расчёты характеристик волн цунами производились с помощью авторского кода NA-MI-DANCE [8], основанного на уравнениях мелкой воды в декартовых координатах. Этот код уже использовался при расчетах Индонезийского цунами 2004 года [6] и Невельского цунами 2007 года [7]. В расчетах была использована одноминутная 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 покрывалась 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, они представлены на рис. 2.

Мы разбили все источники на три группы, назвав их близкие, средние и далекие по отношению к российскому побережью. Каждый случай отдельно моделировался на протяжении пяти часов распространения волны.

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

Чтобы сравнить между собой высоты волн от разных источников в одном и том же месте и исключить влияние удаленности источников от побережья, высоты волн от каждого источника нормировались на максимальные значения. Рассмотрим более детально распределение характеристик цунами вдоль различных участков российского побережья. На рис. 3 показано распределение высот волн от источников гидродинамического типа для северной части российского побережья (выше Анапы).

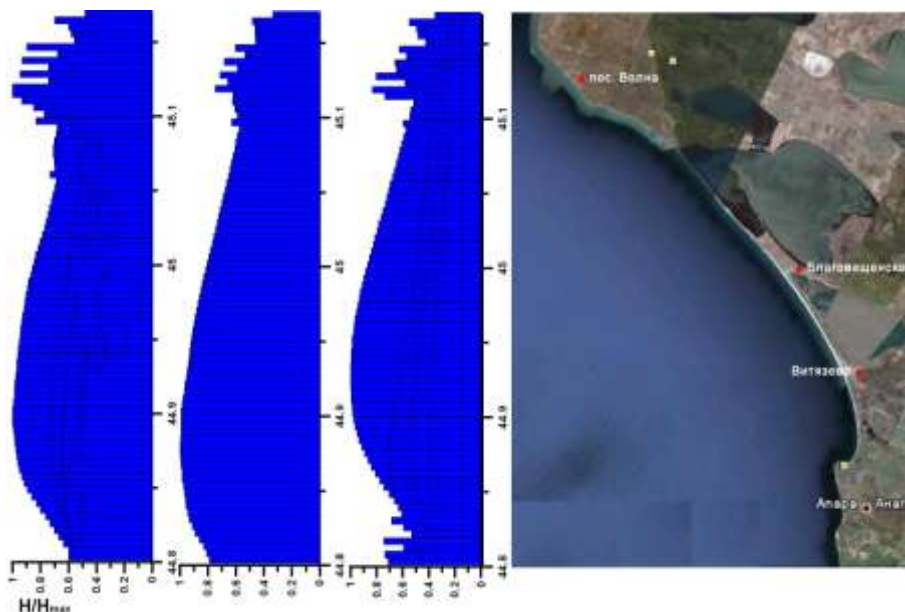


Рис. 3. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (слева направо – от дальних, средних и близких соответственно) в северной части российского побережья

Как видно, распределения высот волн от различных зон оказываются в среднем одинаковыми, за исключением района Анапы, где заметна внутренняя структура от ближних источников. Фактически, для всего района от пос. Волна до Анапы высота волны меняется не более чем вдвое, так что трудно говорить здесь о зонах с существенно разными высотами волн.

Распределения высот волн от гидродинамических источников в районе Новороссийск – Геленджик не более чем в два раза от пункта к пункту, демонстрируя, что возможное цунами почти в равной степени затронет все пункты в этой части побережья. Не имея точной батиметрии новороссийской бухты, высота волны определялась только на входе в бухту и ее значение ассоциировалось с городом Новороссийск. Расчёты показали, что высоты волн на входе в бухту не очень значительны.

Аналогичные распределения построены для участка побережья между скалой «Парус» и Туапсе. Максимальные высоты волн от гидродинамических источников здесь проявляются в пунктах Ольгинка и Криница. Высоты волн от пункта к пункту меняются не более чем в два раза. Следует отметить, что в п. Джугба и п. Новомихайловский высоты волн в 1,5–2 раза ниже, чем в соседних районах.

