

УДК 551.465

Р.Х. Мазова, Б.А. Кисельман, Н.Н. Осипенко, Е.А. Колчина

## АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРНОМОРСКИХ ЦУНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель работы:** В рамках нелинейных уравнений мелкой воды проведено численное моделирование как исторических, так и возможных сильных цунами от модельных сейсмических очагов с различной локализацией в акватории Черноморского бассейна. Локализация и форма сейсмических очагов выбиралась с учетом наиболее сейсмоактивных зон черноморской впадины, используя геологические и геодинимические данные региона. Сейсмический очаг рассматривался в рамках кинематической клавишной модели очага землетрясения.

**Научный вклад:** Проведен численный и спектральный анализ волнового поля цунами.

**Результат:** Используя результаты расчетов генерации и распространения волн цунами в акватории Черного моря, был проведен спектральный анализ и получены спектральные характеристики волн цунами в Черном море как для исторических землетрясений, так и для гипотетических сильных подводных землетрясений. Амплитудные спектры мареограмм во всех точках были рассчитаны с помощью дискретного преобразования Фурье. Для ряда пунктов построены и проанализированы wavelet спектрограммы.

**Новизна:** результаты анализа могут быть использованы при проведении строительных работ в береговой и шельфовых зонах российского побережья Черного моря, а также важность таких расчетов связана, в частности, с проблемой эксплуатации морского участка газопровода Россия-Турция (проект «Голубой поток»), соединяющий территории этих стран по дну Черного моря, который должен функционировать в условиях повышенной сейсмичности и оползневой опасности российского и турецкого склонов Черного моря.

*Ключевые слова:* очаг землетрясения, клавишная модель очага, волны цунами, численное моделирование, спектральный анализ.

## Введение

Особенностью цунамигенных землетрясений является тот фактор, что, как правило, землетрясение происходит там, где долгое время не было событий, даже умеренной силы – в так называемых «сейсмических брешах». Для региона Черного моря этот период составляет 40–100 лет [1, 2]. В связи с этим, нами был выбран ряд областей акватории Черного моря, где долгое время не наблюдались сейсмические события. Мы будем рассматривать расположение очагов землетрясений как на границе Туапсинского прогиба, так и в наиболее сейсмоактивных районах вдоль всего черноморского побережья [3–5]. Принципиальное отличие исследования, проводимого в данной работе, связано с возбуждения волн как процесса, протяженного во времени. Рассматривается генерация волн цунами кинематическим очагом в рамках клавишной модели очага землетрясения [6, 7]. Как отмечается в работе [8], имеющиеся в настоящее время численные модели цунами принимают во внимание только геометрические характеристики очага – пространственное распределение остаточных смещений дна. Как отмечено в работе [9] «... важным для прогноза волн является то обстоятельство, что их амплитудные характеристики существенно зависят от вида сейсмоактивной подвижки, формы очага цунами и распределения остаточных смещений дна. Эти вопросы для землетрясений Черноморской впадины изучены недостаточно».

В отличие от поршневой модели (мгновенной подвижки), клавишная модель (кинематическая и динамическая модели) позволяют при одной и той же магнитуде землетрясения получить различный характер направленности волн цунами, что дает принципиально разное распределение высот волн вдоль побережья, в зависимости от сценария развития сейсмического процесса в очаге землетрясения. Известно, что смещение коры в сейсмическом очаге имеет

сложный характер, например, сдвиг со взбросом или сбросом. Однако, как правило, для расчетов генерации поверхностной волны эти движения пересчитываются на вертикальное смещение дна вверх и вниз, что дает возможность адекватного моделирования прошедшего события в рамках клавишной модели очага землетрясения.

Нужно отметить, что в силу несжимаемости жидкости, при «поршневой» подвижке в очаге, смещение воды на поверхности будет точно повторять смещение дна в сейсмическом очаге. В силу этого, формирование очага цунами будет происходить за время смещения дна в очаге землетрясения, в данном случае – время движения блоков. Размеры радиуса  $R$  очага цунами, найденные через магнитуду землетрясения [10], позволяют задать ориентировочные размеры блоков, из которых состоит сейсмический очаг, а смещение волновой поверхности над сейсмическим очагом, полученным по формулам связи высоты смещения и магнитуды землетрясения [10], позволяет рассчитать высоту подъема блоков в сейсмическом очаге. Были проведены расчеты от гипотетических сейсмических очагов, локализованных в наиболее сейсмоактивных районах Черного моря, где происходили сильные исторические землетрясения, и в местах активных разломов Крымского и Кавказского побережий Черного моря. Границы сейсмогенных блоков определяются системой региональных разломов [5]. Всего было проведено около 40 вариантов расчета для разных значений магнитуд землетрясения.

Необходимо отметить, что исследованию цунамигенных землетрясений в Черноморском бассейне посвящено много работ. Наиболее полно, на взгляд авторов, многие аспекты данной тематики отражены в работах [11–20].

### Численное моделирование и спектральный анализ

Используя результаты полученных расчетов генерации и распространения волн цунами в акватории Черного моря [21, 22], был проведен одномерный и двумерный (wavelet) спектральный анализ и получены спектральные характеристики волн цунами в Черном море как для исторических событий, так и для возможных сильных подводных землетрясений. Амплитудные спектры мареограмм во всех точках были рассчитаны с помощью дискретного преобразования Фурье, где спектральная плотность сигнала

$$X(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j\omega n),$$

$x(n)$  – сигнал дискретного времени;  $N$  – число отсчетов в сигнале;  $\omega = 2\pi f T$  – нормированная круговая частота;  $f$  – частота в Герцах (Гц);  $T$  – интервал дискретизации в сек.

На графиках изображены модули спектральных плотностей в децибелах (дБ):

$$L(\omega) = 20 \lg(|X(j\omega)|).$$

Энергия сигнала запишется следующим образом:

$$E_x = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n).$$

### Моделирование исторического землетрясения 12 июля 1966 г.

На рис. 1 – рис. 5 приведены результаты расчетов исторического землетрясения, вызвавшего небольшие волны цунами 12.07.1966 г., и спектральный анализ волнового поля, полученного при данном расчете. Магнитуда землетрясения  $M=5,8$ , максимальный подъем блоков 12 см. На рис. 1, *а* приведена локализация очага землетрясения, на рис. 1, *б* – положение волнового фронта через 12 мин после начала землетрясения, на рис. 1, *в* – гистограмма распределения высот волн на 10-метровой изобате вдоль российского побережья.

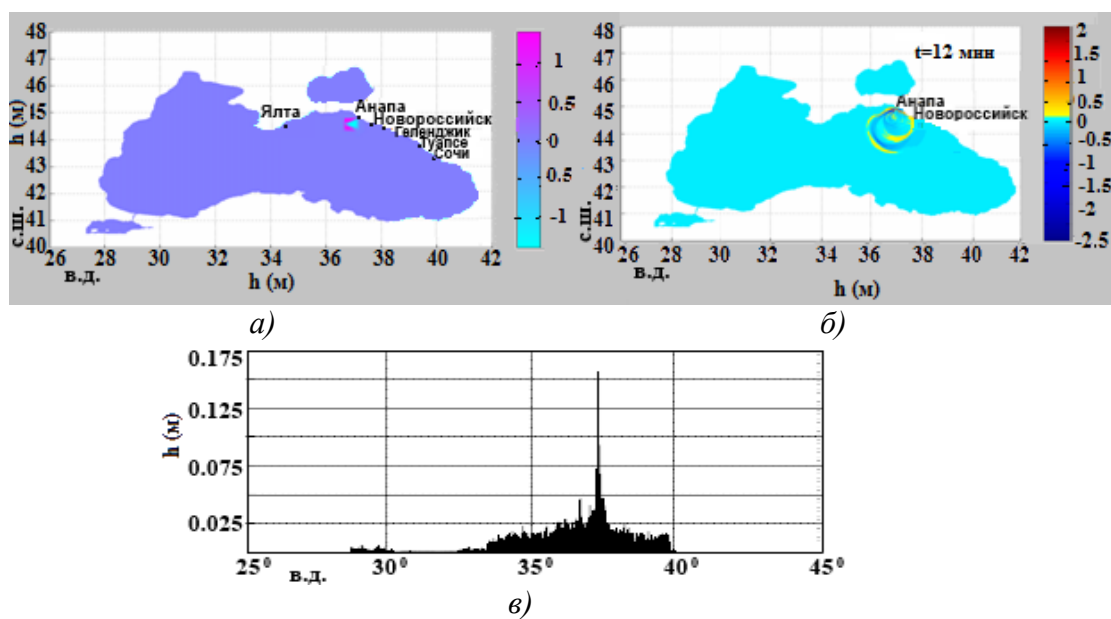


Рис. 1. Землетрясение 12.07.1966 г. с  $M=5.8$ :

*a* – локализация сейсмического очага; *б* – положение фронта волны через 12 мин после начала землетрясения; *в* – одномерная гистограмма для максимальных высот волн на 10-метровой изобате

На рис. 2, *a* приведена мареограмма для мористой точки, расположенной около г. Анапа также на 10-метровой изобате. Поскольку очаг землетрясения локализован в районе г. Анапа, то хорошо видно, что волна очень быстро достигает мареографа, высоты волн не превышают 8 см. На рис. 2, *б* представлен амплитудный спектр для мареограммы около города Анапа.

