

С. Ф. Доценко, А. В. Ингеро́в

Спектры черноморских цунами

Выполнен анализ временных спектров четырех цунами в Черном море, вызванных землетрясениями 26.06.1927 г., 11.09.1927 г., 26.12.1939 г. и 12.07.1966 г. При расчете спектров использованы оцифрованные мареограммы для 12 пунктов Черноморского побережья. Полученные спектры являются, как правило, многомодовыми и имеют 1 – 4 спектральных максимума. Один из максимумов располагается на периодах, характерных для волн цунами, а остальные соответствуют более низкочастотным колебаниям уровня моря. Вероятно, явление цунами сопровождалось низкочастотными колебаниями уровня, связанными с атмосферными воздействиями, сейшмами или другими факторами. В ряде случаев энергетически доминирующие колебания лежат вне традиционного диапазона периодов волн цунами.

Введение. Цунамиопасность Черного моря значительно ниже, чем, например, в Тихом океане, Карибском бассейне или Средиземном море [1]. Хотя в Черноморском бассейне наблюдались цунами, в том числе и разрушительные, повторяемость событий, ощутимо влияющих на социально-экономическую ситуацию в прибрежных районах моря, здесь невелика и составляет десятки и сотни лет. Имеющийся объем измерений колебаний уровня в период черноморских цунами с приемлемой для анализа временной дискретностью очень незначителен. В то же время уровень сейсмоактивности Черноморской впадины и мировой опыт исследований по проблеме цунами не позволяют исключить возможность возбуждения разрушительных цунами в Черном море сейсмическими и/или оползневыми источниками генерации.

Существует весьма ограниченный объем данных инструментальных наблюдений за сейсмогенными колебаниями уровня Черного моря в различных пунктах украинского, российского и грузинского участков побережья. Обобщенная описательная информация и количественные характеристики зафиксированных волн цунами приведены в работах [2 – 7].

В статье [7] выполнена ревизия и уточнены количественные характеристики черноморских цунами в различных точках побережья. Также представлены некоторые дополнительные параметры колебаний уровня моря во время цунами. Этот анализ потребовал оцифровки имеющихся мареограмм. Полученные временные реализации используются ниже для расчета и анализа временных спектров колебаний уровня Черного моря, сопутствующих цунамигенным землетрясениям 1927, 1939 и 1966 гг. Спектры некоторых черноморских цунами также рассматривались в работе [8] с целью определения периодов доминирующих волн цунами.

Информационная база и методика анализа. Наибольший интерес для оценки параметров цунами у побережья Черного моря представляют те исторические события, во время которых колебания уровня моря были зарегистри-

рированы мареографами, что позволяет количественно оценивать характеристики волнового процесса.

В настоящее время для Черноморского региона известно четыре инструментально зарегистрированных события. Первые два из них сопутствовали подводным землетрясениям 26 июня и 11 сентября 1927 г. к юго-западу и югу от Южного берега Крыма с магнитудами 5,5 и 6,5 соответственно. Третье было вызвано разрушительным Эрзинджанским землетрясением 26 декабря 1939 г. ($M = 7,9 - 8,0$) с эпицентром на суше на расстоянии 60 км от южного побережья Черного моря. Наконец, четвертое событие связано с подводным землетрясением 12 июля 1966 г. ($M = 5,8$) с эпицентром у восточного побережья Черного моря в 10 км от Анапы.

В работах [9 – 13] приведены мареограммы и даны некоторые количественные оценки параметров цунами. Все события зарегистрированы несколькими мареографами, установленными вдоль крымского и кавказского участков побережья Черного моря, и также описаны очевидцами. Все имеющиеся записи колебаний уровня моря для этих исторических событий представлены в работе [7].