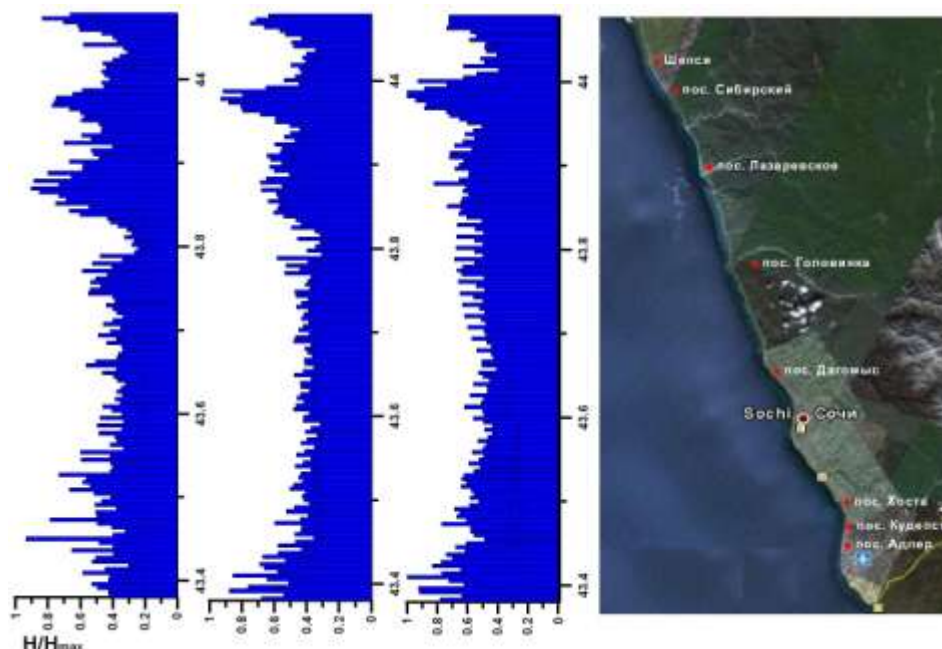


Рис. 4. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (слева направо – от дальних, средних и близких соответственно) в южной части российского побережья

Распределения высот волн цунами в южной части российского побережья приведены на рис. 4. Отметим, что распределения относительных высот волн от гидродинамических источников показывают усиление высот в п. Сибирский и п. Лазаревское, «провалы» в п. Шевси и г. Сочи (не более 0.5 от максимального значения).

2. Моделирование потенциально возможных цунами в Чёрном море

Пока неясно, возможны ли землетрясения с магнитудой 7 и более непосредственно в бассейне Черного моря. Следующими по силе являются землетрясения с магнитудой 6.5–7. В прошлом столетии два таких землетрясения произошли около побережья Турции с магнитудами 6.7 и 6.8. Первое произошло 20 декабря 1942 года, его магнитуда составила 6.7 и эпицентр имел координаты 40.87 с.ш, и 36.47 в.д. Второе землетрясение случилось 1 февраля 1944 года, оно имело магнитуду 6.8, и его эпицентр находился в точке 41.41 с.ш, и 32.69 в.д. Оба они не вызвали цунами, или, по крайней мере, оно не было зарегистрировано. Поэтому совместно с турецкими коллегами, выполнена модернизация параметров этих землетрясений, чтобы они смогли вызвать цунами. При этом эпицентры землетрясений оставлены такими же, как и в реальных событиях. Модернизированные таким образом землетрясения

могли бы привести к цунами в Черном море, и изучение потенциально возможных событий позволит оценить опасность цунами, возникающих у побережья Турции для российского побережья.

