

# *Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана*

УДК 551.466.62

С.Ф. Доценко, А.В. Ингерев

## **Характеристики черноморских цунами по данным измерений**

Дана общая характеристика волн цунами в Черном море. Выполнена ревизия количественных характеристик четырех исторических событий с использованием оцифрованных мареограмм и их спектрального анализа. Как правило, цунами характеризуются первоначальным подъемом уровня моря, а первая волна не является наибольшей по высоте. Максимальные высоты зарегистрированных цунами в точках наблюдения не превышают 52 см. Для большинства пунктов побережья видна заметная тенденция к увеличению высот волн с ростом магнитуды землетрясения. Характерные периоды волн цунами и фоновой изменчивости уровня моря лежат в диапазонах 8 – 39 мин и 28 – 193 мин соответственно.

**Введение.** Наиболее подвержены сильным цунами прибрежные и островные территории Тихого и Индийского океанов, Средиземного моря, Восточной Атлантики, Карибского бассейна и ряда других районов Мирового океана [1]. Цунамиопасность Мраморного, Черного, Азовского и Каспийского морей средиземноморского пояса значительно ниже [2 – 5]. Хотя в перечисленных морях наблюдались цунами и родственные им волновые явления, повторяемость сильных событий здесь невелика (десятки и сотни лет), а имеющийся объем инструментальных регистраций колебаний уровня во время цунами очень мал. В то же время уровень сейсмоактивности районов расположения указанных морских бассейнов не позволяет исключить генерацию здесь сильных цунами при подводных землетрясениях.

Мареографические записи цунами в Мраморном, Азовском и Каспийском морях отсутствуют. Что касается Черного моря, то для него существуют инструментальные данные о колебаниях уровня моря в различных пунктах украинского, российского и грузинского участков побережья, вызванных землетрясениями в регионе. Обобщенные характеристики этих цунами приведены в работах [6 – 9].

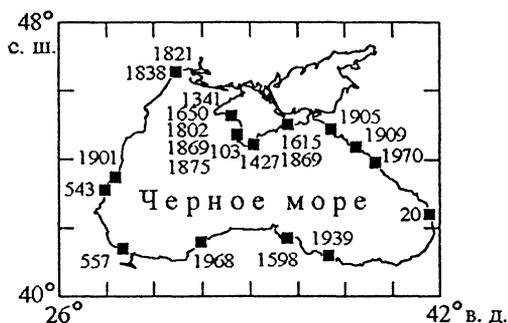
В данной статье выполнена ревизия количественных характеристик четырех черноморских цунами с использованием оцифрованных мареограмм и спектральных методов анализа временных рядов, а также представлены некоторые дополнительные параметры колебаний уровня моря при цунами.

**Информационная база о цунами в Черном море.** Все известные в настоящее время черноморские цунами можно условно разделить на две группы. Первая из них включает те события, которые в силу исторической давности

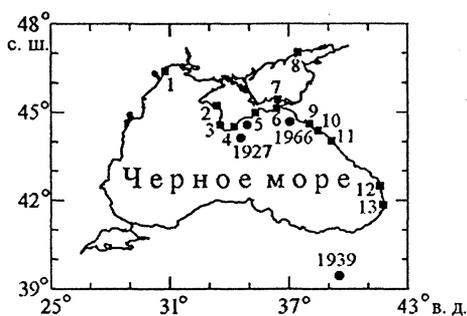
© С.Ф. Доценко, А.В. Ингерев, 2007

сти, удаленности зон проявления от гидрометеопостов или иных причин не были зарегистрированы инструментально, но описаны очевидцами, отмечены как разрушительные или значимые события для населения прибрежных районов в летописях и легендах. Во вторую группу входят события, при которых аномальные колебания уровня моря во время цунами были зафиксированы стандартными мареографами.

Даты и пункты проявления черноморских цунами, отнесенных к первой группе событий, показаны на рис. 1. Карта включает 21 цунами за последние две тысячи лет [3, 7, 10 – 13]. События характеризуются различной степенью достоверности, а именно, от возможных событий, относящихся в первую очередь к древним временам, до исторических событий, не вызывающих сомнения. Вопрос достоверности информации о черноморских цунами первой группы с использованием шкалы надежности данных, предложенной в [2], обсуждался в статье [3].



