

# ИЗМЕРЕНИЕ ПРИБРЕЖНОГО ВОЛНЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

С.В. Доценко, С.А. Кузнецов

Севастопольский национальный технический университет,  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь,  
Украина, 99053  
E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

В статье описан косвенный дистанционный метод измерения прибрежного волнения, основанный на анализе акустического шума в прибрежной зоне. Приведены некоторые результаты измерений волнения в различных точках крымского берега портативным измерительным комплексом с применением акустических датчиков. Представлены спектр и корреляционная функция прибрежного волнения.

Многолетние исследования морского волнения показали важность этого явления для изучения мирового океана. Морские волны являются носителем колossalной энергии различного происхождения: гравитационное взаимодействие планет (приливные волны), землетрясения, штормы и т.д. Возможности измерения параметров морских волн постоянно расширяются с развитием технического прогресса. Для измерения высоты волн, направления волнения уже давно применяется множество приборов контактного измерения, устанавливаемые либо в открытом море, либо на исследовательских судах (измерительные буи). Некоторые приборы работают и вблизи берега на средних и мелких глубинах (волноизмерительные рейки, вехи, струнные волнографы, датчики давления) [1].

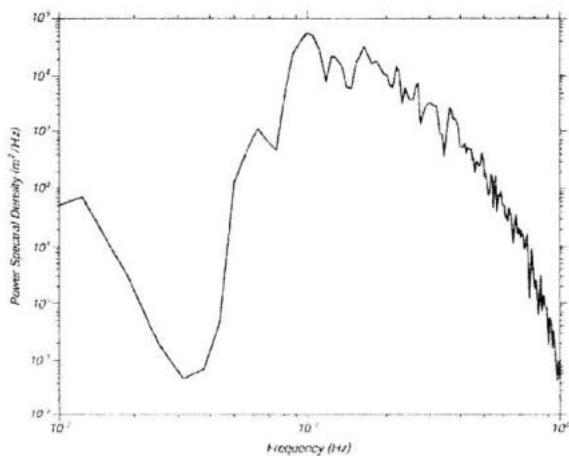
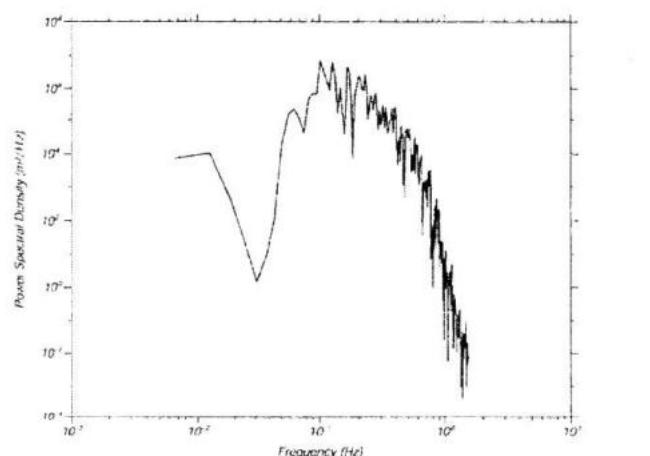


Рисунок 1 – Спектры морского волнения

Разнообразие методов и средств измерения морского волнения различной конструкции и принципов действия позволили создать сложные модели ветрового волнения (WAM, SWAN), описывающие формирование развитие и распространение волн в открытом море и на мелководье при различных географических и метеорологических условиях. Морское волнение – циклический случайный процесс, поэтому конечным представлением результатов его измерений и моделирования являются частотные энергетические спектры волнения, представленные на рисунках 1, 2.

Существуют некоторые широко известные спектральные модели ветрового волнения [2]:



- спектр Pierson and Moskowitz (1964)  
$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \cdot \exp \left[ -\beta \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right];$$
- спектральная модель JONSWAP (1973)  
$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \cdot \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \cdot \gamma^r.$$

В общем виде спектр волнения определяется следующей формулой:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \cdot \exp \left[ \frac{-B}{\omega^4} \right],$$

где А, В – параметры, вычисляемые для каждой модели исходя из учитываемых ей условий формирования и распространения морских волн.

