

Е. В. Чечина

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**БАЗА ВОЛНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ
СО СТАЦИОНАРНОЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОТДЕЛЕНИЯ МГИ НАН УКРАИНЫ**

Представлена база волнографических данных, полученных с платформы в Качивели в течение последних 10 лет. База включает возвышения морской поверхности, регистрируемые решеткой волнографов, а также одновременно измеренные скорость и направление ветра. Описаны структура база данных, пакет программ для их обработки и анализа, процесс отбраковки сбойных записей. Обсуждено качество данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *база волнографических данных, возвышения и уклоны морской поверхности, решетка волнографов, контроль качества волновых данных.*

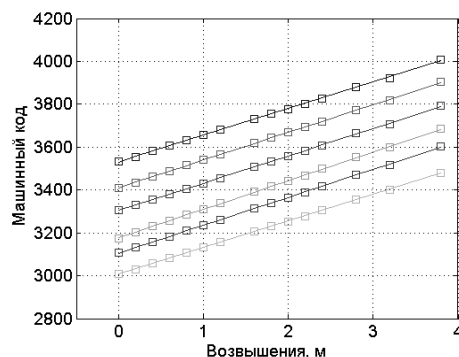
Введение. В течение десятка последних лет на стационарной океанографической платформе (которую дальше будем называть «платформой») Экспериментального отделения МГИ НАН Украины в пгт. Качивели выполнялись записи решеткой струнных волнографов. Они содержат информацию об амплитудах и направлениях распространения поверхностных волн. В результате был накоплен довольно большой объем данных. Как правило, записи выполнялись в рамках экспериментов, нацеленных на исследование других характеристик морской поверхности [1]. Однако волнографические данные представляют самостоятельный интерес, и желательно объединить их в специальную базу данных вместе с сопутствующими данными о локальной скорости ветра, выполнить контроль качества данных, и дополнить базу средствами анализа, что является целью данной работы.

Созданная база данных, прежде всего, может быть использована для проверки оперативных метеорологических и волновых моделей, как для Черноморского региона, так и для прибрежной зоны. Кроме того, данные могут быть использованы для проверки физических концепций, что уже было продемонстрировано в [2, 3]. Длительные записи волнографических характеристик в хорошо контролируемых условиях нужны для изучения статистических характеристик волнения таких, как спектр и моменты высшего порядка (асимметрия, эксцесс).

Общее описание массива данных. Океанографическая платформа расположена вблизи пгт. Качивели (южный берег Крыма) на расстоянии 0,5 км от берега, где глубина моря составляет около 30 м, подробное описание платформы можно найти в [1]. Данные были получены в ходе осенне-летних экспедиций в 2003 – 2005, 2007 – 2009 и 2011 – 2012 гг. Волнографические записи проводились для непрерывных промежутков времени длительностью от 20 до 200 мин. Резюме по базе данных приведено в таблице, где указан период времени измерений в каждом году, а также общее количество часов записи. В базу были включены только данные, обеспеченные надежными непрерывными измерениями вектора скорости ветра.

Т а б л и ц а . Резюме по базе данных.

год	даты	кол-во часов
2003	10.07 – 03.09	170
2004	07.08 – 03.09	116
2005	06.08 – 11.10	280
2007	16 – 22.08	120
2008	22.09 – 31.10	530
2009	26.09 – 06.11	450
2011	13.09 – 13.10	341
2012	05.06 – 17.10	2107



Р и с . 1 . Тарировочные кривые 6 датчиков.

Волнографические данные были получены с помощью решетки из шести струнных волнографов [2, 4], которые расположены в центре и вершинах правильного пятиугольника с радиусом описанной окружности 25 см. Решетка подвешивалась на подъемном выстреле так, что расстояние волнографа до ближайшего элемента платформы всегда превышало 10 м. Регулярно проводилась сквозная калибровка всей системы: решетка как целое смещалась на определенное расстояние по вертикали, при этом фиксировались выходные сигналы с каждого датчика. Положение датчиков определялось с точностью до миллиметров с использованием видеокамеры. Чтобы получить тарировочную кривую для каждого датчика в пределах смещений до 4 м, процедура неоднократно повторялась. На рис.1 приведен пример тарировочных кривых, которые позволяют вычислить калибровочные коэффициенты датчиков, а также проконтролировать линейность каждого датчика.