Р и с. 1. Пункты (■) и годы наблюдения цунами вдоль побережья Черного моря без инструментальной регистрации колебаний уровня



Р и с. 2. Эпицентры цунамигенных землетрясений (обозначены ●) и пункты регистрации (■) соответствующих им цунами: 1 – Одесса, 2 – Евпатория, 3 – Севастополь, 4 – Ялта, 5 – Феодосия, 6 – Керчь, 7 – Опасное, 8 – Мариуполь, 9 – Новороссийск, 10 – Геленджик, 11 – Туапсе, 12 – Поты, 13 – Батуми

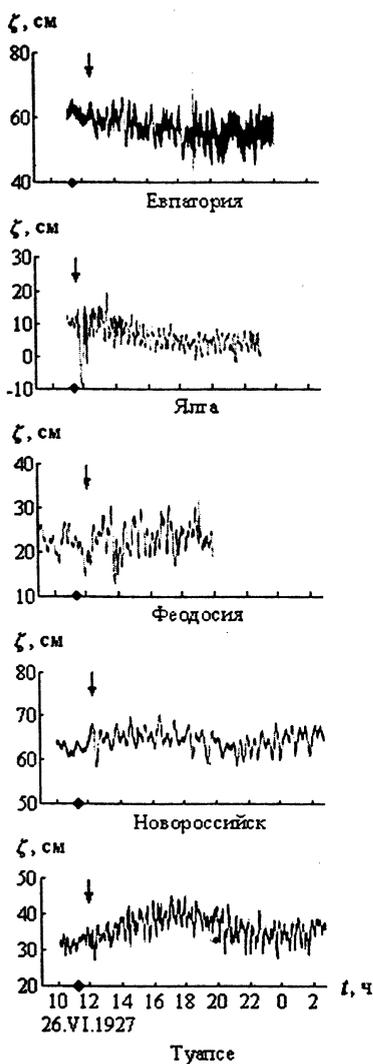
Цунами наблюдались вдоль всего побережья Черного моря. Подавляющая часть из них была вызвана землетрясениями с эпицентрами в море, некоторые генерировались землетрясениями на суше. Исторические свидетельства позволяют говорить о том, что цунами в районах Сухуми (20 г.), Севастополя (103 г.), Варны (543 г.), Босфора (557 г.), Евпатории (1341 г.), Фороса (1427 г.), у восточного побережья Черного моря (1909 г.) и на севере Турции (1598 г.) носили катастрофический характер с высотами волн до 2 – 3 м. Значительные колебания уровня моря у берега при этих событиях приводили к затоплению обширных территорий и сопровождалась ощутимым экономическим ущербом.

Наибольший интерес для количественной оценки параметров черноморских цунами у побережья представляет вторая группа исторических событий, когда волны были зарегистрированы инструментально. Известно четыре таких события и одно из них (1939 г.) уже было включено в первую группу ис-

торических цунами. Явление сопутствовало подводным землетрясениям 26 июня 1927 г. и 11 сентября 1927 г. к юго-западу и югу от Южного берега Крыма с магнитудами  $M = 5,5$  и  $6,5$  соответственно, разрушительному Эрзинджанскому землетрясению 26 декабря 1939 г. ( $M = 7,9 - 8,0$ ) с эпицентром на суше в 60 км от северо-восточного побережья Турции и подводному землетрясению 12 июля 1966 г. ( $M = 5,8$ ) в районе Анапы у восточного побережья Черного моря. Эпицентры этих землетрясений указаны на рис. 2.