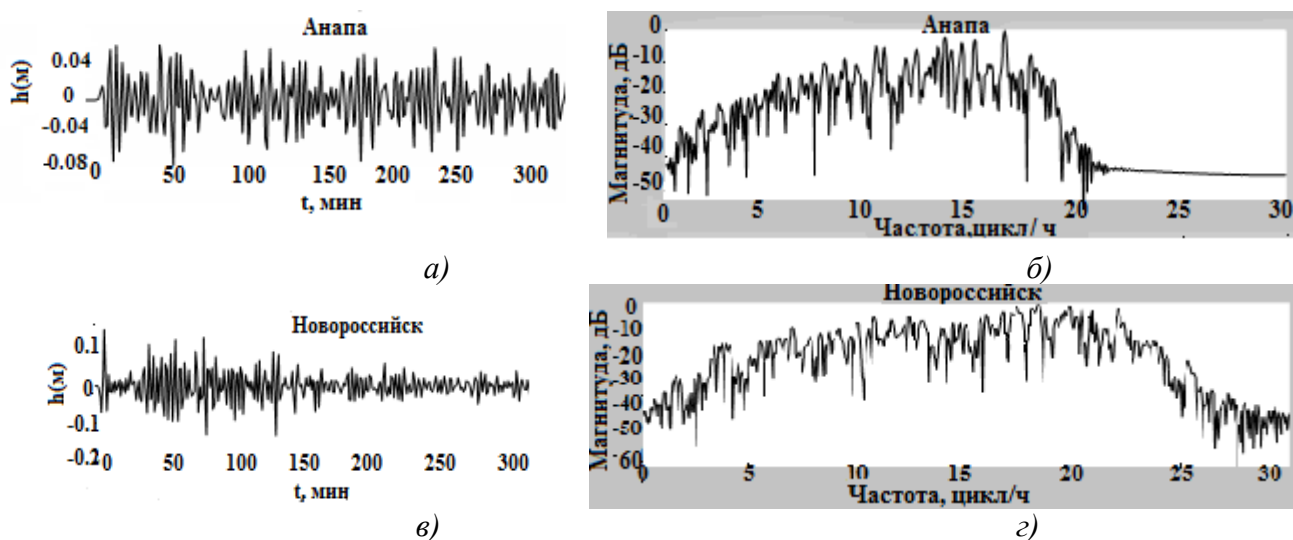


Рис. 2. Мареограмма и спектрограмма для мористой точки:

*a, б* – около г. Анапы;  
*в, г* – около г. Новороссийска

Можно видеть, что на интервале, соответствующем длинным волнам (до 10 цикл/час; волновые периоды до 6 мин), зависимость почти линейно нарастает, для средних и более высоких частот (более 17 цикл/ч – периоды менее 4 мин) спектральные амплитуды уменьшаются по квадратичному закону. Если сравнить спектр этого сигнала со спектром волнового поля для мористой точки, расположенной около г. Новороссийск (рис. 2, *в, г*), (рассматривая первый сигнал, как входной),

то хорошо видно (рис. 3), что наибольшую энергию сигнал имеет в высокочастотной области, от 17 до 25 цикл/ч. В тоже время на спектре можно видеть, что пики для Анапы (черная линия) преобладают на низких частотах (до 3 цикл/ч). Оценка энергии сигнала для г. Анапы и г. Новороссийска дает отличие почти в два раза:  $E_{\text{Анапа}} = 0.0456$ ;  $E_{\text{Новороссийск}} = 0.0943$ .

Нужно отметить, что волна подошла к г. Новороссийску несколько раньше, чем к г. Анапа, что связано со спецификой задания очага землетрясения: очаг был рассмотрен многоблочный с разнонаправленной реализацией движений блоков в очаге. Так, часть очага, ориентированная к городу Анапа, сдвигалась вниз, а блок в части очага, ориентированной к г. Новороссийск, сдвигался вверх. Мареограмма для мористой точки, расположенной рядом с г. Сочи приведена на рис. 4, а. Анализ спектральных характеристик волновых полей для городов Сочи и Анапы (см. рис. 2, а) приведен на рис. 4. Хорошо видно, что волна до г. Сочи доходит через 40 мин после начала сейсмического процесса в очаге землетрясения. Наибольший размах колебаний около г. Сочи составляет около 2 см. Сравнение амплитудных спектров г. Сочи (рис. 4, серая линия точками) и г. Анапы (рис. 4, черная линия) показывает, что волна, дошедшая до г. Сочи, существенно теряет свою энергию, особенно в диапазоне низких частот от 2,5 до 10 циклов/ч. На интервале частот от 4 до 5 циклов/ч (что соответствует периодам волн от 15 до 12 мин) существенное ослабление сигнала.

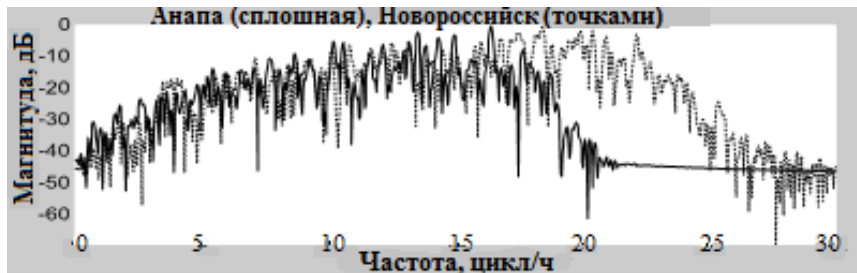
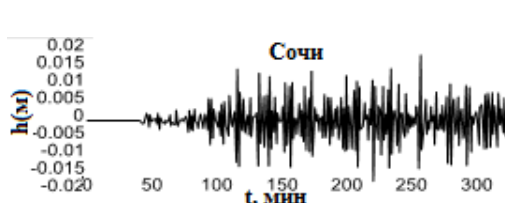
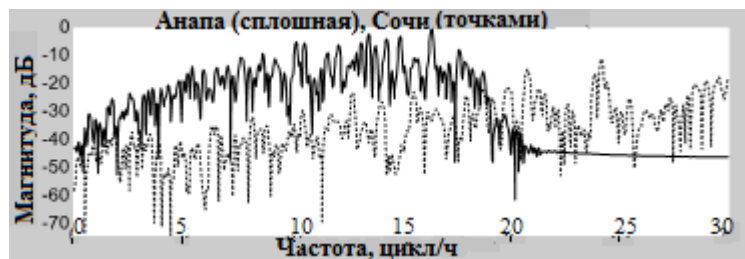


Рис. 3. Сравнение спектральных амплитуд для мористых точек вблизи г.Анапы (сплошная черная линия) и г. Новороссийск( серая линия точками)



а)



б)

Рис. 4. Сравнение спектральных амплитуд:

а – для мористой точки около г. Сочи;

б – для городов Анапа (черная линия) и Сочи (серая линия точками)

Были рассмотрены также спектральные характеристики к западу от г. Анапа для г. Ялты. На рис. 5 приведены мареограмма (рис. 5, а) и спектральные характеристики для мористой точки, расположенной на 10-метровой изобате рядом с этим городом. Здесь приведено сравнение полученного спектра со спектром в мористой точке около г. Анапа (рис. 5, б). Хорошо видно, что волна доходит до Ялты примерно за 35-40 мин. Размах колебаний амплитуды на мареографной записи составляет 1 см. Волна существенно потеряла свою энергию, по сравнению с начальной (спектр сигнала для г. Анапа). Хорошо видно, что энергия подошедшего к Ялте сигнала равномерно распределена по всем частотам.