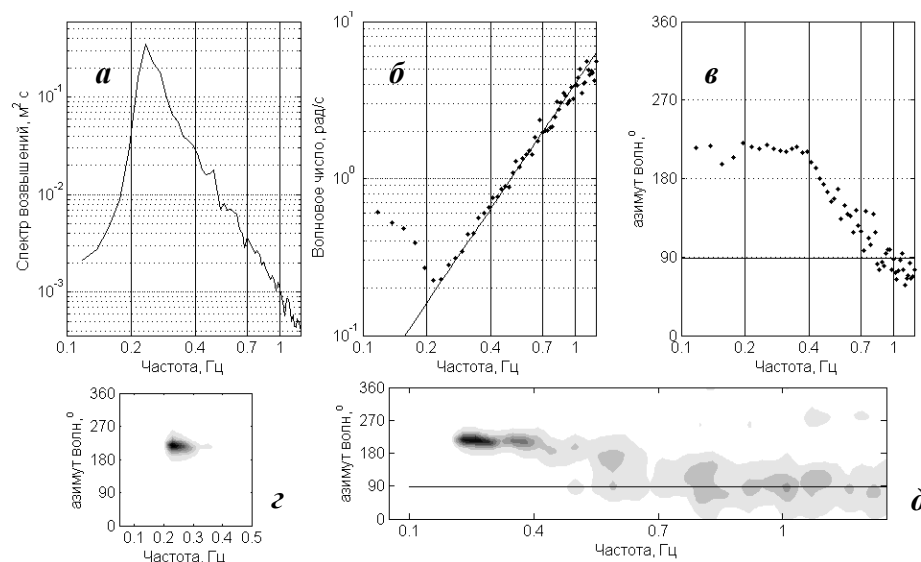
Измерения скорости и направления ветра выполнялись на высоте 21 м над уровнем моря с центральной мачты над платформой. Для этого в различных экспедициях использовались различные метеорологические комплексы, а с 2011 года запись метеоданных ведется метеорологическим комплексом «Davis». Для включения в базу данных метеозаписи различного формата были приведены к единому виду.

Структура базы и средства анализа данных. Следуя подходу, принятому для баз спутниковых данных, было организовано два уровня базы — нулевой и первый. Нулевой уровень включает все исходные файлы волнографических и метеорологических данных, файлы по калибровочным работам, электронные копии экспедиционных журналов. Первый уровень включает обработанную информацию, представленную в едином формате — в виде возвышений морской поверхности для каждого датчика и вектора скорости ветра, привязанных к временным рядам. Временные ряды могут соответствовать частотам исходных записей (10, 20, 50 или 100 Гц) или меньшим частотам, заданным в зависимости от решаемой задачи.

Нулевой уровень базы был реализован на физическом уровне в виде архива данных. Первый уровень был реализован в виде компьютерного пакета связанных программ, позволяющего выводить обработанную информацию для заданного промежутка времени. В процессе обработки выполняется отбраковка данных и контроль их качества, подробно обсуждаемый ниже. Пакет преду-

смаатривает различные виды визуализации данных, а также расчет стандартных статистических характеристик (средних, стандартных отклонений и т.п.).

Средства анализа включают программы для оценки частотных и частотно-угловых спектров волнения, и программы для совместного исследования возвышений и уклонов морской поверхности (для «триплет-анализа»). Для оценки частотных спектров применяется метод Вэлша [5] – БПФ выполняется по наполовину перекрывающимся отрезкам записи (длительностью около 100 с в нашем случае), затем оценка спектра следует из усреднения квадратов модулей Фурье-разложения [6]. Для оценки частотно-угловых спектров использован прикладной пакет *DIWASP* [7], процедуры которого вызываются из пакета анализа базы данных. Спектры могут быть оценены методом максимального правдоподобия и методом максимальной энтропии [8, 9]. Оба метода дают близкие формы спектров, но их сопоставление может дать визуальное представление о степени неопределенности спектральной оценки. На рис.2, *a* и *г* в качестве примера использования пакета анализа данных показаны частотный и частотно-угловой спектры одной из реализаций. Для удобства сравнения с направлением ветра по оси углов на рис.2, *г* отложены азимуты, откуда приходят волны. На частотном спектре не различаются зыбь и ветровые волны, но такое разделение легко сделать по частотно-угловому спектру. Как правило, на рисунках с частотно-угловым спектром из-за линейного масштаба представления спектра можно видеть лишь энергонесущую часть волнения. Чтобы были видны ветровые волны с большими частотами, на рис.2, *д* представлен спектр, умноженный на четвертую степень частоты, пропорциональный спектру уклонов. Как следует из рисунка, коротковолновая часть волнения распространяется в направлении ветра.



Р и с . 2. Характеристики волн за 16 августа 2007 г. 17:19 – 17:39. частотный спектр (*a*); дисперсионное соотношение: оценка (точки) и линейная теория (линия) (*б*); среднее направление волн (линия – направление скорости ветра) (*в*); частотно угловой спектр возвышений (*г*); частотно угловой спектр уклонов (*д*).