Параметры первого источника цунами (будем называть его событием 1942 г.) выбраны следующими: эпицентр 36.47 в.д., 40.87 с.ш, длина разлома 150 км, ширина 60, глубина очага 10 км, смещение по разрыву 10 м. Угол разлома с меридианом (strike) 345° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 57° и вдоль разлома (slip) 2° . Параметры второго источника (событие 1944 г.) выбраны следующими: эпицентр 32.69 в.д., 41.41 с.ш, длина разлома 120 км, ширина 60 км, глубина очага 10 км, смещение по разрыву 10 м. Угол разлома с меридианом (strike) 332° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 77° и вдоль разлома (slip) 31° . С помощью модели Окады, о которой уже неоднократно упоминалось ранее, рассчитаны начальные смещения водной поверхности (рис. 5). В частности, высота 1942 г. цунами составила 2.1 м, а 1944 г. – 3.3 м.

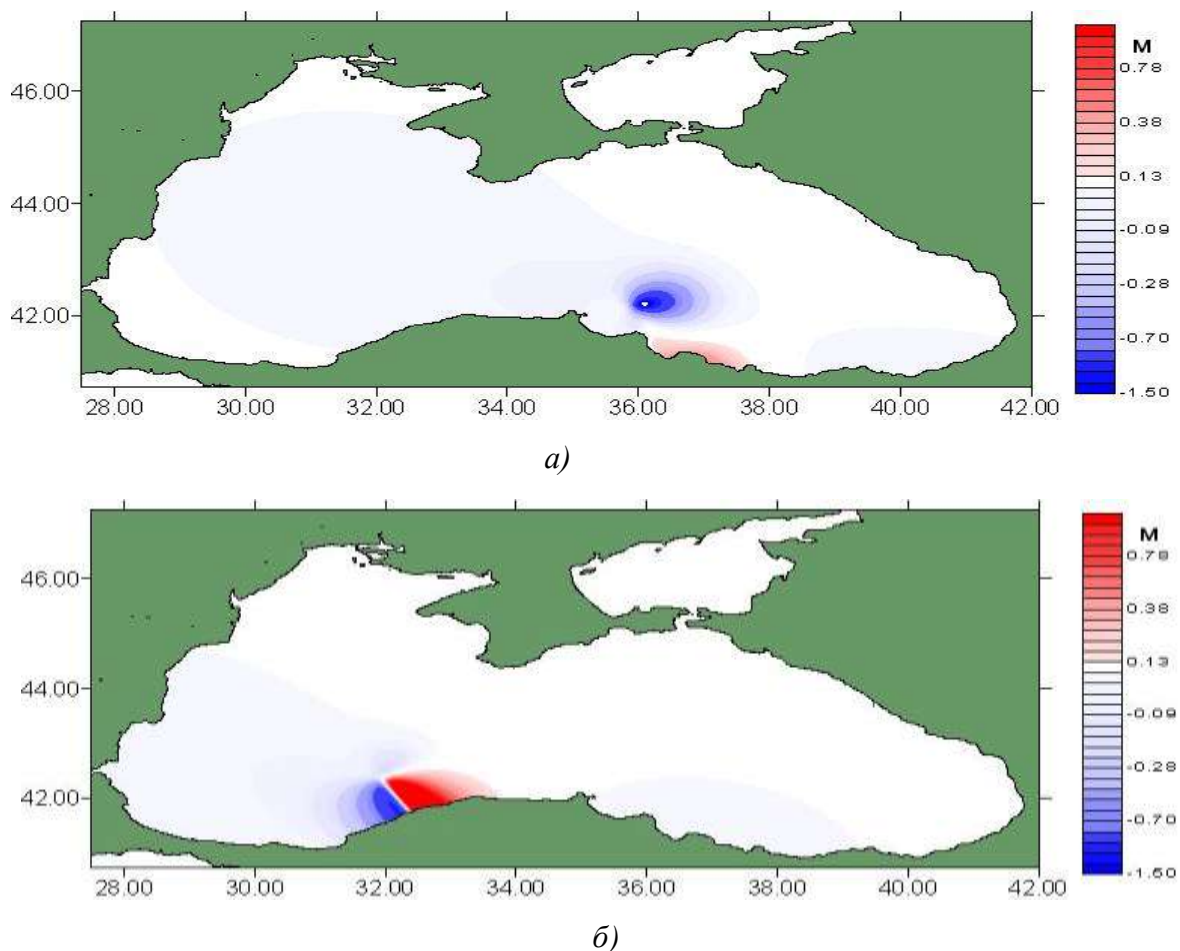


Рис. 5. Начальное смещение уровня воды в событиях 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

Распространение цунами моделировалось на протяжении 10 часов. Распределение максимальных амплитуд цунами в бассейне Черного моря (диаграмма направленности) представлено на рис. 6.

Распределение максимальных высот волн вдоль российского побережья от Новороссийска до Сочи (рис. 7) показывает, что более разрушительная сила цунами приходится на северную и центральную часть побережья. Из рисунка видно, что максимальные высоты 1.6 м получаются в районе южнее Анапы и 1.2 м в п. Дивноморское, южнее Геленджика, так же высоты 1.2–1.4 м получаются в п. Лазаревское, севернее г. Сочи.