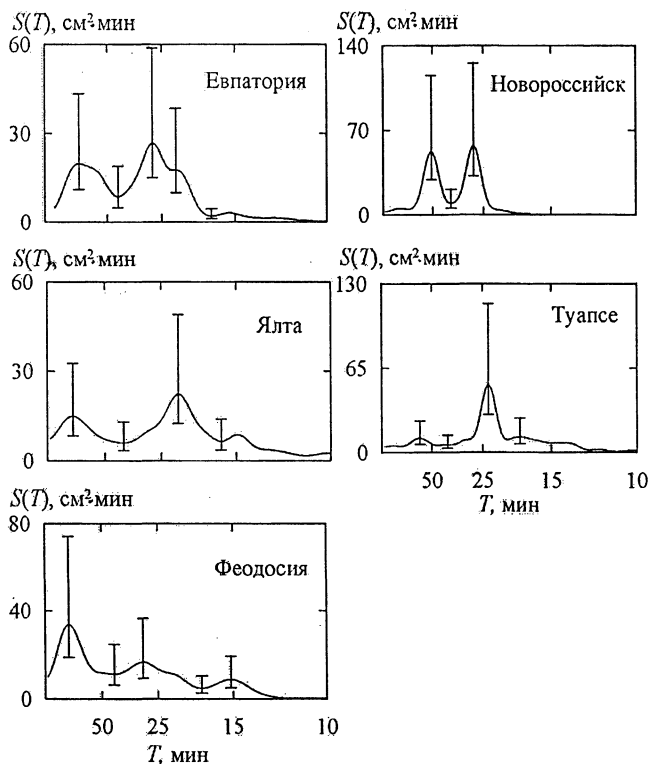
Для анализа спектров черноморских цунами использованы временные ряды смещений уровня моря $z(t)$, полученные на основе обработки сканированных исходных мареограмм путем применения специальной компьютерной процедуры [7]. Из оцифрованных мареограмм осуществлялось исключение долгопериодных изменений (трендов) уровня моря $z_0(t)$ в виде полиномов пятой степени, коэффициенты которых находились методом наименьших квадратов. Временные ряды $\zeta(t) = z(t) - z_0(t)$, полученные путем исключения из $z(t)$ низкочастотных составляющих $z_0(t)$, с временным шагом $\Delta t = 1$ мин имели в различных пунктах побережья длины от 600 до 1000 точек. Именно они использованы для расчета энергетических спектров волн цунами.

Для расчета оценок спектров мощности применена стандартная методика, изложенная, например, в [14, 15]. Ее программная реализация использует расчет автокорреляционной функции по временному ряду $\zeta(t)$ длительностью T , коррекцию этой функции с помощью корреляционного окна Парзена с точкой отсечки $M = T/5$ и, наконец, вычисление самой оценки нормированной спектральной плотности. Одновременно с расчетом спектра мощности производилось вычисление 95%-ных доверительных интервалов с числом степеней свободы $\nu = 3,71T/M$ [14], которое в рассмотренных случаях равно 18.

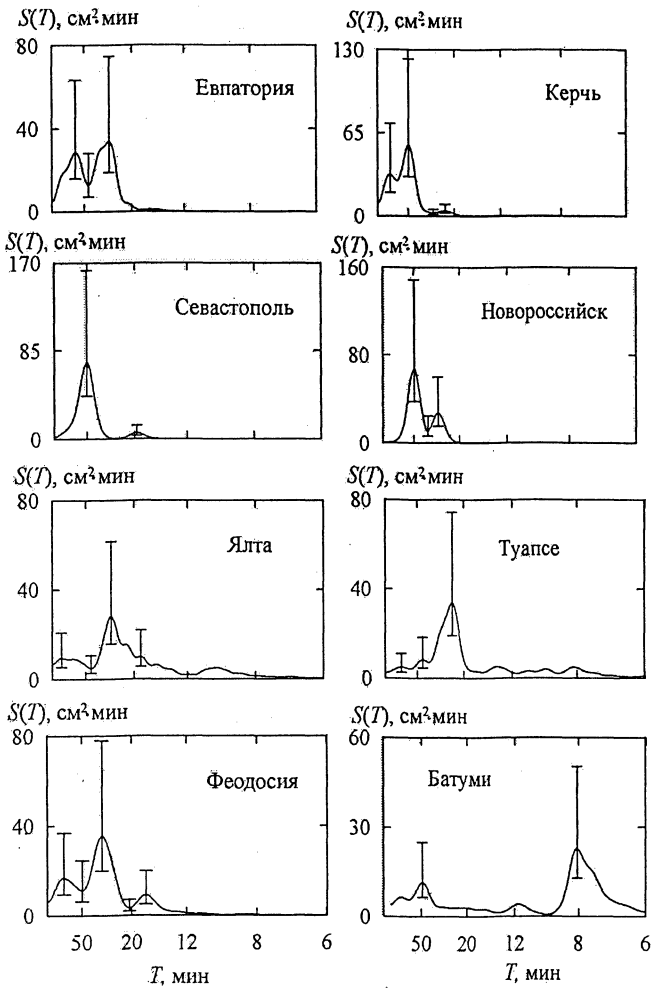
Для анализа вклада колебаний различных частот в изменения уровня моря использовалось восстановление исходных рядов по оценкам спектра из заданного частотного диапазона. Для этого с помощью дискретного преобразования Фурье находились амплитудные и фазовые спектры смещений уровня моря $\zeta(t)$. По энергетическим спектрам волн цунами выделялись частот-