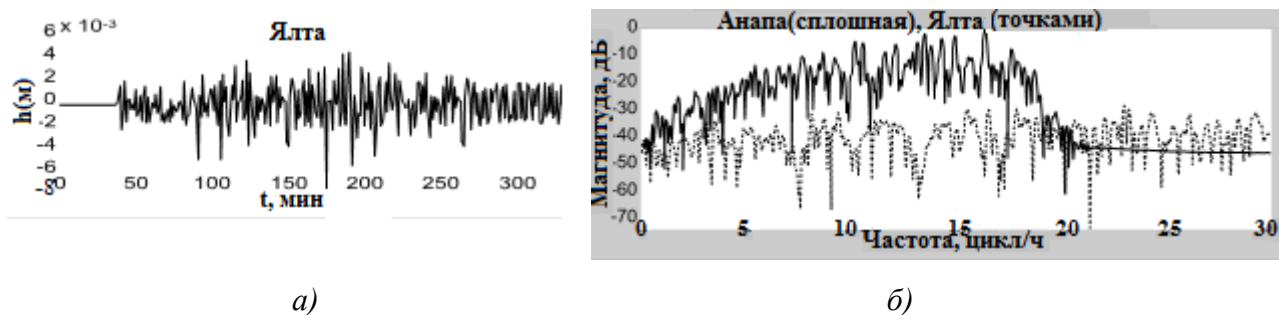


Рис. 5. Мареограмма и сравнение амплитудных характеристик:

а – для г. Ялта; б – для городов Анапа (черная линия) и Ялта (серая линия точками)

Интересно сравнить энергию волн для городов Ялта и Сочи. На рис. 6 приведено сравнение спектральных амплитуд этих волн. Оценка энергии сигналов дает:  $E_{\text{Сочи}} = 2.8644 \cdot 10^{-3}$ ;  $E_{\text{Ялта}} = 2.4329 \cdot 10^{-4}$ , т.е. отличие энергии подошедших волн почти на порядок.

Для ряда городов был проведен двумерный спектральный анализ (wavelet-анализ) и построены wavelet-спектрограммы. Так, wavelet-спектрограммы для городов Анапа и Новороссийск приведены на рис. 7 а, б.

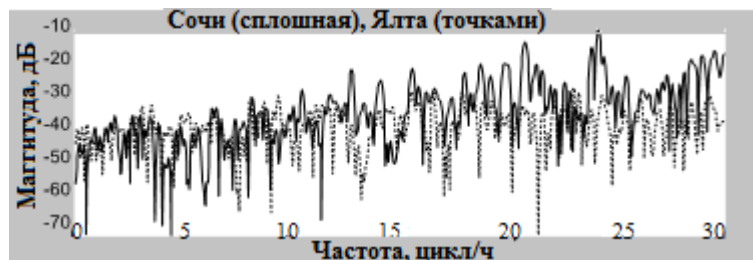


Рис. 6. Сравнение спектральных амплитуд для мористых точек около городов Ялта (серая линия точками) и Сочи (черная линия)

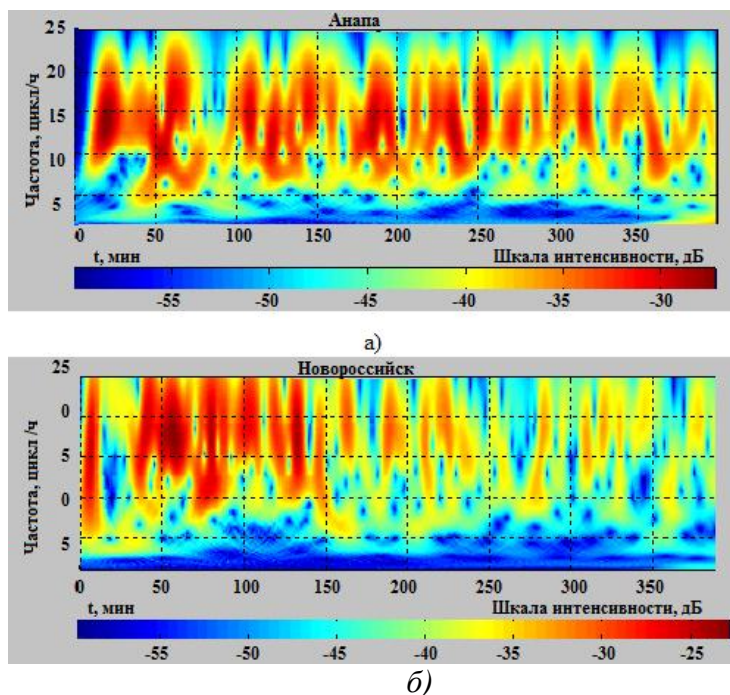


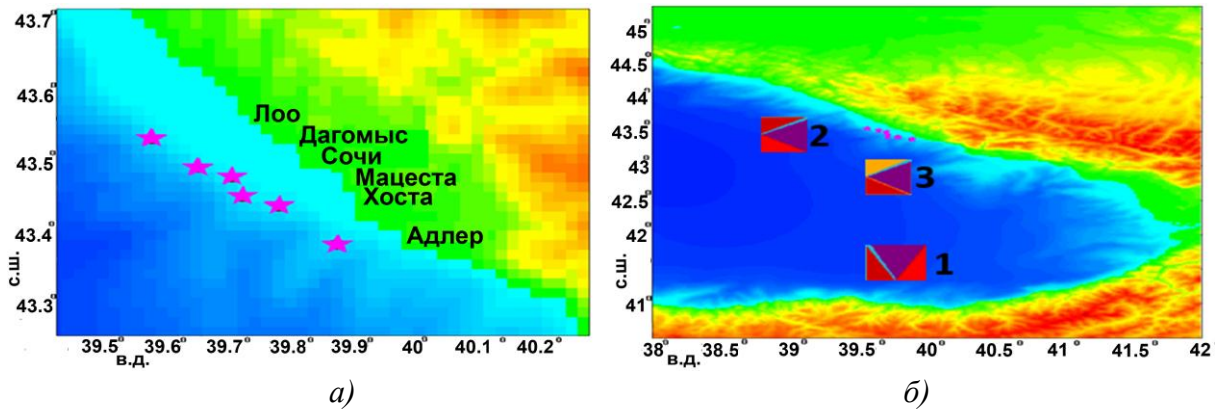
Рис. 7. Wavelet - спектрограммы для двух мористых точек:

а – г. Анапа; б – г. Новороссийск

По горизонтальной оси отложено время расчета (400 мин), по вертикальной оси – частота в цикл/час, а шкала интенсивности показывает энергию сигнала в дБ. Хорошо видно, что для Анапы энергия сигнала распределена по времени более равномерно для всего времени расчета, чем для Новороссийска. Так, для Анапы наибольшая интенсивность соответствует диапазону от 11 до 17 цикл/ч (периоды волн от 5,4 до 3,5 мин) в первые 25 мин мареографной записи. Для Новороссийска наибольшая интенсивность соответствует диапазону с 14 до 23 циклов/ч во временной интервал от 50 до 70 мин.

**Численное моделирование опасности катастрофических землетрясений и цунами для северо-запада российского побережья Черного моря**

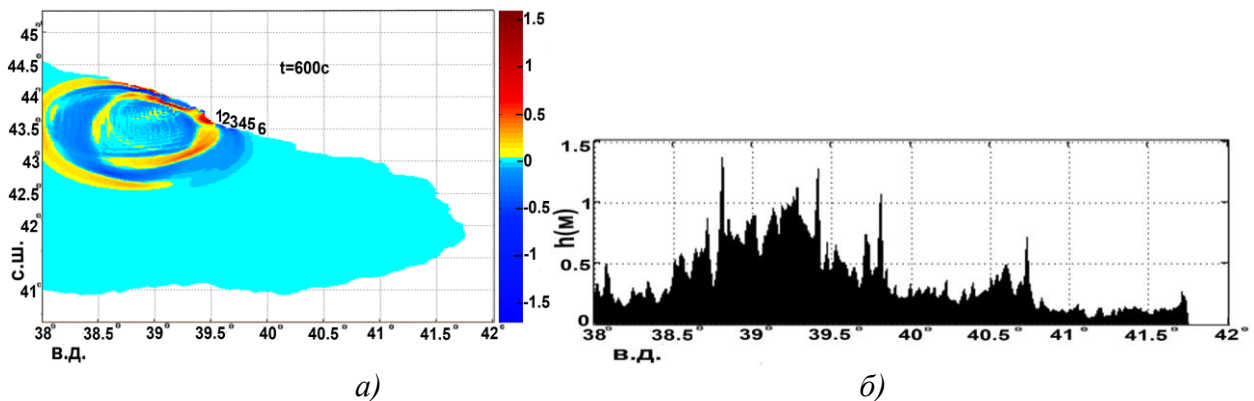
Было проведено численное моделирование возможных катастрофических землетрясений, генерирующих сильные волны цунами, от трех гипотетических очагов, расположенных в местах локализации исторических землетрясений (рис. 8).