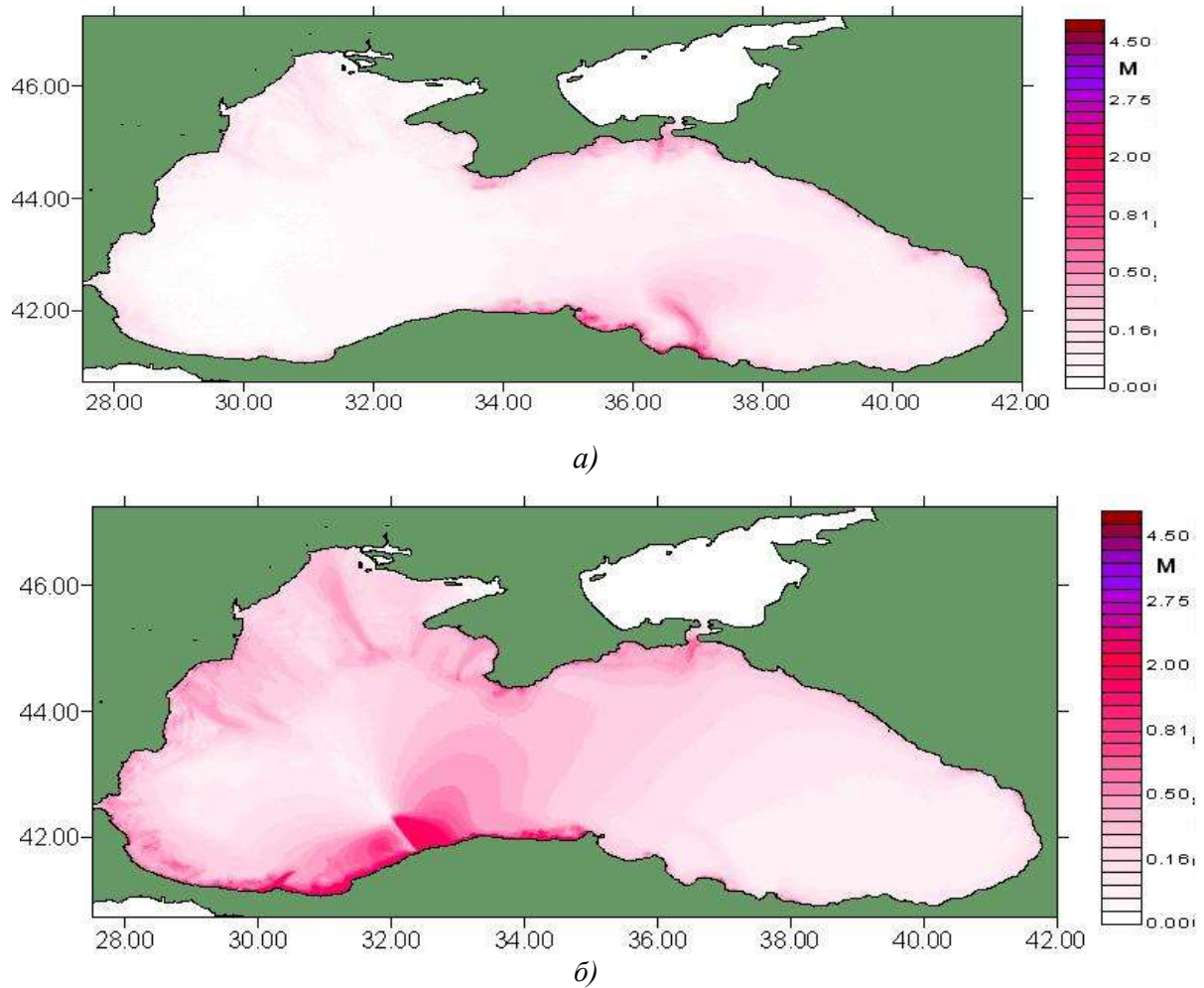


Рис. 6. Распределение максимальных амплитуд во время событий 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

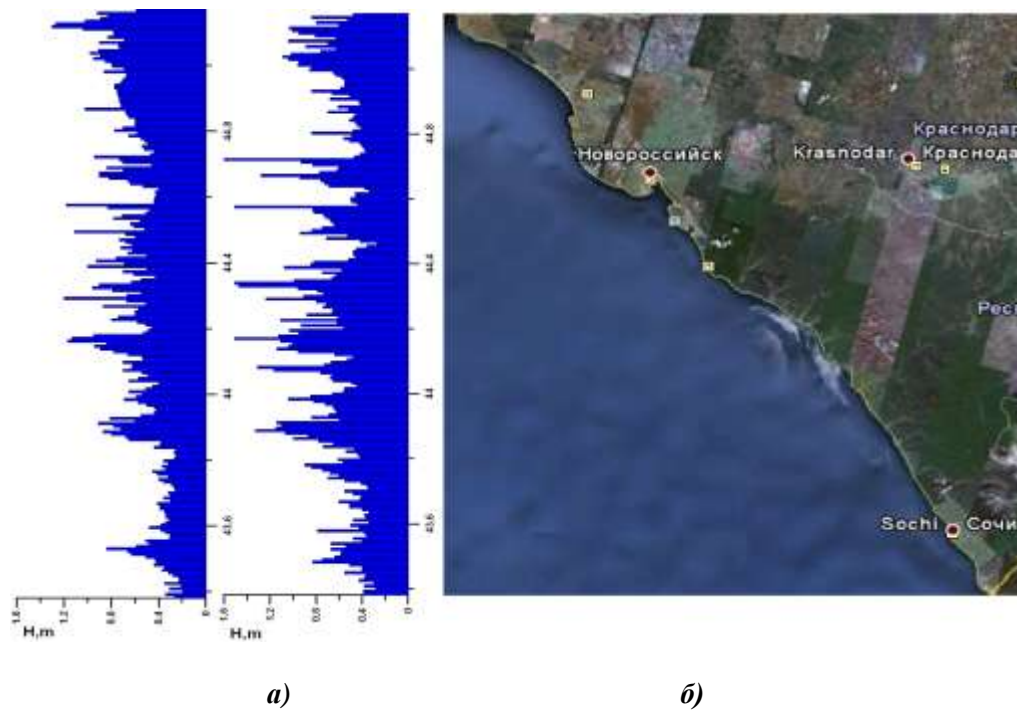


Рис. 7. Распределение высот волн вдоль российского побережья во время событий 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

3. Прогнозирование высот волн цунами на российском побережье

Результаты расчетов высот волн для основных пунктов российского побережья Черного моря представлены на рис. 8.