ные диапазоны $[f_1, f_2]$ с локальными максимумами спектральной плотности мощности, а затем с помощью обратного дискретного преобразования Фурье выполнялось восстановление временных колебаний уровня для этих диапазонов частот. Сопоставление исходных и восстановленных таким способом мареграмм позволяет оценить вклад в колебания уровня моря во время цунами волновых составляющих из различных частотных диапазонов.

Результаты спектрального анализа. Временные спектры колебаний уровня моря, соответствующие моментам времени перед и во время цунами, были рассчитаны для четырех перечисленных выше цунамигенных землетрясений в береговых пунктах Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Керчь, Опасное, Мариуполь, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Поти и Батуми. Спектры мощности $S = S(T)$ (T – период волны) для цунами в этих пунктах приведены на рис. 1 – 4. Как правило, они являются многомодовыми и характеризуются наличием от одного до четырех максимумов, соответствующих периодам колебаний уровня Черного моря 8 – 90 мин. Можно ожидать, что многомодовая структура спектров обусловлена существованием во время цунами низкочастотных колебаний уровня, связанных не с землетрясениями, а с другими факторами, например с атмосферными процессами, сейшмами или топографическими эффектами.



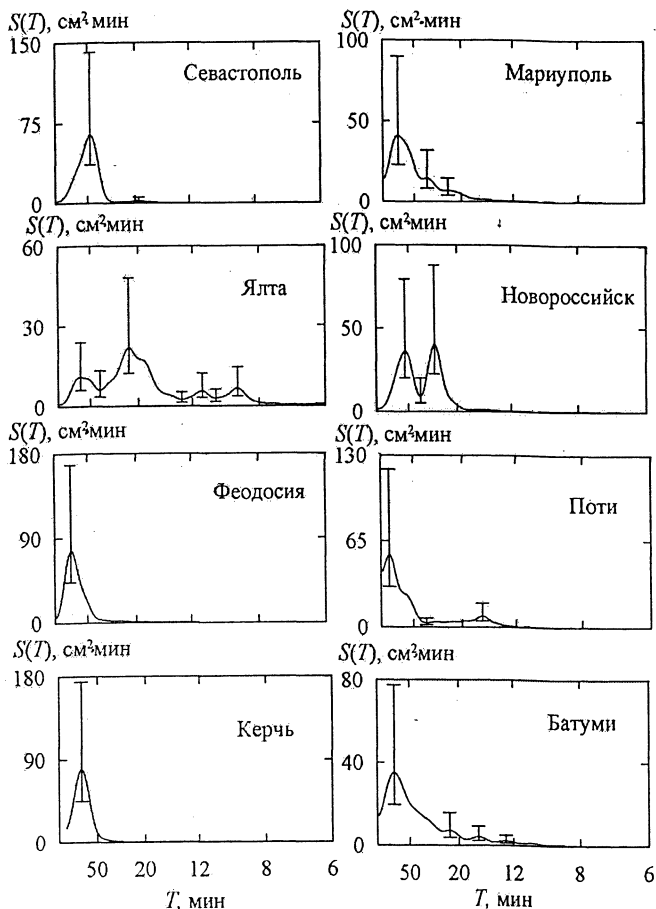
Р и с. 1. Временные спектры цунами 26.06.1927 г. для различных пунктов побережья Черного моря



Р и с. 2. То же для цунами 11.09.1927 г.