**Рис. 8. Расположения:**

*a* – пункты мареографов; *б* – очагов рассматриваемых землетрясений

На рис. 9 – рис. 11 приведены результаты расчетов для трех сценариев, соответствующих положению сейсмических очагов на рис. 10, *б* с магнитудой  $M=7$  для 1-го и 2-го сценариев и магнитудой  $M = 7,5$  для 3-го сценария. Максимальный подъем блоков в очаге землетрясения для 1-го и 2-го сценариев составляет 1,23 м и для 3-го сценария – 2,5 м [22].



**Рис. 9. Сценарий 1:**

*a* – положение волновых фронтов в момент времени  $t = 400$  с;  
*б* – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

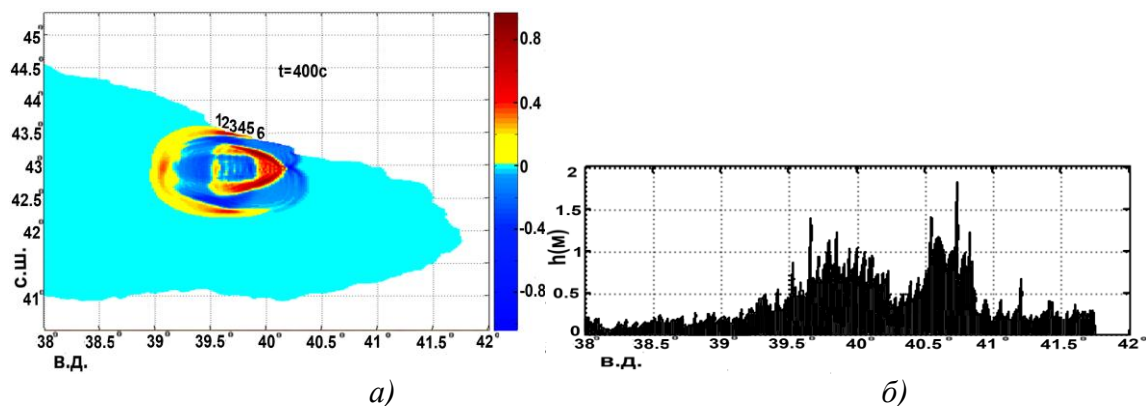


Рис. 10. Сценарий 2:

*a* – положение волновых фронтов в момент времени  $t = 400$  с;  
*б* – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

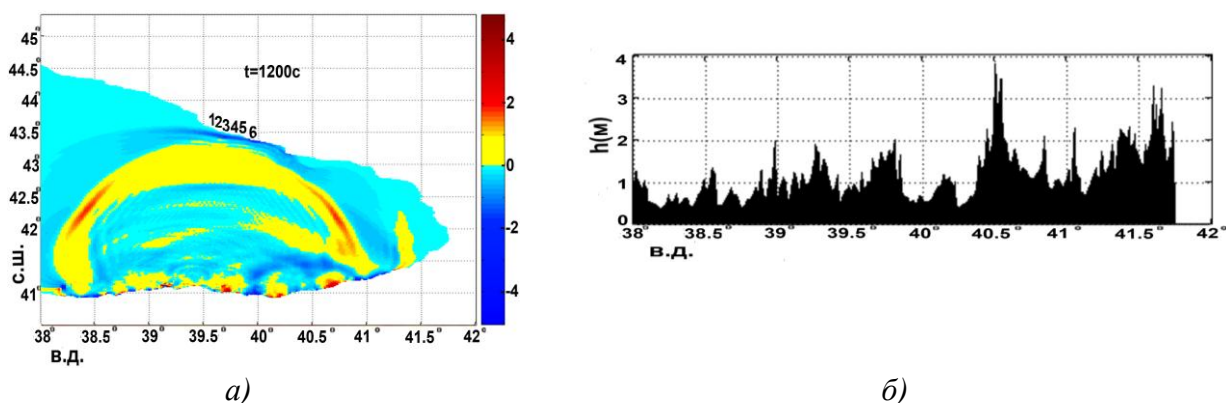
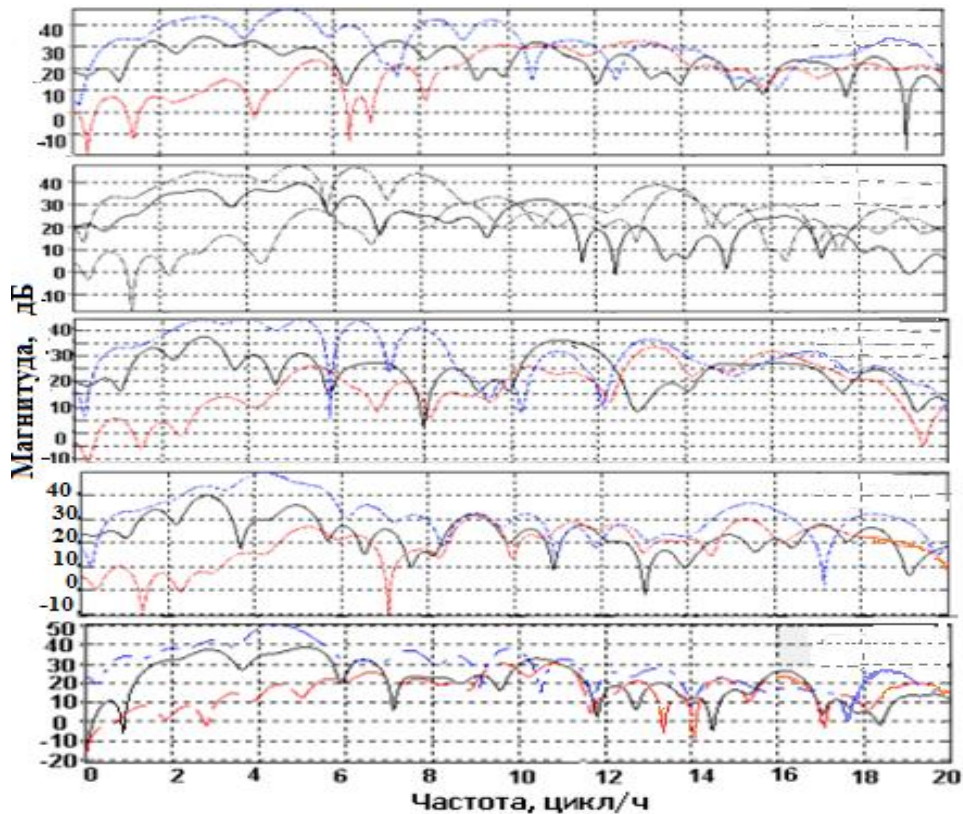


Рис. 11. Сценарий 3:

*a* – положение волновых фронтов в момент времени  $t = 1300$  с;  
*б* – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

В зависимости от расположения сейсмического очага для сценариев 1 и 2, приход первой волны к пункту записи составляет от 5 до 22 мин, для сценария 3 это время составляет 76 мин. Анализ спектральных характеристик расчетных мареограмм с виртуальных мареографов для мористых точек перед пунктами, приведенных на рис. 8, *a* (Дагомыс, Сочи, Мацеста, Хоста, Адлер), представлен на рис. 12, *a-d*. На рисунках приведены амплитудные спектры сигналов для трех сценариев, соответствующих трем локализациям сейсмического очага (рис. 8, *б*). Сглаживание амплитудных спектров проводилось их обработкой с помощью фильтра нижних частот. Расчет проводился до 20 ц/ч, так как энергия на этом интервале еще достаточно значительная. Сплошной линией отмечен спектр для расчета от очага (1), расположенного на юго-востоке Черного моря, рядом с турецким побережьем (где с эпицентром на суше 26 декабря 1939 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой  $M=8$ ) – первый сценарий. Пунктирная линия соответствует второму сценарию (очаг 2), а штрих-пунктир – третьему (очаг 3), расположения которых также соответствуют историческим землетрясениям (например [13, 14]). Для всех рисунков хорошо видно, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 ц/ч), энергия двух сигналов (сценарий 1 и 3) значительна. Существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне 2–6 ц/ч, что соответствует 30- и 10-минутным волнам. Причем от 4 до 4,5 ц/ч для сценария 3 (очаг 3) энергия сигнала доходит до 50 дБ. Расположение очага слева от Сочи (очаг 2) дает в этом диапазоне энергию только до 25 дБ. На рис. 12, *a, б* приведены амплитудные спектры сигналов для г. Дагомыс и г. Сочи.