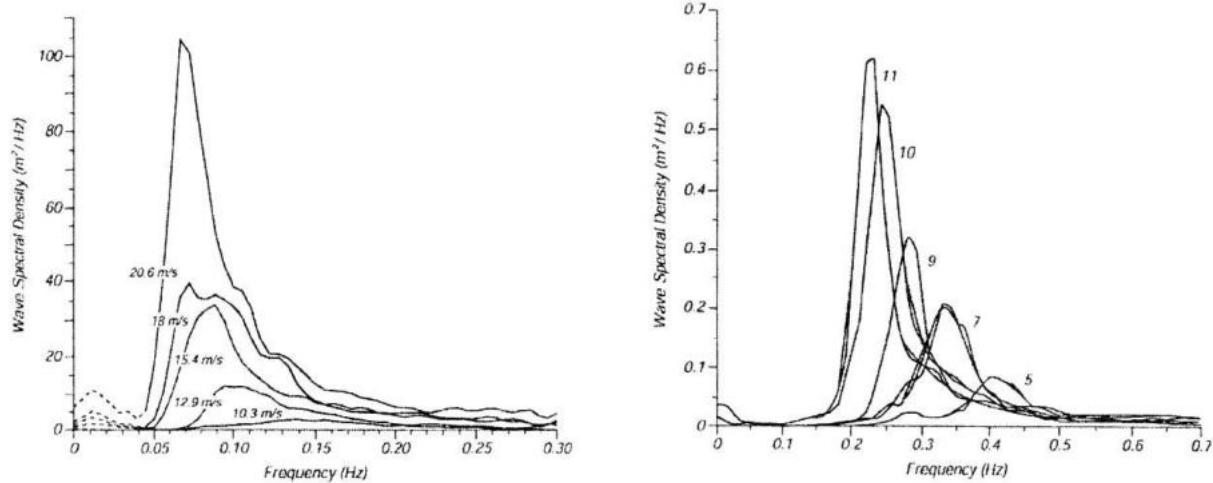


Рисунок 2 – Спектры морского волнения, вычисленные по модели Pierson and Moskowitz (а) и JONSWAP (б)

Применение таких моделей для достаточно полного описания процесса морского волнения имеет различные ограничения и не может учитывать все факторы, оказы-вающие влияние на формирование волне-ния, но в отдельных случаях дает достовер-ную информацию о форме спектра морско-го волнения.

Из теории морских волн известно, что, распространяясь от места возникновения в открытом море (глубина больше половины длины волны  $H > L/2$ ), волны практически не меняют своей структуры, перенося большую часть энергии без потерь. Однако, на мелководье ( $H < L/2$ ) за счет взаимодействия профиля волны с морским дном происходит частичное рассеивание энергии, изменяется профиль волны: при неизменном периоде увеличивается высота волн, уменьшается длина волны, а, следовательно, и фазовая скорость распространения волны. Таким образом, кинетическая энергия волн с уменьшением глубины постепенно переходит в их потенциальную энергию. В опре-деленный момент высота волны достигает критического значения и происходит обру-шение водной массы волны с высвобожде-нием всей переносимой ей энергией. Часть прибрежной зоны, в которой происходит обрушение морских волн, называется при-бойной зоной. После обрушения морских волн, их энергия становится источником для большей части активных динамических процессов, происходящих в прибрежной зоне: абразия (разрушение) берегов, бере-говых укреплений, создание вынос берего-вого обломочного материала, создание вдольбереговых течений и других, которые ведут к существенным изменениям рельефа

берега. Зачастую эти явления являются нежелательными и носят негативный ха-рактер для объектов хозяйственной дея-тельности, расположенных в прибрежной зоне и на берегу, а в штормовых условиях могут представлять угрозу береговым со-оружениям, судам, в том числе и жизни людей, т.к. в прибрежной зоне наиболее активно ведется рекреационное природо-пользование. Разрушительные последствия шторма в Севастополе приведены на ри-сунке 3.

Это также делает невозможным наблю-дение волнения в прибрежной зоне извест-ными контактными средствами, которые могут быть выведены из строя или уничто-жены прибоем.

Проведение таких наблюдений должно предоставить необходимую информацию для рационального освоения береговых ре-сурсов: строительства, укрепления берегов, судоходства, размещения пляжей, а также получить научные данные о прибрежном волнении, его спектральные характеристи-ки для сравнения с существующими моде-лями.