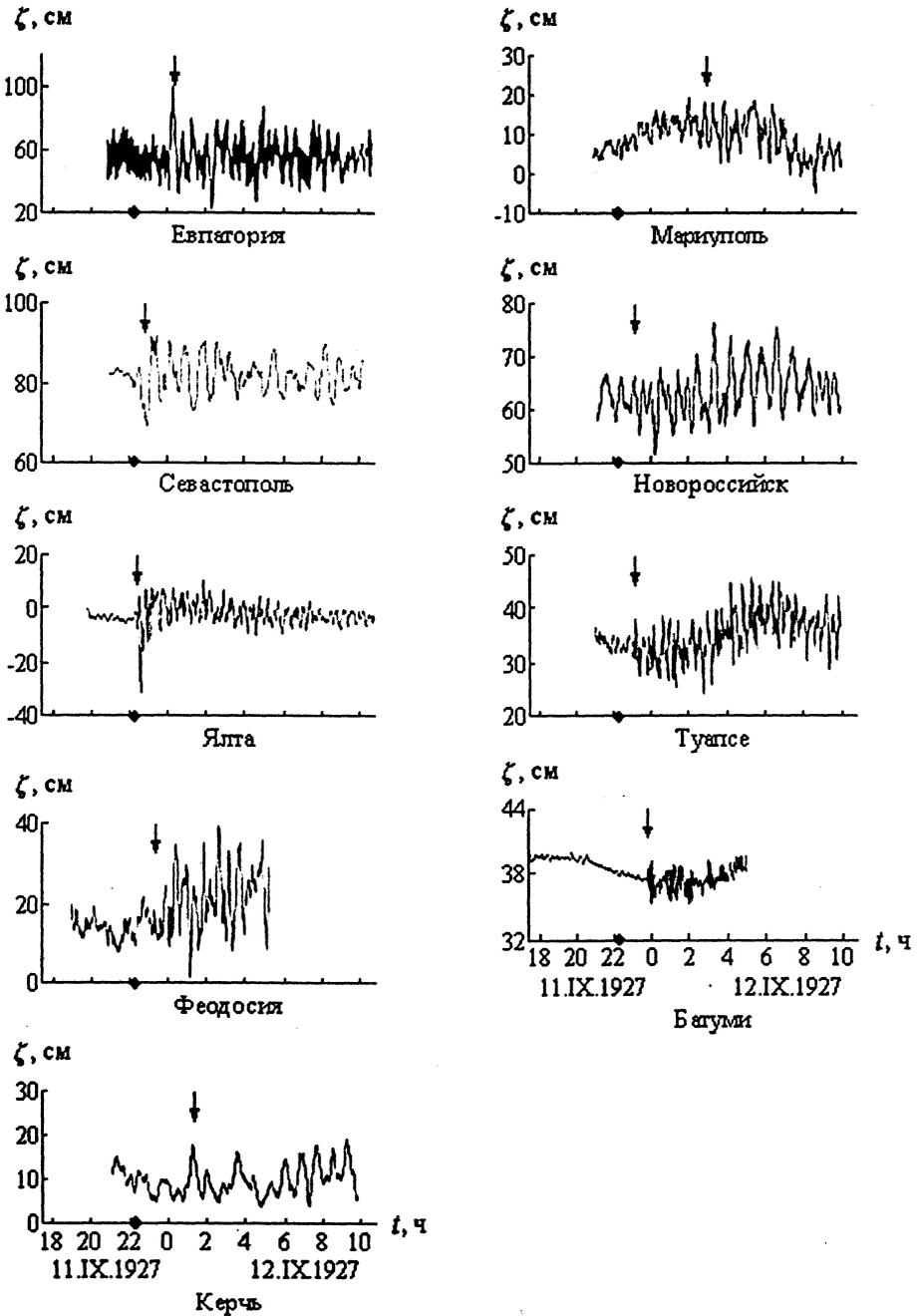
В работах [9, 14 – 17] приведены мареограммы и даны количественные характеристики этих цунами. Все события зарегистрированы несколькими мареографами вдоль крымского и кавказского участков побережья Черного моря. Пункты регистрации цунами на побережье моря указаны на рис. 2. Записи колебаний уровня Черного моря для этих событий представлены на рис. 3 – 6.

Приведенные мареограммы позволяют сделать ряд общих выводов относительно свойств черноморских цунами, отражающих специфику Черного моря как ограниченного бассейна сравнительно малой горизонтальной протяженности. Явление цунами наблюдалось вдоль всего побережья Черного моря. Волны возбуждались как подводными землетрясениями, так и землетрясениями на суше. Во многих случаях колебания уровня носили нерегулярный характер, представляли собой наложение волн с различными характерными частотами. В ряде случаев они были модулированы по амплитуде. Можно предположить многократное отражение волн цунами от берегов Черного моря, что косвенно подтверждается усилением колебаний уровня после периодов относительного затишья и наоборот. Отмечено прохождение цунами 11 сентября 1927 г., 26 декабря 1939 г. и 12 июля 1966 г. из Черного в Азовское море через сравнительно узкий Керченский пролив: отголоски этих цунами зарегистрированы в пунктах Опасное и Мариуполь в Азовском море [9]. Крымский п-ов частично экранирует волны зонального направления. Так, в Одессе отмечены только слабые отголоски одного из зарегистрированных цунами [9]. Это