Хорошо видно, что картины почти одинаковы, ввиду близости расположения пунктов побережья и отсутствия береговых особенностей (пологие склоны, отсутствие заливов и т.д.).



**Рис. 12. Амплитудные спектры волновых полей соответствующих мареограммам, полученным в мористых точках перед пунктами:**

*a* – Дагомыс; *б* – Сочи; *в* – Мацеста; *з* – Хоста; *д* – Адлер для трех сценариев расчета, соответствующих трем локализациям сейсмического очагов (рис. 8, б). Сплошной линией отмечен спектр для расчета от очага (1), пунктирная линия соответствует сценарию (2); штрих-пунктир (3)

Однако, по сравнению с Сочи, для Дагомыса доля энергии на интервале 2–4 ц/ч для сценария 1 (от дальнего очага) уменьшилась. Интересно, что для сценария 2 (очаг 2) энергия выросла и ее максимальное значение составляет 23 дБ в интервале 4,6–6 ц/ч. Для Сочи основную энергию (с 40 до 50 дБ) принесут волны с частотами 2 до 5,5 ц/ч (с 30–12 мин длительностями) от очагов, расположенных справа от Сочи (очаг 3) и дальнеполевого очага (1). От очага, расположенного слева от г. Сочи (очаг 2), основную энергию (27 дБ) принесут 10–13 мин. волны (4,5–6 ц/ч). Нужно отметить, что для Дагомыса, Хосты и Сочи для частоты 1,5 ц/ч, соответствующей длинным 40-минутным волнам существует значительная потеря энергии до -5 - -10 дБ. Для Мацесты значительная доля энергии третьего сигнала (штрих-пунктирная линия) лежит в диапазоне 2,3–4,8, 6–6,5 и 6,7–7 ц/ч, что значительно выше, чем в других рассмотренных пунктах.

Энергия двух других сигналов в этих диапазонах остается практически без изменений, по сравнению с другими пунктами. Для г. Хосты энергия сигнала от очага 3 (штрих-пунктирная линия) почти не изменилась, наибольшая энергия для дальнего очага 1 лежит в интервале 2,2–2,7 ц/ч, что соответствует периодам волн порядка 25 мин. Для сценария 2 (пунктирная линия) энергия сигнала на данном интервале (до 8 ц/ч) осталась почти без изменений. Для г. Адлера хорошо видно, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 ц/ч), энергия двух сигналов (сценарий 2 и 3) значительна. Существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне 2–6 ц/ч, что соответствует 30- и 10-минутным волнам. Причем от 4 до 4,5 ц/ч для сценария 2 (очаг 2), энергия сигнала доходит до 50 дБ.



### Численное моделирование возможных катастрофических цунами в акватории Черного моря для побережья Турции

Проведено исследование виртуального цунамигенного землетрясения с магнитудой 7,3. Выбраны 6 виртуальных сейсмических очагов (I–VI) (рис. 13). Будем рассматривать цунамиопасность ряда участков турецкого побережья, для чего следует проанализировать данные с виртуальных мареографов в пп. 29, 24 и 15. Для турецкого побережья очаги I, II, III являются ближнеполевыми, а очаги IV, V, VI – дальнеполевыми.

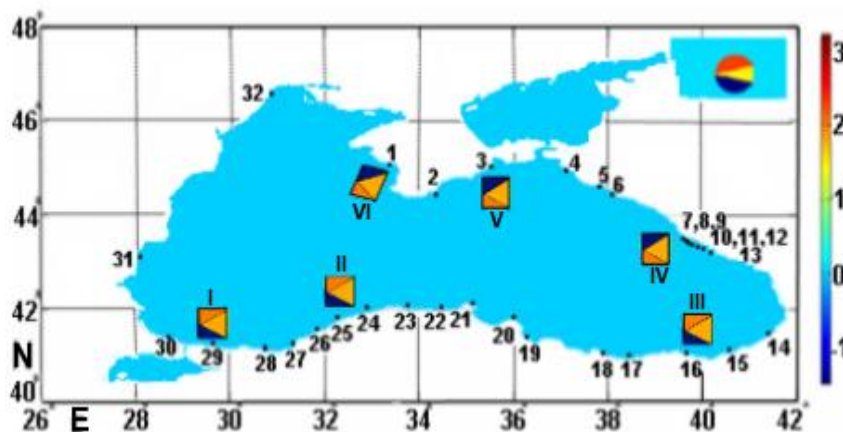
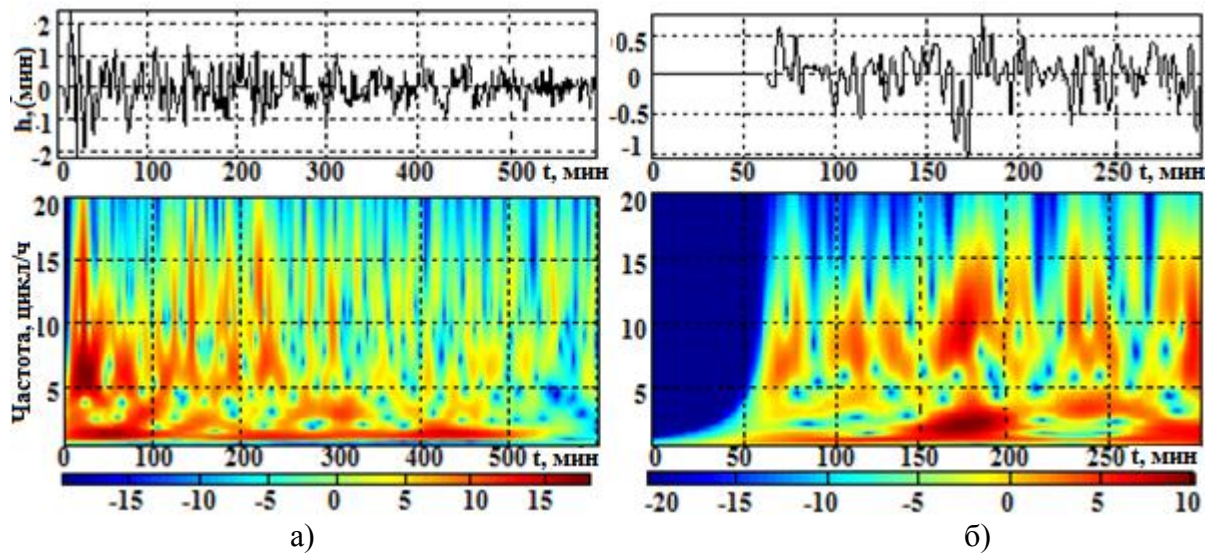


Рис. 13. Расчетная акватория Черного моря; I–VI – локализация виртуальных сейсмических источников; 1–32 – расположение виртуальных мареографов

Максимальный подъем блоков в сейсмических источниках 1,75 м. Рассматриваются волновые поля от очагов I и VI для п. 29; от очагов II и V для п. 24 и от очагов III и V для п. 15. Для исключения нелинейных эффектов при проведении численного моделирования генерации и распространения волн от ближнеполевых очагов I, II и III, расчет проводится от эллиптического блочного очага (см. вставку на рис. 13). На основе результатов проведенных расчетов, был выполнен wavelet-анализ для некоторых пунктов, расположенных около турецкого побережья. На рис. 14 – рис. 16 приведены мареограммы и спектрограммы волновых полей от ближнеполевых очагов I, II и III, которые были построены по данным мареографов, расположенных в пп. 29, 24 и 15.

Хорошо видно, что для всех очагов характерна концентрация волновой энергии в низкочастотном интервале от 3 до 8 цикл/ч, что соответствует волновому периоду от 20 до 8 мин. Можно видеть, что для источника I (рис. 13) волновая энергия с интенсивностью до 20 дБ сосредоточена в двух областях: в низкочастотном интервале от 1 до 2 цикл/час (с длительностью 60–30 мин.), в промежутке времени от 20 до 80 мин, и в интервале от 4 до 8 цикл/час (с длительностью 15–8 мин) на временном интервале от 10 до 40 мин.