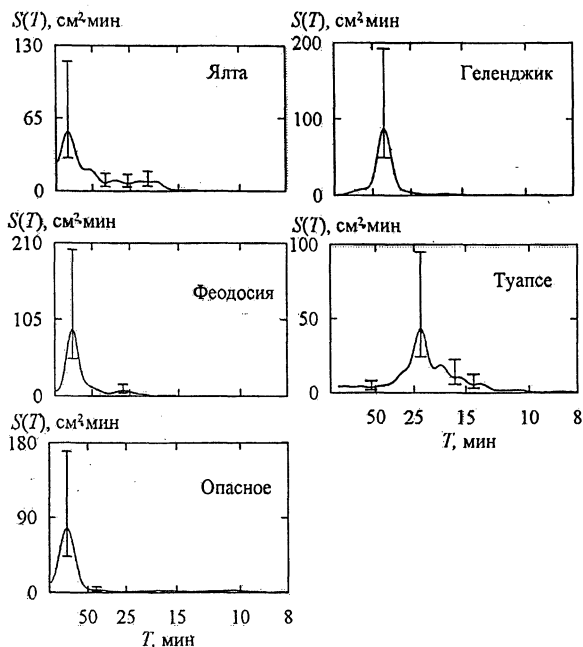
Сопоставление рассчитанных спектров показывает, что для всех цунами-генных землетрясений они имеют, как правило, качественно одинаковую форму в одних и тех же пунктах Черноморского побережья. Наиболее близки по своей форме спектры колебаний уровня моря в пп. Евпатория, Ялта, Феодосия, Новороссийск и Туапсе.

Обобщенные данные о высотах всех инструментально зарегистрированных черноморских цунами содержатся в работе [7]. Наибольшие высоты волн цунами наблюдались в Евпатории (52 см), Севастополе (51 см), Новороссийске (47 см), Геленджике (41 см) и Ялте (37 см). Как следует из рис. 2 – 4, не существует прямого соответствия между географическими районами с максимальной высотой волн цунами и пунктами побережья с максимальными значениями спектральной плотности энергии.



Р и с. 3. То же для цунами 26.12.1939 г.

Характерные периоды волн цунами в Мировом океане, по теоретическим оценкам, лежат в диапазоне 5 – 20 мин [1]. Как следует из рассчитанных спектральных оценок, только один локальный максимум (обычно высокочастотный) располагается на периодах, которые характерны для волн цунами или близки к ним, а остальные спектральные пики соответствуют более низкочастотным колебаниям уровня моря. В то же время существуют пункты побережья, например Феодосия (рис. 1), Севастополь (рис. 2), Феодосия, Керчь, Потти и Батуми (рис. 3), Ялта, Феодосия и Опасное (рис. 4), для которых энергетически доминирующие максимумы спектров отдельных событий лежат вне традиционного для волн цунами диапазона периодов. В целом спектральные максимумы, попадающие в диапазон характерных для цунами периодов волн, наиболее часто встречаются во время двух цунами 1927 г. Периоды энергонесущих волн цунами 1939 и 1966 гг. превышают величины, традиционные для подобных волн в целом.