Вернемся к самому явлению. Все физи-ческие воздействия, сопровождающиеся обрушением массы воды, создают сильное акустическое поле в прибрежной зоне. Это поле в народе имеет название «шум моря» или «шум прибоя». Существует мнение психологов об успокаивающем действии шума прибоя, а при сильном волнении и шторме эти шумы могут оказаться скорее устрашающее воздействие. Природа этого акустического явления заключается в сово-купности различных его источников: удар воды о берег, бурление и образование пены,



Рисунок 3 – Набережная в Артбухте г. Севастополя после шторма (ноябрь 2007 г)

схлопывание пенных пузырьков, перемещение берегового обломочного материала накатом и откатом волны. Это определяет и его характерные особенности: шумовая структура и цикличность, что видно из

фрагмента реализации на рисунке 4. Изучение этих особенностей позволяет косвенным методом исследовать прибрежное морское волнение в различных географических и метеорологических условиях.

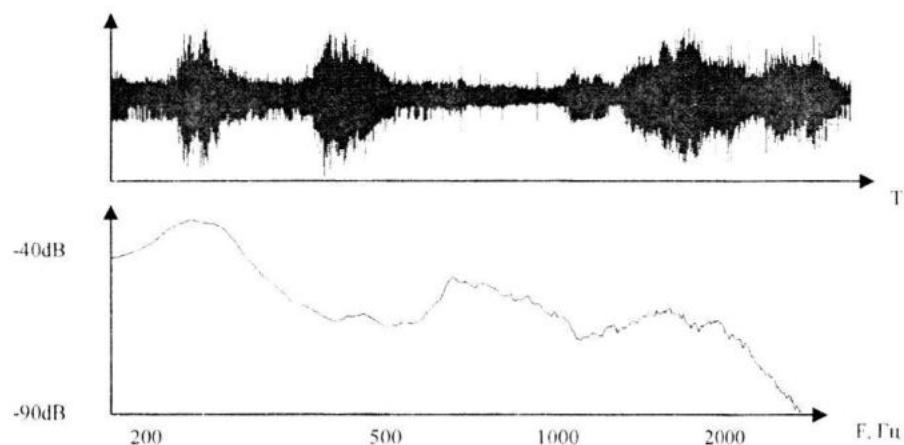


Рисунок 4 – Фрагмент реализации (17 с) акустического шума моря (а) и его спектр (б), полученной при помощи геофона

Для изучения акустического поля прибрежного волнения создан комплекс измерительных средств, структура которого приведена на рисунке 5. В качестве регистрирующего устройства применяются акустический (динамический микрофон, диапазон частот 20 – 20000 Гц), либо сейсмоакустический датчик (геофон, диапазон 100 – 2400 Гц). Для каждого из них разработано согласующее устройство для совместимости подключения к линейному входу звуковой карты, которая применялась для оцифровки регистрируемых сигналов. АЦП применяемой в системе внешней звуковой карты (Creative X-Fi), позволяет проводить аналогово-цифровое преобразование с частотой дискретизации 44100 Гц акустического сигнала в полосе частот от 20 Гц до 20 кГц. Первичная обработка и хранение реализаций проводилась на ноутбуке, ос-

нащенном интерфейсом USB для обмена с АЦП звуковой карты.

Особенности комплекса: гибкость конфигурации (подключение различных типов датчиков); автономность; мобильность; дистанционность измерений;

Двухканальная конструкция сейсмоакустического комплекса позволяет принимать сигнал с двух датчиков одновременно в режиме стерео. Наличие двух синхронных записей реализации акустического процесса позволяет получить информацию о прибрежном волнении для определения его корреляционной структуры в зоне обрушения волн.

Использование ПК в составе измерительного комплекса дает возможность проводить первичную обработку данных и вести мониторинг за состоянием прибрежного волнения в режиме реального времени.