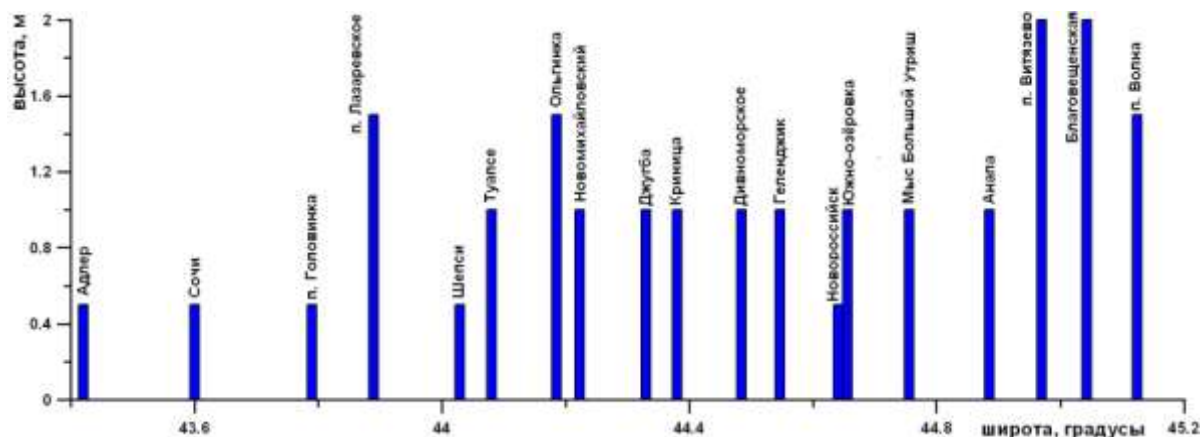


Рис. 8. Распределение прогностических высот волн цунами вдоль российского побережья Черного моря с юга на север

Как отмечалось ранее, 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-го столетия и прогностических цунами от «гидродинамических» источников, позволяющих сопоставить высоты цунами в различных пунктах. Кроме того, как уже указывалось, накат волн на берег пока не рассматривается, так что высоты волн цунами задаются в последней мористой точке примерно на глубине 5 метров. 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 метра. В дальнейшем эти цифры могут быть использованы для построения детальной схемы цунамирайонирования населенных пунктов с учетом заливания берега волнами цунами.

По-настоящему сейчас трудно оценить повторяемость прогностических высот волн цунами на российском побережье Черного моря, хотя такие попытки делались и в работе [10] повторяемость разрушительных цунами оценена в 100-500 лет. Кроме того, подчеркнем еще раз, что предлагаемые оценки высот волн цунами не включают локальные эффекты, связанные с возможностью оползневых эффектов. Они основаны только на информации об уже прошедших цунами сейсмического происхождения. Поэтому выдаваемый прогноз характеристик цунами должен рассматриваться как предварительный, который будет уточняться в дальнейшем в нескольких направлениях:

- выделение «расчетных» землетрясений с известной повторяемостью, необходимых для получения оценок повторяемости цунами;
- выделение «расчетных» оползневых явлений, ответственных за локальные цунами вблизи побережья;
- построение детальной карты цунамирайонирования с указанием зон затопления побережья волнами цунами.

Вывод

Цунами в Черном море не является экзотическим событием, и за 2000 лет произошло уже 23 события, так что повторяемость цунами оценивается примерно раз в 100 лет. На российском побережье Черного моря только за последние 100 лет произошло 7 событий, то есть в среднем одно событие в 15 лет. Отсюда видно, что опасность цунами для Черноморского

побережья России не может игнорироваться. 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, локализованных равномерно в бассейне Черного моря (55). Результаты моделирования показывают, что высоты волн цунами вдоль побережья распределены неравномерно, не превышая двух метров 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) и ГК № 02.740.11.0732.