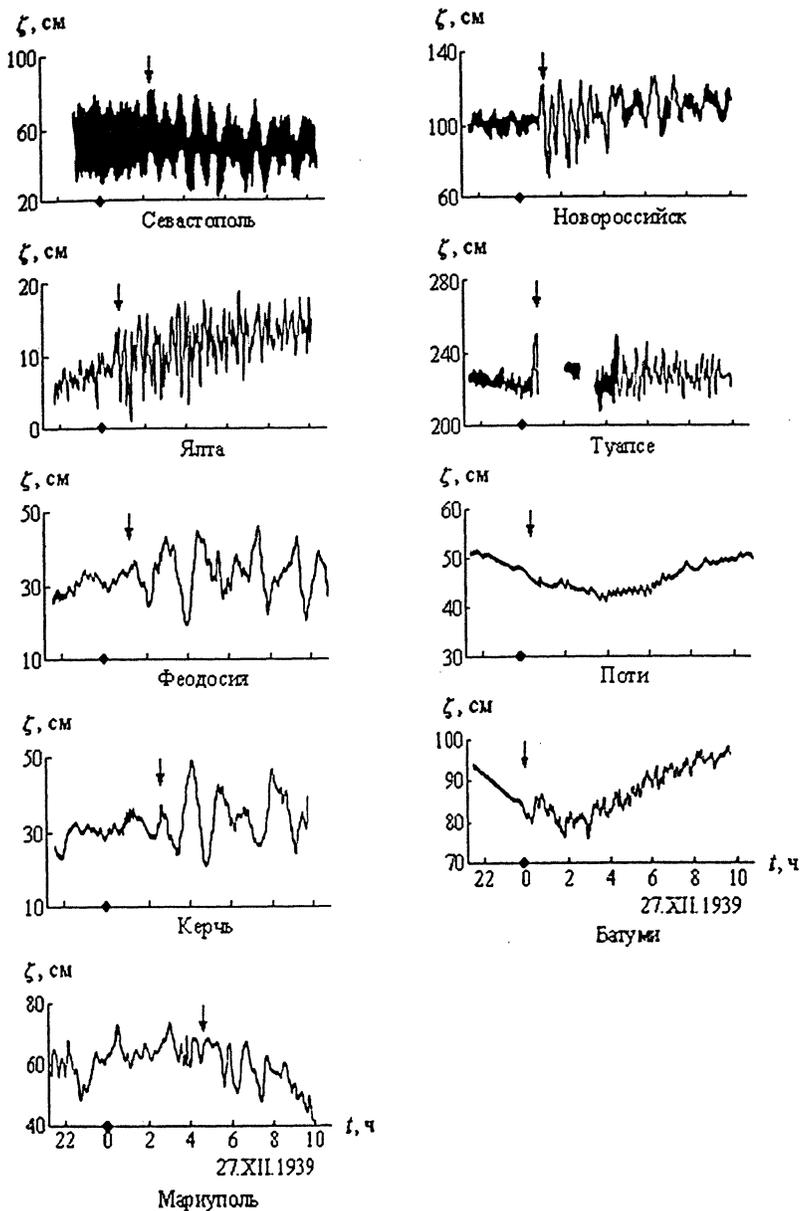


Р и с. 3. Зарегистрированные колебания уровня моря в различных пунктах Черноморского побережья при цунами 26 июня 1927 г. [9, 14, 16] (• – время начала землетрясения, вызвавшего волну цунами, ↓ – время прихода волны цунами в пункт наблюдения)

свойство черноморских цунами подтверждено вычислительными экспериментами по распространению длинных волн из эллиптических очагов цунами в бассейне Черного моря [18]. Наконец, приход цунами к берегу приводил к возбуждению и усилению сейш в бухтах Черного моря.



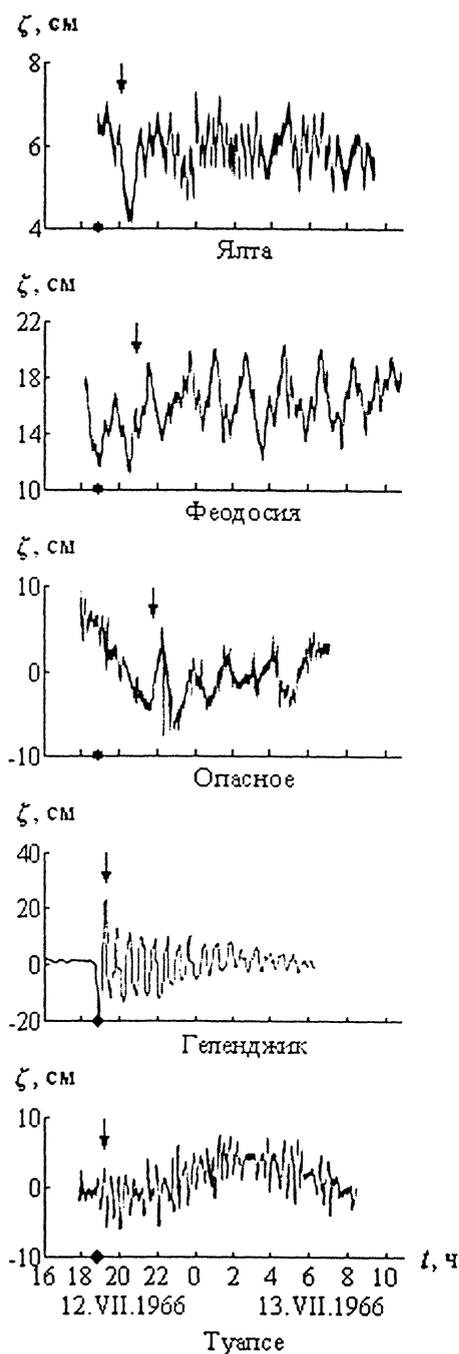
Р и с. 4. То же, что на рис. 3, при цунами 11 сентября 1927 г. [9, 14 – 16]