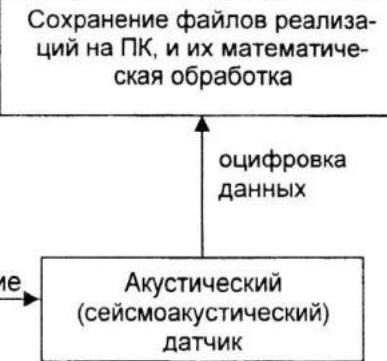
Также ПК (ноутбук) обеспечивает создание и хранение файлов реализаций исследуемого акустического процесса на жестком диске, а также их передачу по каналу связи в случае необходимости.



Рисунок 5 – Система сейсмоакустического наблюдения прибрежного волнения

Объем обрабатываемых и накапливаемых данных этим комплексом может быть существенным. Например, при частоте дискретизации 44100 Гц, стандартно применяемой в АЦП звуковой карты для оцифровки сигнала, и при разрядности выборки 24 бита/отсчет, поток данных составляет примерно 1 Мбит/с на один канал. Для двухканальной записи реализации акустического сигнала прибрежного волнения продолжительностью 1 час файл реализации будет занимать объем более 450 Мб. Выбор оптимальной частоты дискретизации осуществляется с учетом теоремы Котельникова. Для оцифровки сигнала с динамического микрофона, максимальная частота рабочего диапазона, для которого 20000 Гц, необходимо выбирать частоту дискретизации 40000 Гц. Это условие обеспечивается выбранным значением частоты 44100 Гц. Применение других типов акустических датчиков с меньшей верхней частотой диапазона, позволяет снизить поток и объем накапливаемых данных за счет снижения частоты дискретизации без потери полезной информации. Файлы реализаций представляют собой двухканальные или одноканальные массивы цифровых отсчетов вместе с параметрами дискретизации (частота, разрядность) в формате WAVE (PCM). Этот формат удобен для использования файлов в прикладном программном обеспечении (ПО) для предварительной обработки (звуковые редакторы) и в специальном ПО (Matlab) для математического анализа и обработки реализаций.

стком диске, а также их передачу по каналу связи в случае необходимости.



Акустический шум прибоя  $A(t)$ , измеряемый в некоторой точке можно представить в виде математической мультиплексивной модели шумового акустического сигнала  $S(t)$ , модулированного процессом обрушения морских волн на берег  $W(t)$ :

$$A(t) = W(t) \cdot S(t). \quad (1)$$

Применение этой модели для описания акустического шума прибрежного волнения представлено на рисунке 6.

Реализация процесса  $W(t)$  определяется как огибающая шума  $A(t)$ . Выделение огибающей случайного процесса  $A(t)$  осуществляется с помощью вычисления модуля аналитического сигнала  $A'(t)$

$$A'(t) = A(t) + jA^H(t), \quad (2)$$

соответствующего  $A(t)$ , построенного на основании его преобразования по Гильберту  $A^H(t)$  [3, 4]

$$A^H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (3)$$

Согласно этой модели процесс  $W(t)$  имеет математический смысл огибающей, т.е. коэффициента изменения амплитуды шума от времени и является косвенной характеристикой прибрежного волнения. В рамках данной статьи не рассматривается её связь с физическими параметрами обрушения волн, однако, её применение к анализу прибрежных акустических шумов дает возможность определения частотно-временной структуры процесса прибрежного волнения в точке измерения. На рисунке 7 приведен спектр и коррелограмма процесса  $W(t)$ .

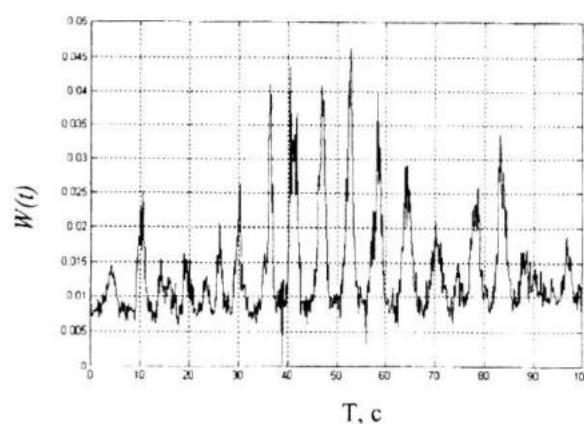
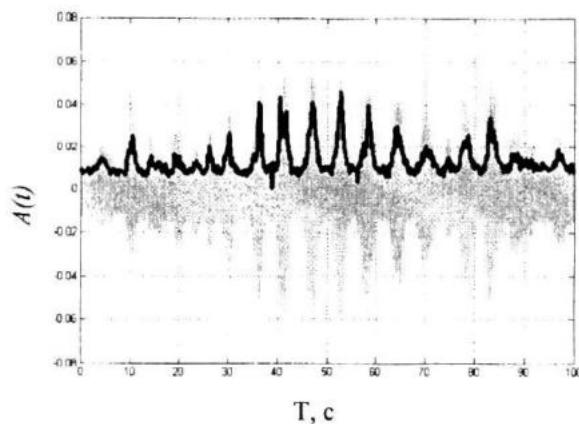