Измерения волнографической решеткой дают возможность изучать не только возвышения морской поверхности (Z), но и ее уклоны. Вектор уклона, т.е. производные от возвышений по горизонтальным координатам x и y (Z_x и Z_y), может быть оценен по любой тройке волнографов в каждый момент времени. Наиболее надежные оценки можно получить методом наименьших квадратов путем построения плоскости, приближающей шесть измерений возвышений, которые получены всеми датчиками. В результате в каждый момент времени будут известны три величины – Z , Z_x и Z_y , называемые триплетом [8]. Анализ, основанный на рассмотрении взаимных спектров триплетов, был в свое время предложен для интерпретации данных буев «pitch/roll» [10], а в последнее время он используется для контроля качества волнографических данных [11]. Применительно к нашей базе данных «триплет-анализ» дает прямые оценки среднего направления волн и угловой ширины спектра в зависимости от частоты, а также прямую оценку среднего для каждой частоты волнового числа [8, 10]. В качестве примера на рис. 2б показаны результаты анализа триплетов – зависимости рассчитанного волнового числа и среднего направления волн рис. 2в от частоты в сравнении с теоретическим дисперсионным соотношением для гравитационных волн и направлением ветра. С приближением частоты волн к 1 Гц длины волн уменьшаются вплоть до 1,5 м и становятся сравнимыми с размером решетки волнографов (0,5 м). При этом решетка уже не может служить инструментом для измерения уклонов морской поверхности. Это объясняет отклонение оценок от дисперсионного отношения для высокочастотных волн на рис. 2, б. Дисперсионное соотношение выполняется на частотах выше частоты спектрального пика и нарушается для более низких частот, где нет волновой энергии, в соответствии с выводами работы [12]. Рис. 2, в показывает, что среднее направление коротких волн соответствует направлению ветра.

Качество данных. Важнейшим элементом создания базы данных является отбраковка непригодных фрагментов записей. Из-за сбоев электропитания, прохождения рядом с датчиками прогулочных и рыболовных маломерных судов, загрязненности акватории как антропогенными пленками, так и бытовым мусором (упаковками от различных продуктов, пластиковыми бутылками, полиэтиленовыми пакетами, водорослями и т.д.), возникают сбои записи, которые выражаются в реализации как выбросы. Чаще всего наблюдаются одиночные выбросы, но встречаются и групповые, когда выпадают несколько точек подряд или длительные фрагменты записи какого-либо датчика. Устранение выбросов выполнялось в 2 этапа. Одиночные выбросы фильтровались по второй производной возвышений по времени, имеющей смысл вертикального ускорения морской поверхности. Для этой величины в интерактивном режиме устанавливался порог, и отбраковывались все точки, модуль ускорения для которых оказывался выше порога. На втором этапе обработки, выполняемом в автоматическом режиме, устранялись групповые выбросы. В качестве контрольной величины использовалась разность между возвышениями с двух различных датчиков. Для всех комбинаций пар датчиков вычислялись стандартные отклонения этой величины за период в 20 мин. Из них выбирался минимальное значение, а порог определялся путем

умножения минимального значения на заранее подобранный коэффициент. Выходной файл содержал ряды возвышений, где одиночные выбросы были устранены путем линейной интерполяции по правильным измерениям. Кроме того, файл включал массив, где содержались номера сбойных точек.

Такие данные уже пригодны для оценки спектров возвышений, но требуют дальнейшей обработки для аккуратного расчета уклонов морской поверхности. Решетка волнографов предназначена для регистрации колебаний поверхности с периодами поверхностных волн, поэтому в ней не предусмотрена стабилизация среднего уровня сигнала для больших периодов. Соответствующие колебания в сигнале не несут надежной информации о движениях морской поверхности и являются источником ошибок, если нас интересует разность возвышений на различных датчиках. Кроме того, из-за неравномерного суточного нагрева элементов измерительного комплекса происходили слабые (на уровне 1 %) вариации калибровочных коэффициентов датчиков, которые также нужно принять во внимание при анализе уклонов.

Цель следующего этапа обработки – устранить долгопериодные вариации среднего уровня и выполнить скользящую интеркалибровку датчиков. Для этого использовались скользящие средние и дисперсии по интервалам времени 20 мин со сдвигом 10 мин для каждого датчика. Средние вычислялись по массивам, где были удалены выбросы, а затем вычитались из выходных данных. Дисперсии рассчитывались по автоспектрам в диапазоне частот от 0,1 до 0,5 Гц с использованием данных, где выбросы были заменены, используя интерполяцию. Если в двадцатиминутном фрагменте более 3 % точек содержали выбросы, фрагмент отбраковывался. Средняя дисперсия по всем датчикам и была использована для окончательной нормировки данных.