Р и с. 5. То же, что на рис. 3, при цунами 26 декабря 1939 г. [17]

**Параметры цунами по мареографическим данным.** Мареограммы, приведенные на рис. 3 – 6, позволяют определить различные количественные характеристики волн цунами в Черном море. К таким параметрам явления для различных пунктов побережья можно отнести высоту первой из пришедших волн цунами, максимальную высоту волн цунами, характерные периоды колебаний уровня моря по данным наблюдений, знак (+ –) смещения уровня моря в первой волне, время распространения волн из зон генерации до бере-

говых пунктов регистрации и др. Ранее часть из них рассматривалась в работах [6 – 9]. Далее под высотой волны понимается разность вертикальных координат гребня и предшествующей ему подошвы волны [19].



Р и с. 6. То же, что на рис. 3, при цунами 12 июля 1966 г. [9, 16]

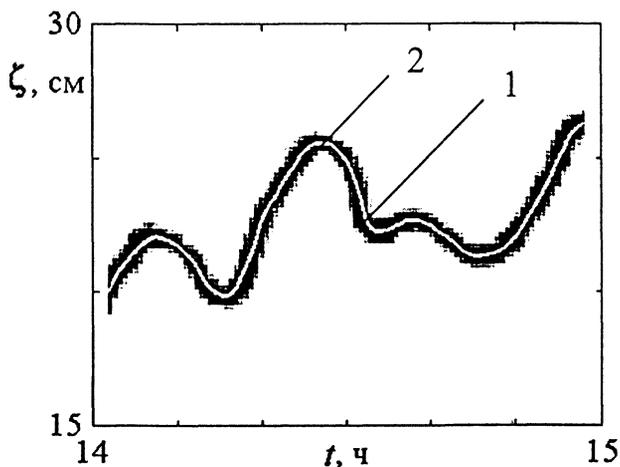
Уточненные характеристики четырех черноморских цунами, полученные по данным измерений, приведены в таблице. Распределение высот черноморских цунами вдоль побережья моря очень неравномерно. Высота первой волны в пунктах наблюдения изменялась в диапазоне 0,6 – 52 см, а высота волн цунами в целом – от 2 до 52 см. Для большинства пунктов побережья видна заметная тенденция к увеличению высот волн с ростом магнитуды землетрясения. Как правило, цунами характеризуются первоначальным подъемом уровня моря, а первая волна не является наибольшей по высоте. Максимальные высоты зарегистрированных цунами в точках наблюдения не превышают 52 см, а максимальный перепад уровня для приведенных на рис. 3 – 6 временных рядов составляет 53 см. Однако в некоторых пунктах побережья смещения уровня моря составили по визуальным оценкам 1 – 2 м [3]. Максимальные перепады уровня моря в пакетах волн цунами для рассматриваемых мареограмм соответствуют как понижениям, так и повышениям уровня моря.

Время распространения цунами до ближайших к зоне сейсмической генерации пунктов регистрации составило 9 мин, а до ближайших участков побережья волна распространялась за 5 мин и менее. Время распространения волн до удаленных точек моря значительно больше: волны цунами 1927 г. распространялись из зоны генерации до Одессы приблизительно 189 мин, до Мариуполя – 279 мин. Сопоста-

вление времен добегания волн  $t_p$ , представленных в ранее опубликованных работах, выявило определенное их несоответствие для ряда береговых пунктов. В таблицу включены скорректированные значения  $t_p$ , учитывающие как физико-географические условия таких пунктов, так и результаты численного моделирования волн в рамках лучевой модели распространения цунами в бассейне Черного моря [7, 20].

**Оценки периодов волн цунами спектральными методами.** Качественный анализ мареограмм, приведенных на рис. 3 – 6, показывает, что средние периоды волн изменяются в диапазоне 8 – 107 мин и не совпадают в одних и тех же пунктах побережья для различных событий [6, 7, 9, 17]. Более обоснованные оценки периодов волн цунами могут быть получены с использованием спектральных методов анализа временных рядов. Такой подход применялся ранее в работе [21], согласно которой доминирующие периоды черноморских цунами изменяются в диапазоне 20 – 30 мин.