Затем практически вся энергия перетекает в более высокочастотную область. Низкочастотная составляющая с существенно меньшей энергией от 3 до 10 дБ присутствует и в других временных интервалах. Для источника II (рис. 13) основную энергию (до 10 дБ) приносят волны с частотами от 2 до 5 цикл/ч, что соответствует длинным волнам от 12 до 30 мин, а затем, как и в первом случае, практически вся энергия перетекает в более высокочастотную область. Для источника III (рис. 13) хорошо видно, что волновая энергия с интенсивностью до 8 дБ сосредоточена в двух областях: в низкочастотном интервале от 3 до 10 цикл/ч (с длительностью 20–6 мин) на временных интервалах от 10 до 49 мин и от 50 до 70 мин. На интервале до 30 мин, как в случае 1 и 2, хорошо видны высокочастотные составляющие с интенсивностью до 7 дБ, что может соответствовать переотражениям волн в шельфовой зоне.

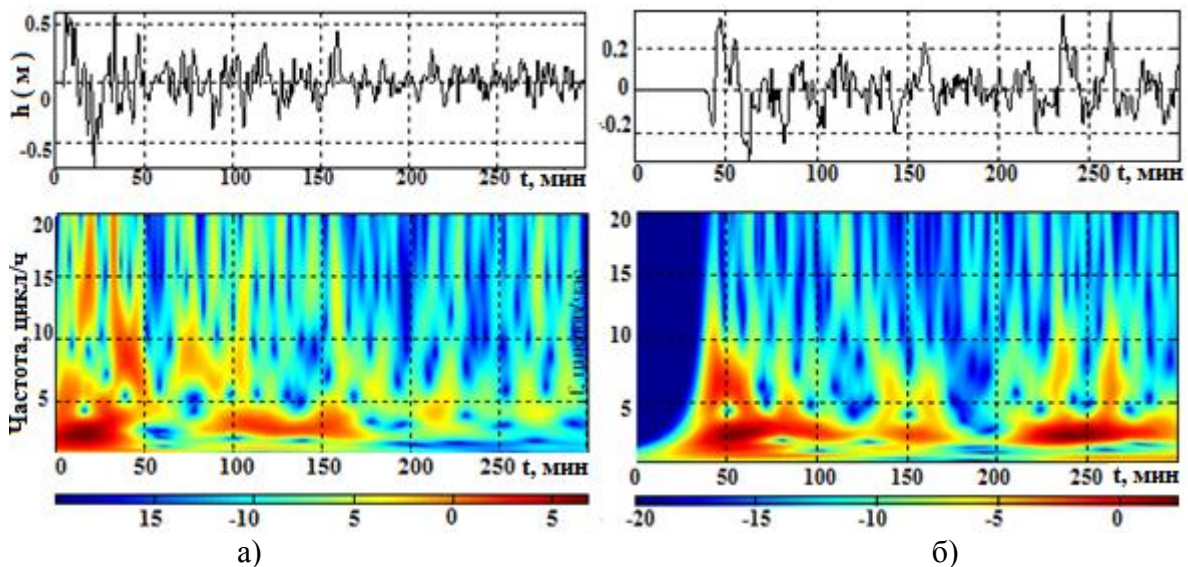


**Рис. 14. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п.29:**  
*a* – от ближнеполевого очага I; *б* – от дальнеполевого очага VI

Таким образом, можно видеть, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 цикл/ч), волновая энергия, пришедшая от ближнеполевых источников (I, II, III), достигает 20 дБ. Хорошо видно, что наибольшая энергия для дальнеполевого очага VI (рис. 14, б) лежит в интервале 1–3 цикл/ч, что соответствует периодам волн порядка 60–20 мин, с интенсивностью до 10 дБ. Для сценария 2 (рис. 15, б) существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне от 2 до 3 цикл/ч (30–20 мин волны) в интервалах от 40 до 80 мин и от 220 до 270 мин. Однако она значительно меньше, чем в первом случае (до 3–4 дБ).

Для сценария 3 (рис. 16, б) наибольшая, но очень незначительная энергия, сосредоточена в низкочастотном диапазоне от 1 до 3 ц/ч в интервале от 150 до 200 мин (60 – 15 мин длительность волн).

Таким образом, хорошо видно, что низкочастотная составляющая, соответствующая процессу цунами, присутствует также и для дальнеполевых источников V, VI. Однако интенсивность от них существенно меньше, чем для источников ближнеполевых источников I, II и III.



**Рис. 15. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п. 24:**  
*a* – от ближнеполевого очага II; *б* – от дальнеполевого очага V

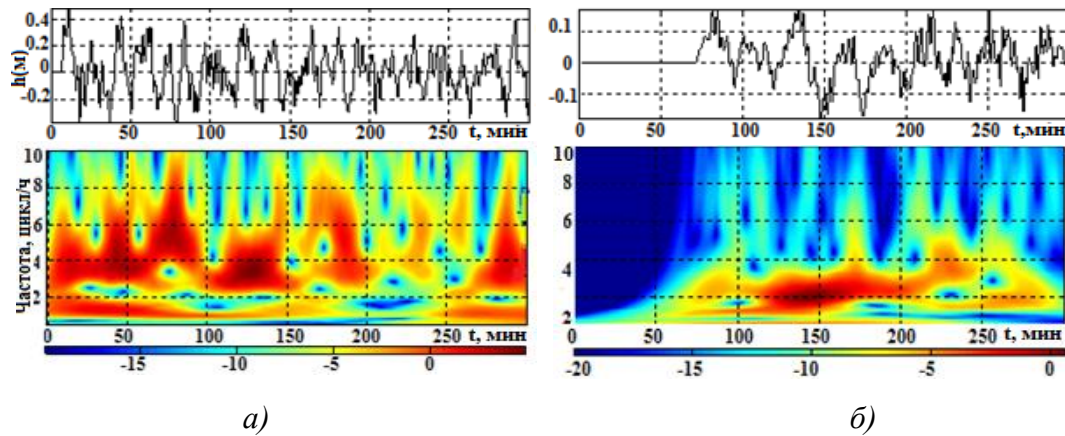


Рис. 16. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п.15:  
*a* – от ближнеполевого очага III; *б* – от дальнеполевого очага V

### Численное моделирование возможных катастрофических цунами для западного побережья Черного моря

Хорошо известно, что западная половина Черного моря экранирована от восточной части подводным хребтом, и при этом, как отмечено в работе [25]: «Источники цунами в восточной половине моря почти не передают волновую энергию в его западную часть. И, наоборот, волны, возбужденные в западной части моря, являются сравнительно слабыми в его восточной половине».