Аналогичная проблема устранения выбросов в волнографических данных, полученных с помощью массива лазерных альтиметров в Норвежском море, обсуждалась в [11]. Там было предложено выполнить Фурье-фильтрацию данных, оставив лишь волновые частоты (от 0,1 до 0,5 Гц), а затем сравнить исходные и профильтрованные данные. При таком анализе легко выделяются одиночные выбросы, однако он требует визуального просмотра всех данных. Наш подход лишен этого недостатка – в нем отбраковка непригодных данных выполняется в полуавтоматическом режиме. Однако для части записей мы применили также подход [11], чтобы твердо убедиться в надежности работы нашего пакета программ.

Выводы: В данной работе создана база волнографических данных высокого качества на основе уже существующих записей, выполненных решеткой волнографов с платформы в пгт. Кацивели. Также создан пакет связанных компьютерных программ, позволяющих проводить контроль качества, отбраковывать сбойные данные, и выполнять традиционный анализ записи. Подготовленные данные и компьютерные программы будут использованы для изучения нелинейных свойств поверхностных волн.

Автор с благодарностью отмечает, что данные получены сотрудниками лаборатории прикладной физики моря отдела дистанционных методов исследований МГИ НАН Украины. Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке 7-го рамочного европейского проекта *CoCoNET* и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины по контракту Ф53/117-2013.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа. К 30-літтю океанографічної платформи в Кацивели.*– Севастополь: ЕКОСИ-Гідрофізика, 2010.– вип.21.– 265 с.
2. *Сапрыкина Я.В., Дулов В.А., Кузнецов С.Ю., Смолов В.Е.* Аномально високі хвилі в Чорному морі: механізм і умови виникнення // *Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа.*– Севастополь: ЕКОСИ-Гідрофізика, 2010.– вип.21.– С.88-103.
3. *Ivanov V.A., Dulov V.A., Kuznetsov S.Yu. et al.* Risk assessment of encountering killer waves in the black sea. // *Geography environment sustainability.*– 2012.– № 1, V05.– P.84-112.
4. *Малиновський В.В., Дулов В.А., Большаков А.Н. і др.* Методичне і технічне забезпечення калібрування РЛСБО ІСЗ «СІЧ-1М» для робіт над морською поверхнею. Можливий підхід // *Екологічна безпека прибережної і шельфової зон і комплексне використання ресурсів шельфа.*– Севастополь: ЕКОСИ-Гідрофізика, 2004.– вип.11.– С.236-251.
5. *Welch P.D.* The use of FFT for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short modified periodograms // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*– 1967.– v.AU-15, № 2.– P.70-73.
6. *Бендат Дж., Пірсол А.* Прикладний аналіз випадкових даних.– М: Мир, 1989.– 540 с.
7. *Johnson D.* DIWASP, a directional wave spectra toolbox for MATLAB®: User Manual // *Research Report WP-1601-DJ.*– Perth, Australia: Centre for Water Research, University of Western Australia, 1999.– 16 p.
8. *Kahma K., Hauser D., Krogstad H.E., Lehner S., Monbaliu J.A., Wyatt L.R.* Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves. // *EU COST Action – 714 -EUR-21367, Brussels.*
9. *Ефімов В.В.* Динаміка хвильових процесів в пограничних шарах атмосфери і океана.– Київ: Наукова думка.– 1981.– 256 с.
10. *Long R.B.* The statistical evaluation of directional spectrum estimates derived from pitch/roll buoy data // *J. Phys. Oceanogr.*– 1980.– v.10.– P.944-952.
11. *Krogstad H.E., Barstow S.F., Mathisen J.P., Lønseth L., Magnusson A.K., Donelan M.A.* Extreme Waves in the Long-Term Wave Measurements at Ekofisk // *Proc. Rogue Waves.* Oct. 13-15 2008.– Brest, 2008.– P.23-33.
12. *Krogstad H.E., Trulsen K.* Interpretations and observations of ocean wave spectra // *Ocean Dynamics.*– 2010.– 60:973–991 doi 10.1007 - s10236-010-0293-3.

Матеріал надійшов в редакцію 19.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ Представлена база хвильографічних даних, отриманих з платформи в Кацивели упродовж останніх 10 років. База включає піднесення морської поверхні, реєстровані решіткою хвильографів, а також одночасно виміряні швидкості і напрям вітру. Описані структура бази даних, пакет програм для їх обробки і аналізу, процес відбракування збіжних записів. Обговорено якість даних.

ABSTRACT Database compiling wave data obtained on the Katsively Research Platform for the past 10 years is presented. The database contains sea surface elevations recorded with wave staff array, wind speed and wind direction. Database structure, software package for data processing and analysis, and quality check procedure are described. Data quality is discussed.