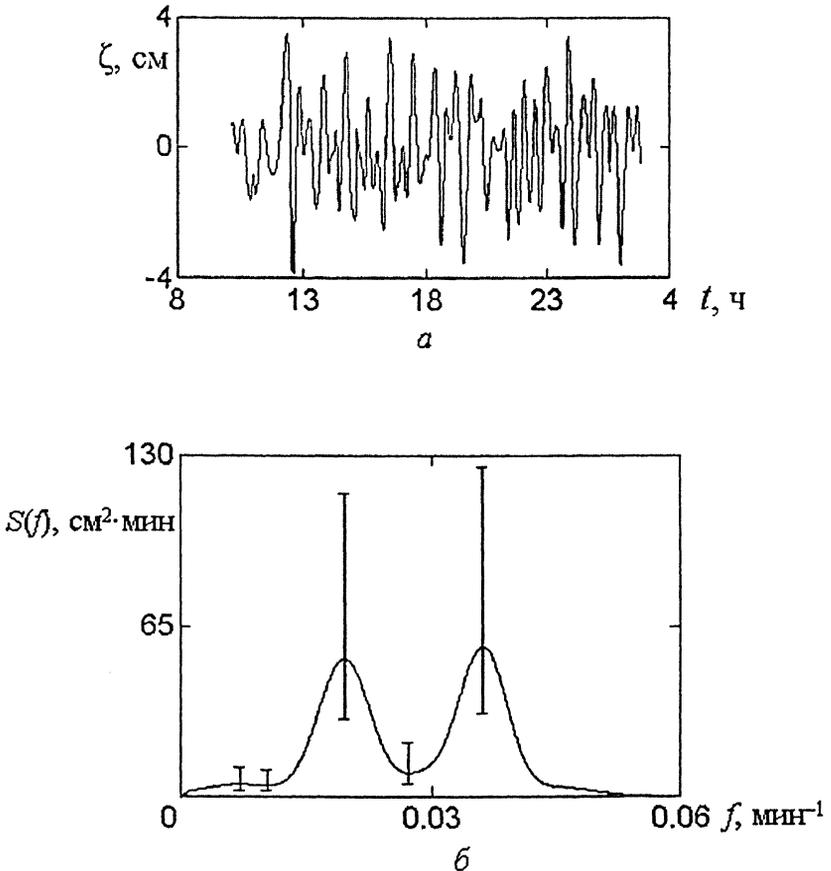
Ниже представлены результаты анализа характерных периодов волн цунами на основе расчета частотных спектров по временным рядам колебаний уровня моря в различных пунктах побережья Черного моря. Это потребовало оцифровки мареограмм, приведенных на рис. 3 – 6. Она проводилась в автоматическом режиме путем компьютерного анализа графических файлов, полученных сканированием исходных мареограмм в режиме градаций серого. Изображения анализировались попиксельно. Выделялись те точки, цвет которых был темнее заданного порогового значения. По группам выделенных точек для фиксированной абсциссы (момента времени) производилось усреднение по соответствующим им ординатам смещений уровня. Именно эта средняя величина и принималась в качестве искомого положения уровня моря в данный момент времени. В отдельных случаях возникала необходимость ручной коррекции отдельных точек оцифрованного временного ряда. Соответствие между исходной и оцифрованной мареограммами иллюстрирует рис. 7.



Р и с. 7. Фрагмент мареограммы для цунами 26 июня 1927 г. в г. Феодосии: 1 – исходная мареограмма в градациях серого; 2 – оцифрованная мареограмма

По оцифрованным мареограммам для различных пунктов побережья рассчитывались периодограммы и частотные спектры колебаний уровня моря. Рассматривались как центрированные ряды, так и ряды с исключением низкочастотного компонента, определявшегося по методу наименьших квадратов с использованием полиномов шестой степени. Оценки периодограмм сглаживались с использованием корреляционных окон Бартлетта, Тьюки и Парсена [22]. Далее находились 95%-ные доверительные интервалы и выделялись статистически значимые максимумы спектров. Их положения соответствовали характерным периодам колебаний уровня моря, связанным как с фоновой волновой изменчивостью, так и непосредственно с волнами цунами.

Характерный случай представлен на рис. 8. Колебания уровня моря в районе Новороссийска во время цунами 26 июня 1927 г. представляли нерегулярные колебания (рис. 8, а), которые формировались из двух основных составляющих, соответствующих пикам частотного спектра (рис. 8, б). Спектральный максимум, характеризуемый наименьшей частотой, обусловлен фоновой изменчивостью уровня моря (см. рис. 8, а), а высокочастотный максимум соответствует волне цунами.