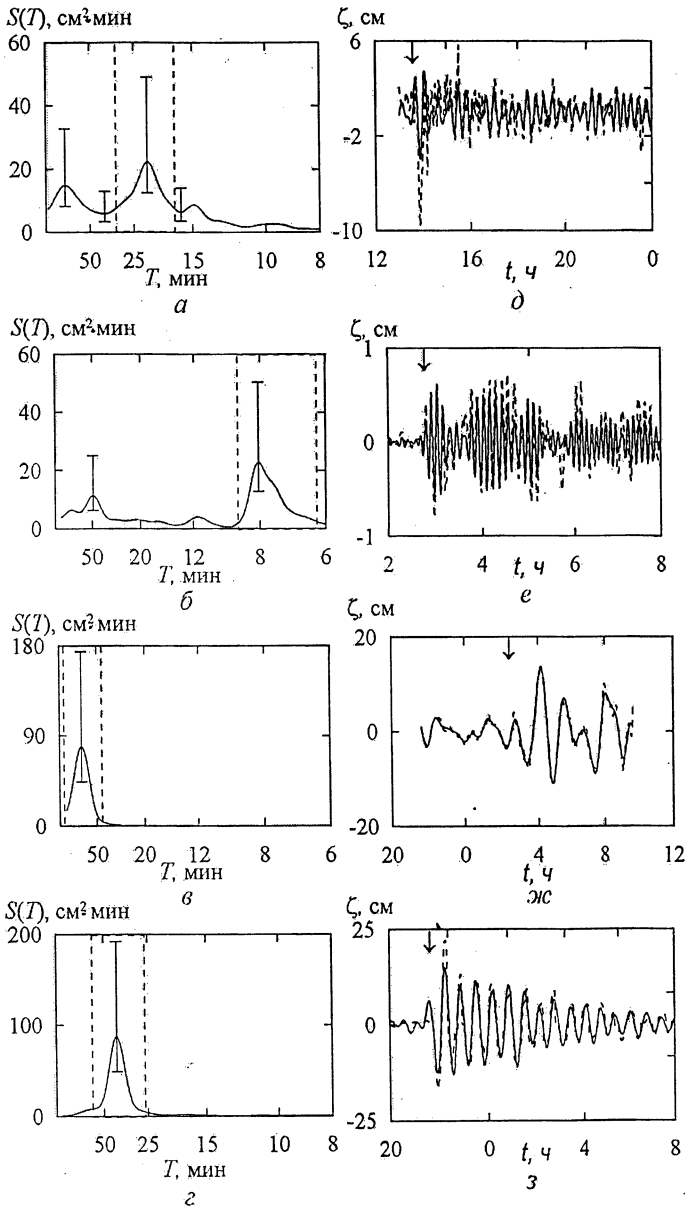
Р и с. 4. То же для цунами 12.07.1966 г.

Отметим близость форм спектров волн в Новороссийске и Туапсе для всех цунамигенных землетрясений, хотя географическое положение источников их сейсмической генерации принципиально различно. Поэтому нельзя исключать из рассмотрения возможность возбуждения в этих районах цунами подводными оползнями, образование которых вдоль Кавказского побережья Черного моря весьма вероятно [16].

На рис. 5 представлены некоторые результаты вычислительных экспериментов по восстановлению колебаний уровня моря по спектральным данным из заданного интервала частот $[f_1, f_2]$. Фактически это означает проверку возможности моделирования нерегулярных смещений уровня моря в период цунами посредством линейных суперпозиций гармонических колебаний с частотами из указанного выше диапазона. Выбор границ частотного диапазона зависит от необходимого качества восстановления исходного сигнала и требует проведения соответствующих вычислений. Заметим, что применение такого алгоритма ко всему спектру позволяет полностью восстановить исходную мареограмму, что и было подтверждено вычислительными экспериментами.

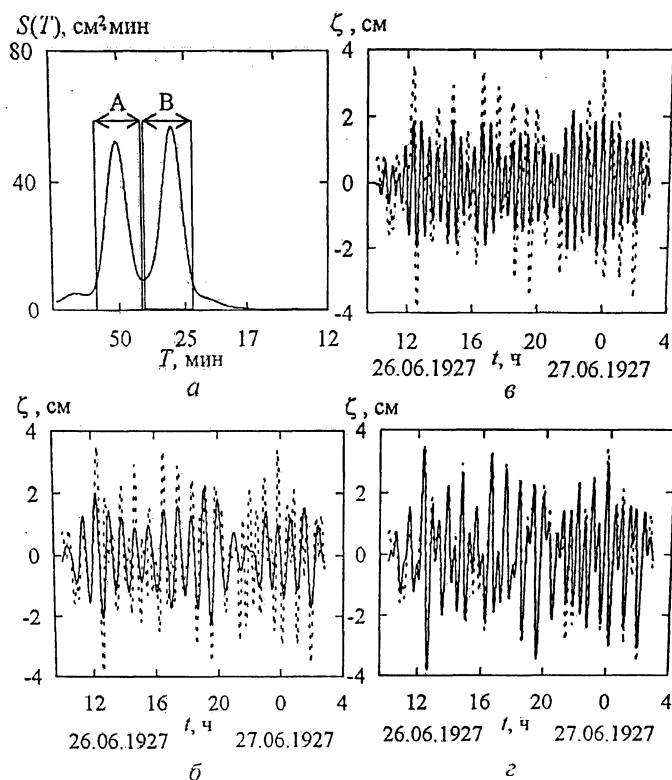
В соответствии с рис. 5 использование для восстановления колебаний уровня интервалов частот, охватывающих доминирующие спектральные пики, позволяет воспроизводить основные черты волн цунами вне зависимости от того, является ли спектр колебаний уровня одномодовым или многомодовым. К характеристикам волнового процесса, которые удастся уверенно воспроизвести с использованием только данных из окрестности доминирующего спектрального пика, можно отнести переход от фонового режима колебаний