Рисунок 6 – Акустический шумовой сигнал  $A(t)$  (а) и его огибающая  $W(t)$  (б)

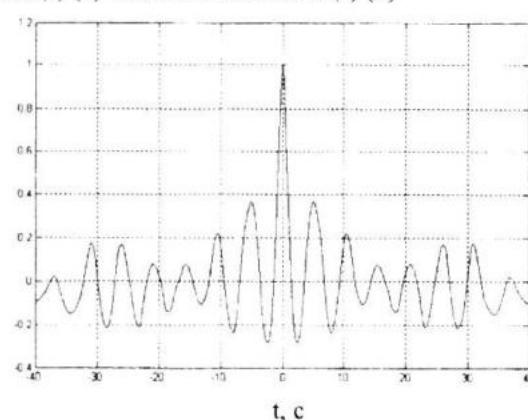
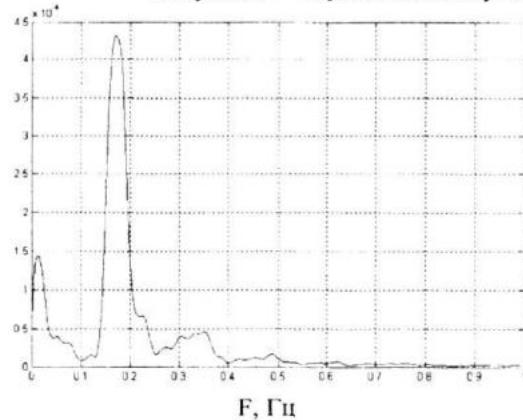


Рисунок 7 – Спектральная плотность мощности и корреляционная функция процесса  $W(t)$ , косвенно характеризующего прибрежное волнение

$W(t)$  – случайный стационарный и циклический процесс. Наличие пиков в графике плотности его спектральной мощности говорит о об одной или нескольких составляющих, несущих основную часть энергии прибрежного волнения в диапазоне до 1 Гц, что соответствует компонентам ветрового волнения (рис. 1, 2).

Коррелограмма и спектр характеристики прибрежного волнения  $W(t)$  (рис. 7) дают информацию о периоде обрушения волн составляющих прибрежного волнения. Для приведенной реализации (рис. 6а) он составляет из расчета  $T_b = 1/F_m = 5.6$  с, где  $F_m = 0.18$  Гц – частота, соответствующая максимуму спектральной энергии. Это значение периода хорошо соотносится со средним значениям визуального замера периода обрушения волн (5.5 с).

Сравнение характеристик  $W(t)$  для различных точек измерения позволяет говорить об относительной силе и интенсивности воздействия прибрежного волнения в различных точках побережья, на которых проводились измерения. Для получения абсолютных характеристик необходимо проведение акустических измерений совместно с измерением высоты волны в зоне обрушения.

Следующим этапом разработки сейсмоакустического комплекса и метода измерения прибрежного волнения является сооставление результатов таких исследований и проведение начальной калибровки, а также дальнейшая разработка модели исследуемого явления с учетом полученных результатов измерений высоты волны и результатов других измерений параметров морского волнения.

## Л и т е р а т у р а

1. Коровин В.П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря: учеб. Пособие для вузов – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. – 434 с.
2. Ocean Waves [Электронный ресурс] / Robert H. Stewart Introduction to Physical Oceanography. – Texas A&M University, Department of Oceanography, 2008. – URL: [http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng\\_textbook/chapter16/chapter16\\_01.htm](http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter16/chapter16_01.htm)
3. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
4. Рожков В. А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 280 с.