Р и с. 8. Оцифрованная мареограмма для цунами 26 июня 1927 г. в г. Новороссийске (а) и соответствующая ей оценка частотного спектра (б) (вертикальные отрезки – 95 % доверительные интервалы)

## Параметры черноморских цунами по данным измерений

Дата и время события по Гринвичу	Пункт	$h_1$ , см	$h_{\max}$ , см	$\Delta\zeta$ , см	$s_1$	$s_{\max}$	$t_p$ , мин	$T$ , мин	Источник
26.06.1927 г. 11:20:48	Евпатория	6	15	15	+	+	74	<u>27</u> ; 107	[14, 16]
	Ялта	2	14	14	+	-	11	<u>22</u> ; 107	[9, 14, 16]
	Феодосия	4	7	10	+	+	48	15; 29; <u>119</u>	[9, 14, 16]
	Керчь	*	6	*	+	*	159	*	[9]
	Новороссийск	6	7	9	+	+	59	<u>28</u> ; 53	[9]
	Туапсе	3	8	8	+	+	39	<u>24</u>	[9]
11.09.1927 г. 22:15:49	Одесса	*	5	*	+	*	189	*	[9]
	Евпатория	52	52	53	+	+	127	<u>28</u> ; 70	[9, 14, 15]
	Севастополь	23	23	23	-	-	35	20; <u>52</u>	[9, 14-16]
	Ялта	3	37	37	+	-	9	10; <u>28</u>	[9, 14-16]
	Феодосия	4	16	16	+	+	64	17; <u>32</u>	[9, 14-16]
	Керчь	11	11	11	+	+	184	23; <u>52</u>	[9]
	Мариуполь	12	15	15	+	+	279	<u>31</u> ; 140	[9]
	Новороссийск	7	21	21	-	+	54	28; <u>51</u>	[9]
	Туапсе	7	15	15	+	-	48	<u>24</u>	[9]
Батуми	0,6	2	2	+	*	92	<u>8</u> ; 50	[9, 14, 15]	
26.12.1939 г. 23:57:21	Севастополь	46	51	51	+	+	147	<u>47</u>	[17]
	Ялта	7	12	13	+	+	53	10; <u>23</u> ; 70	[17]
	Феодосия	9	25	25	+	-	80	<u>103</u>	[17]
	Керчь	9	23	26	+	+	162	<u>91</u>	[17]
	Мариуполь	13	17	19	+	*	279	<u>107</u>	[17]
	Новороссийск	25	47	53	+	-	73	<u>28</u> ; 55	[17]
	Туапсе	32	35	35	+	+	50	*	[17]
	Поти	*	*	*	*	*	23	16; <u>193</u>	[17]
	Батуми	6	8	8	-	-	0	<u>91</u>	[17]
12.07.1966 г. 18:53:08	Ялта	1.5	3	3	+	+	69	20, <u>141</u>	[9, 16]
	Феодосия	7	7	7	+	+	119	28, <u>110</u>	[9, 16]
	Керчь	*	8	*	*	*	147	*	[9]
	Опасное	6	8	8	-	*	172	<u>110</u>	[9]
	Геленджик	41	41	41	+	+	27	<u>39</u>	[9, 16]
	Туапсе	4	7	7	+	+	19	<u>23</u>	[9]

Примечание:  $h_1$  – высота первой волны цунами;  $h_{\max}$  – высота максимальной волны;  $\Delta\zeta$  – максимальный перепад уровня для конкретной мареограммы;  $s_1$  – знак (+ -) смещения уровня моря в первой волне;  $s_{\max}$  – знак (+ -) смещения уровня моря в максимальной волне;  $t_p$  – время распространения волн до заданного пункта;  $T$  – характерные периоды колебаний уровня моря по данным наблюдений (подчеркнуты периоды энергетически доминирующих колебаний); \* – нет данных.

Найденные таким способом характерные периоды колебаний уровня Черного моря в пунктах регистрации цунами приведены в таблице. Наименьшие из них соответствуют волнам цунами, наибольшие – фоновым колебаниям гидрофизических полей. Периоды цунами изменяются в диапазоне 8 – 39 мин, характерные периоды фоновой изменчивости лежат в интервале 28 – 193 мин. В ряде случаев, но не всегда, полученные значения периодов согласуются с представленными ранее в работах [6, 7, 9, 17].

**Заключение.** Цунамиопасность Черноморского побережья изучена недостаточно полно в силу низкой повторяемости сильных событий (от нескольких десятков до сотни лет) и весьма скромного объема инструментальных данных. Перечень исторических цунами в Черном море включает 21 событие последних двух тысячелетий, о которых имеется только описательная информация, и четыре события прошлого века, зарегистрированных мареографами вдоль Крымского и Кавказского побережья моря.

Цунами наблюдались вдоль всего побережья Черного моря. Они генерировались землетрясениями в море или на суше. Исторические свидетельства позволяют предположить, что некоторые цунами древних времен носили разрушительный характер и имели высоту 2 – 3 м.