к волнам цунами (рис. 5, е, з), доминирующие частоты волн, пакетную структуру волнового поля (рис. 5, е), временное затухание волн цунами (рис. 5, з). В то же время учет энергетически менее значимых спектральных пиков необходим для правильной оценки экстремальных высот волн цунами (рис. 5, д, з).



Р и с. 5. Временные спектры с 95%-ными доверительными интервалами (*a* – *г*) и восстановленные по ним колебания уровня моря (*д* – *з*): *a*, *д* – Ялта (26.06.1927 г.); *б*, *е* – Батуми (11.09.1927 г.); *в*, *ж* – Керчь (26.12.1939 г.); *г*, *з* – Геленджик (12.07.1966 г.). На рисунках *д* – *з* пунктирные линии – исходные временные ряды, сплошные – мареограммы, восстановленные по участкам соответствующих спектров между вертикальными пунктирными линиями; моменты начала цунами отмечены вертикальными стрелками

Весьма показателен в этом отношении рис. 6, иллюстрирующий восстановление волн цунами по двухмодовому энергетическому спектру колебаний уровня моря (рис. 6, а). Как следует из сравнения рис. 6, б и 6, в, восстановление колебаний уровня с использованием только одного из спектральных максимумов (А или В) не позволяет качественно воспроизводить частоту и высоту волн цунами. Можно утверждать, что нерегулярные колебания уровня в районе Новороссийска во время цунами 26 июня 1927 г. формируются из двух основных составляющих различной частоты. Весьма вероятно, что спектральный максимум, характеризуемый наименьшей частотой, обусловлен фоновой изменчивостью уровня моря, а высокочастотный соответствует волнам цунами.



Р и с. 6. Временной спектр волн цунами в Новороссийске 26.06.1927 г. (а) и восстановленные колебания уровня моря с учетом только низкочастотного максимума А (б), только высокочастотного максимума В (в) и обоих максимумов (г). На рис. б – г пунктирные линии – исходные, сплошные линии – соответствующие восстановленные мареограммы

Заключение. Цунамиопасность Черноморского побережья изучена недостаточно полно в силу низкой повторяемости сильных событий и недостаточного для анализа объема данных измерений. Только четыре события XX в. с высотами волн до 52 см были зарегистрированы мареографами на крымском и кавказском участках морского побережья.

Имеющиеся данные инструментальных наблюдений проанализированы не достаточно полно, хотя основные характеристики цунами неоднократно приводились в литературе с различной степенью детализации. В статье [7]

выполнена ревизия количественных характеристик черноморских цунами в различных точках побережья. Не обнаружено принципиальных различий с опубликованными ранее параметрами волн. Наиболее слабое место таких исследований – оценки периодов волн. Их обоснованные значения можно получить, анализируя временные спектры колебаний уровня моря. Этот подход был использован в работе [7]. В то же время детальный анализ спектральных характеристик волн цунами ранее не проводился. Такой шаг сделан в настоящей работе с использованием оцифрованных мареграмм для четырех исторических цунами, вызванных землетрясениями 26.06. и 11.09.1927 г., 26.12.1939 г. и 12.07.1966 г. Анализ охватывает 12 береговых пунктов Черноморского побережья.