Библиографический список

1. **Григораш, З.К.** Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Труды СахКНИИ. – Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. Вып. 29. С. 271–278.
2. **Григораш, З.К.** Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // Океанология. 1969. Т. 9. Вып. 6. С. 988–995.
3. **Григораш, З.К.** Мареографные данные о цунами в Черном море, вызванном турецким землетрясением в декабре 1939 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // Океанология. 1972. Т. 12. С. 417 – 422.
4. **Доценко, С.Ф.** Цунами в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 30. С. 513–519.
5. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // Известия АИН. Сер. Прикладная математика и механика. 2002. Т. 3. С. 27–45.
6. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
7. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // ДАН. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
8. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН РФ. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
9. **Куркин, А.А.** Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 163–172.
10. **Литвиненко, Г.И.** Параметры и характеристики низкочастотных волн сейсмического происхождения в Черном море / Г.И. Литвиненко, С.С. Стрекалов // Гидротехническое строительство. 2001. № 7. С. 5–7.
11. **Никонов, А.А.** Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96.
12. **Никонов, А.А.** Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // Известия РАН. Физика Земли. 1997. Т. 33. С. 72–87.
13. **Пустовитенко, Б.Г.** Землетрясения Крымско-Черноморского региона / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий, А.В. Горячун. – Киев: Наук. думка, 1989.
14. **Пустовитенко, Б.Г.** Сейсмичность Черноморской впадины / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий // Геофизический журнал. 1991. Т. 13. № 1. С. 14–19.
15. **Пелиновский, Е.Н.** Нелинейная динамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982.
16. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. – 276 с.
17. **Соловьева, О.Н.** Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 679–685.
18. **Храмушин, В.Н.** Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива / В.Н. Храмушин // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 218–223.

19. **Koike, N.** Far-field tsunami potential and a real-time forecast system for the Pacific using the inversion method / N. Koike, Y. Kawata, F. Imamura // *Natural Hazards*. 2003. Vol. 29. P. 423–436.
20. **Pelinovsky, E.** Preliminary estimates of tsunami danger for the northern part of the Black Sea // *Phys. Chem. Earth (A)*. 1999. Vol. 24. No. 2. P. 175–178.
21. **Pelinovsky, E.** Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. Tsunamis: case studies and recent developments / E. Pelinovsky [et al.] // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Vol. 23. Springer. 2005. P. 57-77.
22. **Rabinovich, A.B.** The 26 December 2004 Sumatra Tsunami: Analysis of Tide Gauge Data from the World Ocean Part 1. Indian Ocean and South Africa / A.B. Rabinovich, R.E. Thomson // *Pure and Applied Geophysics*. 2007. Vol. 164. P. 261–308.
23. **Ranguelov, B.** The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide? / B. Ranguelov [et al.] // *Geophys. Research Letters*. 2007. Vol. 35. L18613, doi: 10.1029/2008GL034905.
24. **Sato, H.** Study on a simplified method of tsunami risk assessment H. Sato [et al.] // *Natural Hazards*. 2003. Vol. 29. P. 325–340.
25. **Vilibic, I.** Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event / I. Vilibic [et al.] // *J. Geophys. Research*. 2010. Vol. 115, C07006, doi: 10.1029/2009JC005904.
26. **Yalciner, A.** Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // *J. Geophys. Research*. 2004. Vol. 109, No. C12, C12023 10.1029/2003JC002113.

*Дата поступления
в редакцию 28.02.2011*

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

THE FORECAST OF THE TSUNAMI WAVES HEIGHTS AT THE RUSSIAN BLACK SEA COAST

In the present work the forecasting of tsunami heights for Russian 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 Russian coast of the Black Sea.

Key words: Tsunami, Numerical modeling, Black sea.