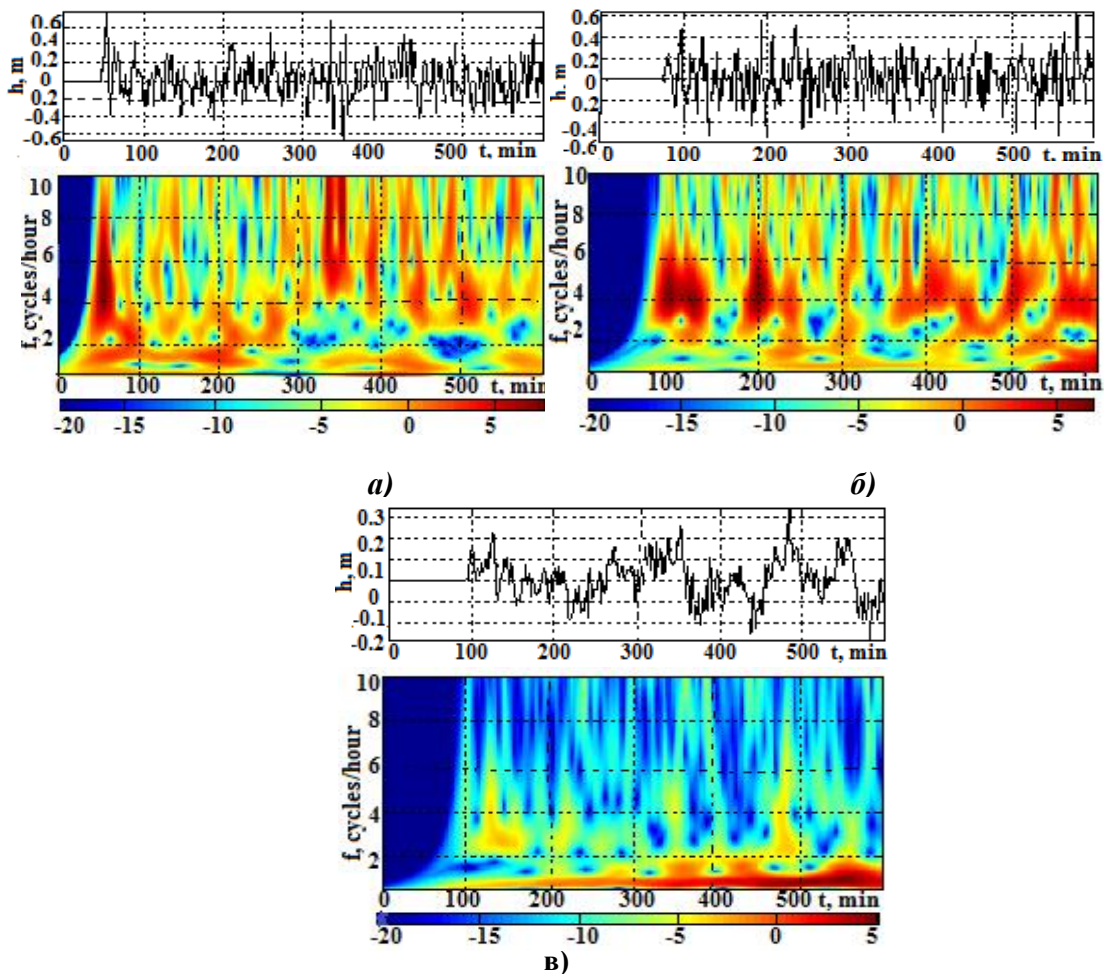


Рис. 17. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п. 31 (г. Варна) от сейсмических очагов:  
*a* – от среднеполевого очага I; *б* – от дальнеполевого очага II; *в* – от дальнеполевого очага VI

В этой работе проанализированы волновые поля вблизи городов Варна и Одесса от дальнеполевых сейсмических очагов I, II и VI. Так, для виртуального мареографа, расположенного в мористой точке около г. Варна на 4-метровой изобате (п. 31), мареограммы и соответствующие им спектрограммы представлены на рис. 17.

От очага I: Наибольшая амплитуда волн на 4-метровой изобате составляет 70 см. Волна доходит до мареографа за 40 мин. На спектрограмме хорошо видно, что есть два мощных выброса на интервалах от 30 до 70 мин в диапазоне от 3,5 до 8 цикл/ч (волны, длительностью 17-8 мин) до 10 дБ и на интервале 340-360 мин с 4 до 10 цикл/ч, т.е. для 15-, 6-минутных волн, с энергией до 8 дБ. Т.е. наиболее интенсивными являются волны с длительностью в интервале 6-17 мин, что хорошо соответствует процессу цунами. Также на спектрограмме можно видеть три области низкочастотных составляющих более слабой интенсивности до 5 дБ с частотами от 1 до 2 цикл/ч на интервалах от 20 до 100 мин, от 170 до 240 мин и от 400 до 480 мин большая доля энергии сосредоточена в высокочастотной области от 6 до 10 дБ.

От очага II: Наибольшая амплитуда волн на 4-метровой изобате составляет 55 см, однако, амплитуда первой волны не больше 20 см. В силу расположения очагов, волна приходит к пункту на 40 мин позже, чем от очага I. Как видно из спектрограммы, основная энергия локализована в двух областях: на интервале от 80 до 140 мин и 180 – 220 мин. В первом случае энергия сосредоточена, в основном, от 2,2 до 6 цикл/ч, т.е. наибольшую энергию до 7 дБ несут 25-10 мин волны. Есть также несколько областей меньшей интенсивности до 3 дБ для диапазона 3-6 цикл/ч, т.е. для 20-10 мин волн. Картина для высокочастотных составляющих сходна с спектрограммой для очага I, что может указывать на значительные переотражения волн в шельфовой зоне.

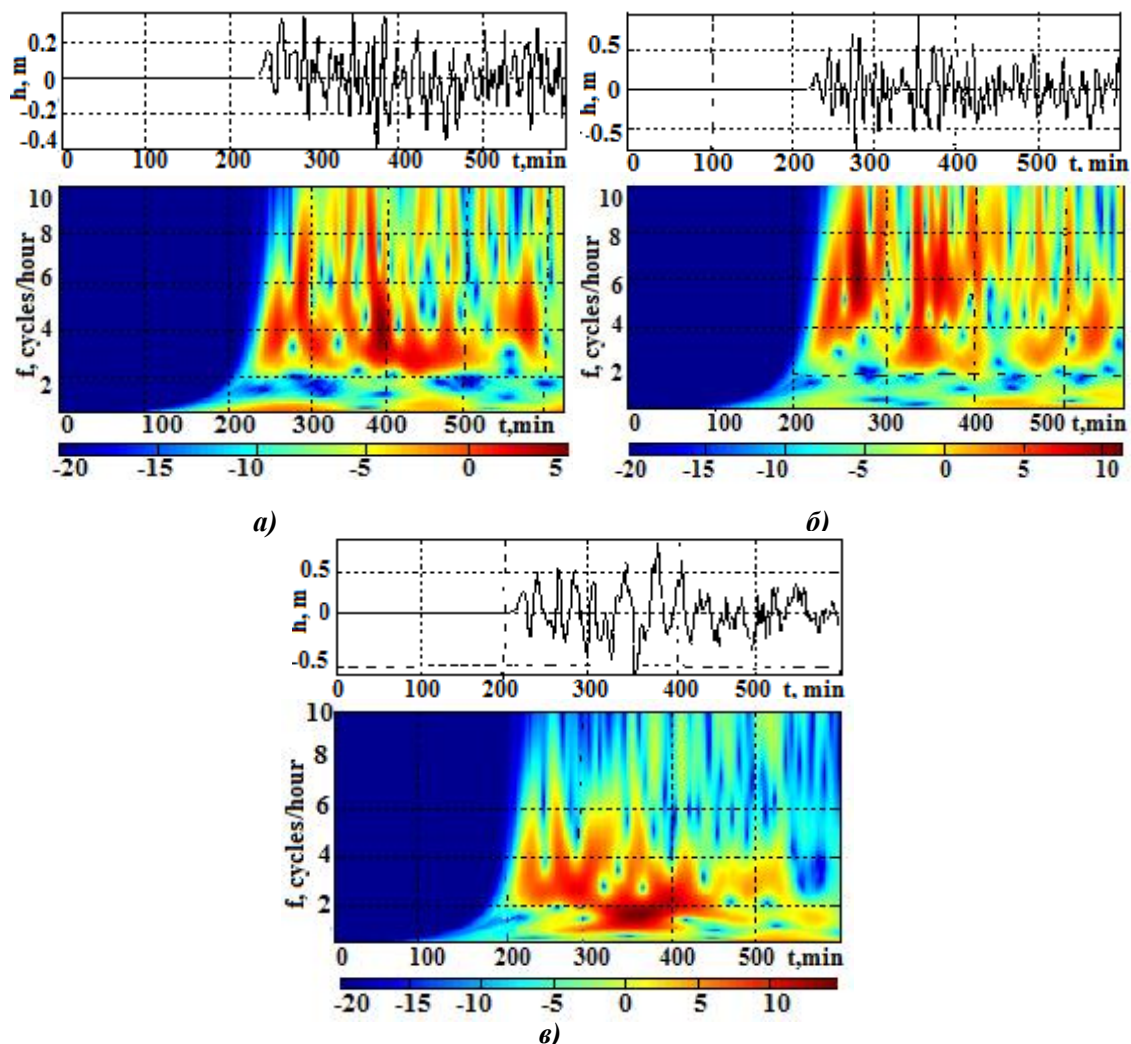


Рис. 18. Мареограммы и wavelet- спектрограммы для п. 32 (г. Одесса) от дальнеполевых очагов: а – от очага I; б – от очага II; в – от очага VI

От очага VI: для данного пункта очаг VI является дальнеполевым очагом. Волна подходит к пункту через 1 ч 40 мин. Наибольшие амплитуды волн на 4-метровой изобате составляют 35 см, однако, максимальную амплитуду имеет не первая волна. Наибольшая энергия волн сосредоточена в диапазоне до 1 до 2 цикл/ч от 300 до 600 мин, т.е. для 30-60-минутных волн. Наибольшая энергия до 5 дБ от 450 до 580 мин. Высокочастотные компоненты практически отсутствуют.