Показано, что энергетические спектры колебаний уровня Черного моря во время цунами характеризуются наличием от одного до четырех максимумов, соответствующих периодам колебаний 8 – 90 мин. Наиболее вероятно, что с волнами цунами связаны высокочастотные пики спектров. Можно ожидать, что явлению цунами во многих случаях сопутствовали низкочастотные колебания уровня, связанные с атмосферными процессами, сейшмами или другими факторами. В ряде случаев энергетически доминирующие колебания лежат вне традиционного диапазона периодов волн цунами.

Сопоставление рассчитанных спектров волн выявило их качественно одинаковую форму для одних и тех же пунктов Черноморского побережья, что наиболее ярко выражено для Евпатории, Ялты, Феодосии, Новороссийска и Туапсе. Нет прямой зависимости между географическими районами, где наблюдались волны цунами максимальной высоты, и пунктами побережья, где максимальна спектральная плотность энергии колебаний уровня моря.

Обнаружена близость форм спектров волн цунами в пп. Новороссийск и Туапсе для всех цунамигенных землетрясений, хотя географическое положение их эпицентров принципиально различно. Нельзя исключать возможность генерации цунами в этих районах подводными оползнями.

Знание временных спектров позволяет восстанавливать колебания уровня моря. Анализ показал, что использование для этой цели интервалов частот, охватывающих доминирующие спектральные пики, позволяет воспроизводить основные черты волн цунами вне зависимости от того, является ли спектр колебаний уровня одномодовым или многомодовым. В то же время учет энергетически менее значимых спектральных пиков необходим для правильной оценки экстремальных высот волн цунами и уточнения их периодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мурти Т.С.* Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 447 с.
2. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Цунами в Черном море // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – С-Пб.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 352 – 354.
3. *Доценко С.Ф.* Черноморские цунами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1994. – 30, № 4. – С. 513 – 519.
4. *Никонов А.А.* Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. – 1997. – № 1. – С. 86 – 96.

5. Соловьева О.Н., Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В. Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // *Океанология*. – 2004. – 44, № 5. – С. 679 – 685.
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, C12023, doi: 10.1029/2003JC002113. – 13 p.
7. Доценко С.Ф., Ингеров А.В. Характеристики черноморских цунами по данным измерений // *Морской гидрофизический журнал*. – 2007. – № 1. – С. 21 – 31.
8. Rungelov B., Spasov E., Dotsev N., Pavlov I. Spectra of tsunamis in the Black Sea // *Bulg. Geophys. J.* – 1987. – 8, № 1. – P. 53 – 58 (in Bulgarian).
9. Григораиш З.К. Черноморские цунами 1927 г. по мареографическим записям // *Тр. МГИ АН СССР*. – 17. – М.: АН СССР, 1959. – С. 59 – 67.
10. Григораиш З.К. Распространение цунами 1927 г. в Черном море // *Там же*. – 1959. – 18. – С. 113 – 116.
11. Григораиш З.К., Корнева Л.А. Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // *Океанология*. – 1969. – 9, вып. 6. – С. 988 – 995.
12. Григораиш З.К., Корнева Л.А. Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. // *Океанология*. – 1972. – 12, вып. 3. – С. 417 – 422.
13. Григораиш З.К. Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // *Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР*. – Ю.-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. – Вып. 29. – С. 271 – 278.
14. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1971. – Вып. 1. – 316 с.
15. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1972. – Вып. 2. – 287 с.
16. Хромовских В.С., Никонов А.А. По следам сильнейших землетрясений. – М.: Наука, 1984. – 144 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 05.04.06

ABSTRACT Frequency spectra of four tsunamis in the Black Sea induced by the earthquakes in June 26, 1927, September 11, 1927, December 26, 1939 and July 12, 1966 are analyzed. The digitized marigrams for 12 points on the Black Sea coast are used in spectra calculations. As a rule, the obtained spectra are multimode with 1 – 4 maximums. One of the peaks corresponds to the period characteristic of tsunami waves, whereas the rest ones – to the low-frequency sea level oscillations. A tsunami phenomenon is, most likely, accompanied by low frequency sea level oscillations concerned with the atmospheric forcing, seiches or other factors. In some cases the energy-dominating oscillations are beyond the traditional range of tsunami waves.