Выполнена ревизия количественных характеристик четырех черноморских цунами с использованием оцифрованных мареограмм и спектральных методов анализа временных рядов, а также представлены некоторые дополнительные параметры колебаний уровня моря при цунами. Максимальные высоты зарегистрированных цунами в пунктах наблюдения не превышали 52 см. Распределение высот цунами вдоль побережья моря очень неравномерно. На некоторых участках побережья по визуальным оценкам высоты волн достигали 1 – 2 м. В большинстве пунктов побережья четко прослеживается тенденция роста высот волн при увеличении магнитуды землетрясения. Характерные периоды волн цунами изменяются в диапазоне 8 – 39 мин, периоды фоновой изменчивости уровня моря — 28 – 193 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурти Т. С. Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 447 с.
2. Соловьев С. Л. Средиземноморские цунами и их сопоставление с тихоокеанскими цунами // Изв. РАН. Физика Земли. – 1989. – 53, № 11. – С. 3 – 17.
3. Никонов А. А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Там же. – 1997. – 61, № 1. – С. 86 – 96.
4. Соловьева О. Н., Доценко С. Ф., Кузин И. П. и др. Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения // Океанология. – 2004. – 44, № 5. – С. 679 – 685.
5. Доценко С. Ф., Кузин И. П., Левин Б. В и др. Особенности проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // Изв. РАН. Физика Земли. – 2003. – 39, № 4. – С. 308 – 314.
6. Фомичева Л. А., Рабинович А. Б., Демидов А. Н. Цунами в Черном море // Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические исследования. – С.–Пб.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 352 – 354.
7. Доценко С. Ф. Черноморские цунами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 1994. – 30, № 4. – С. 513 – 519.

8. *Доценко С. Ф., Коновалов А. В.* Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование // *Морской гидрофизический журнал*. – 1995. – № 6. – С. 3 – 16.
9. *Григораш З. К.* Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // *Тр. СахКНИИ ДВО АН СССР*. – Ю.-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. – Вып. 29. – С. 271 – 278.
10. *Rangelov B.* Tsunami vulnerability modelling for the Bulgarian Black Sea // *Wat. Sci. Tech.* – 1995. – 32, № 7. – P. 47 – 53.
11. *Altinok Y.* Tsunamis along the coasts of the Black Sea // *Book of Abstracts, 2<sup>nd</sup> Balkan Geophys. Congr. and Exhibition.*, Istanbul, 5 – 9 July, 1999. – P. 46 – 47.
12. *Доценко С. Ф.* Оценка уровня цунамиопасности Черного моря // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. – 1998. – № 4. – С. 19 – 23.
13. *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.
14. *Григораш З. К.* Черноморские цунами 1927 г. по мареографическим записям // *Тр. МГИ АН СССР*. – М.: АН СССР, 1959. – 17. – С. 59 – 67.
15. *Григораш З. К.* Распространение цунами 1927 г. в Черном море // *Там же*. – 1959. – 18. – С. 113 – 116.
16. *Григораш З. К., Корнева Л. А.* Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // *Океанология*. – 1969. – 9, вып. 6. – С. 988 – 995.
17. *Григораш З. К., Корнева Л. А.* Мареографические данные о цунами в Черном море при Турецком землетрясении в декабре 1939 г. // *Там же*. – 1972. – 12, вып. 3. – С. 417 – 422.
18. *Доценко С. Ф.* Особенности распространения цунами в северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 2005. – № 6. – С. 46 – 53.
19. *Tsunami glossary* // *IOC Tech.* – Ser. 37. – UNESCO, 1991. – 136 p.
20. *Суворов А. М., Ингеров А. В.* Информационно-аналитическая система уровня моря // *Морской гидрофизический журнал*. – 1999. – № 5. – С. 70 – 77.
21. *Рангелов Б., Спасов Е., Доцев Н. и др.* Спектры на цунами в Черно море // *Българско геофизично описание*. – 1987. – 8, № 1. – С. 53 – 58.
22. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. Т.1. – М.: Мир, 1971. – 316 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 28.07.05

ABSTRACT General description of tsunami waves in the Black Sea is represented. Quantitative characteristics of four historical events are revised using the digitized level records and their spectral analysis. As a rule, tsunami is characterized by the initial rising of a sea level and the first wave is not the highest. Maximum heights of the recorded tsunami waves do not exceed 52 cm. Noticeable tendency towards the increase of the wave heights with the growth of the earthquake magnitude is noted for the most points along the sea coast. The typical periods of tsunami waves and the sea level background variability are in the ranges 8 – 39 min and 28 – 193 min, respectively.