Из данного анализа хорошо видно, что даже для сильного землетрясения черноморское побережье Болгарии не будет подвергаться значительной опасности, длинноволновые волновые компоненты не концентрируют значительную энергию, что, возможно, связано с сильной волновой рефракцией. Этот вывод хорошо согласуется с выводами работ [26, 27].

Для анализа северо-западной части черноморского побережья, была выбрана мористая точка, расположенная около г. Одесса, (п. 32). Мареограммы волновых полей от трех виртуальных сейсмических источников и соответствующие им спектрограммы приведены на рис. 18.

От очага I: очаг дальнеполевой, максимальные амплитуды волн до 40 см. Вся энергия до 5 дБ сосредоточена в области 370-400 мин в вытянутой области от 2,5 до 5,7 цикл/ч, что соответствует волнам длительностью от 10 до 24 мин. Области меньшей интенсивности практически равномерно распределены на интервале 220-500 мин. При 280 мин, 350 и 370 мин в интервале 2-10 цикл/ч интенсивность волн порядка 3 дБ.

От очага II: наибольшая энергия сосредоточена в интервале 280-300 мин до 14 дБ от 5 до 8 дБ, т.е. у волн с длительностью от 5 до 7,5 мин. Меньшая интенсивность до 8 дБ наблюдается в интервале от 230 до 320 мин и от 350 до 430 мин. Энергия равномерно распределена по всем частотам от 2 до 10 цикл/ч.

От очага VI: наибольшая энергия сосредоточена в интервале 340-400 мин до 20 дБ для частот с 1 до 2 цикл/ч, что соответствует длительностям 30-60 мин. Интервалы с меньшей интенсивностью в областях с 220 до 320 мин и с 370 по 450 в интервале 2-4 цикл/ч, включающих некоторые локализованные области нулевой интенсивности.

Таким образом, даже для сильного землетрясения с магнитудой 7,3 пункты, расположенные на западном побережье Черного моря, не будут подвергаться значительной опасности, длинноволновые волновые компоненты не будут иметь значительной энергии для больших разрушений на берегу.

### Выводы

Полученные значения максимальных высот волн непосредственно связаны с выбором сценария реализации землетрясения в виртуальных сейсмических очагах: в тех случаях, когда первая вертикальная подвижка вниз в очаге ориентирована в сторону побережья. Такая реализация землетрясения приводит к появлению отрицательного фронта волны (волны понижения), направленного к побережью. Как показано в работах [20, 21], в этом случае возможно существенное усиление волны, выходящей на шельф.

Кроме того, пересчет с изобаты на сухой берег приводит к значительному подрастанию высоты волны. В связи с этим, приведенные в работе значения расчетных высот волн от модельных сейсмических очагов на 4- и 10-метровой изобате можно считать нижней оценкой при определении высот наката волн на берег. Проведенный спектральный анализ показал, что наибольшая волновая энергия в основном будет сосредоточена в низкочастотной составляющей спектра, что соответствует периодам волн порядка 12-30 мин. Наиболее опасными при этом являются ближнеполевые сейсмические источники, при которых наибольшая интенсивность волновой энергии может достигать 50 дБ.

Анализ результатов численного моделирования показал, что при сильных землетрясениях с магнитудой  $M > 7$  как для дальне-, так и для ближнеполевых очагов, наиболее цунамиопасными является российское северо-восточное побережье Черного моря, побережье

Украины в районе Ялты, юго-западное побережье Турции. Однако спектральный анализ показал, что энергия подошедшей волны и локализация эпицентра землетрясения не коррелированы.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-05-00808).*

#### Библиографический список

1. **Соловьева, О.Н.** Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // *Океанология*. 2004. №44. С. 679-685.
2. **Никонов, А.А.** Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // *Изв. РАН. Физика Земли*. 1997. №. 33. С. 72-87.
3. **Казьмин, В.Г.** Современная кинематика микроплит в Черноморском-Южно-Каспийском регионе / В.Г. Казьмин, Л.И. Лобковский, Б.Г. Пустовитенко // *Океанология*. 2004. № 44. С. 600-610.
4. **Соловьева, О.Н.** Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря / О.Н. Соловьева, И.П. Кузин // *Океанология*. 2005. №45. С. 826-833.
5. **Чебаненко, И.И.** Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережий Черного моря / И.И. Чебаненко [и др.] // *Геол. журн.* 2003. № 1. С. 54-58.
6. **Лобковский, Л.И.** Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах / Л.И. Лобковский, Б.В. Баранов // *Доклады АН СССР*. 1984. № 275. С. 843-847.
7. **Лобковский, Л.И.** Моделирование цунами в Охотском море на базе клавишной модели субдукции / Л.И. Лобковский [и др.] // в кн.: *Фундаментальные исследования морей и океанов*; под ред. акад. Н.П. Лаверов. – М.: Наука, 2006. Ч. 1. С. 292-303.
8. **Левин, Б.В.** Физика цунами / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус - К, 2005. – 360 с.
9. **Доценко, С.Ф.** Численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журн.* 1995. № 1. С. 67–80.
10. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
11. **Фомичева, Л.А.** Цунами в Черном море / Л.А. Фомичева, А.Б. Рабинович, А.Н. Демидов // *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические исследования. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 352–354.
12. Pelinovsky E.N., Preliminary estimates of tsunami danger for the northern part of the Black Sea // *Phys.Chem.Earth*. 24A (1999) Pp. 75-178.
13. **Доценко, С.Ф.** Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журнал*. 1995. № 6. С. 3-16.
14. **Доценко, С.Ф.** Черноморские цунами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1994. №30. С. 513-519.
15. **Доценко, С.Ф.** Связь интенсивности цунами в Черном море с магнитудой подводного землетрясения // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. №5. С. 12-22.
16. **Доценко, С.Ф.** Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. №3. С. 3-10.
17. **Доценко, С.Ф.** Оценки распространения цунами в северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 6. С 46–53.
18. **Доценко, С.Ф.** Характеристики черноморских цунами по данным измерений / С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. №1. С. 22-31.
19. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв.АИН РФ, ПММ*. 2002. № 3. С. 27-34.
20. **Доценко, С.Ф.** Спектры черноморских цунами / С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 5. С. 21-30.
21. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
22. **Pelinovsky E.N., Mazova R.Kh.** // *Natural Hazards*. 1992. V. 6. Pp. 227-249.

23. **Доценко, С.Ф.** Излучение длинных волн из сейсмоактивных зон Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1995. № 5. С. 3–9.
24. **Ranguelov, B.** Tsunami Hazard Research in the Black Sea. // in: Proc. 2nd Int. Conf. SEE-2, 15-17 May, 1995, Tehran. V. 1. Pp. 241-244.
25. **Ranguelov, B.** Possible tsunami deposits discovered on the Bulgarian Black Sea coast and some implications // in: Submarine Landslides and Tsunamis Kluwer Acad.Publ. 2003. Pp. 237-242.

*Дата поступления  
в редакцию 15.05.2013*

**R.Kh. Mazova, B.A. Kiselman, N.N. Osipenko, E.A. Kolchina**

## **ANALYSIS OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BLACK SEA TSUNAMI**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** In frames of nonlinear shallow water equations the nonlinear simulation of both historical and possible strong tsunami from model underwater seismic sources with various location in Black Sea basin. The location and shape of seismic sources was selected with taking into account the most seismoactive zones of Black Sea depression, using geological and geodynamical data of region. Seismic source was considered in frames of kinematical keyboard model of earthquake source.

**Approach:** Numerical and spectral analysis of computed tsunami wave field was performed.

**Findings:** With using of results of numerical simulation of generation and propagation of tsunami waves in Black Sea basin it was performed spectral analysis and there were obtained spectral characteristics of Black Sea tsunami waves for both historical and hypothetical strong underwater earthquakes. Amplitude spectra of virtual tide-gauge records in all points were computed with using of discrete Fourier transformation. For a number of points there were constructed and analyzed the wavelet spectrograms.

**Originality:** The results of analysis can be used under construction works in coastal and shelf zones of Russian coast of Black Sea. As well, the importance of such computations is connected, in particular, with problem of exploitation of sea part of gas pipe-line Russia-Turkey ("Blue Stream" project), connecting territories of these countries on the Black Sea bottom, which should operate under conditions of higher seismicity and landslide danger of Russian and Turkish slopes of the Black sea.

*Key words:* earthquake source, keyboard model of tsunamigenic earthquake, tsunami waves, numerical simulation, spectral analysis.