

УДК 551.465.4

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНЫХ УКЛОНОВ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. С. ЗАПЕВАЛОВ

Морской гидрофизический институт НАН Украины

Получено 05.02.2004

На основе данных натурных исследований, проводившихся на Черном море, анализируется изменчивость статистических моментов уклонов морской поверхности. Измерения выполнены с помощью двумерного лазерного уклонометра на океанографической платформе МГИ НАН Украины. Получены зависимости статистических характеристик уклонов от скорости ветра. Показаны ограничения в использовании рядов Грама-Шарлье для аппроксимации плотности вероятностей компонент уклонов.

На основі даних натуральних досліджень, що проводилися на Чорному морі, аналізується мінливість статистичних моментів схилів морської поверхні. Вимірювання виконані за допомогою двовимірного лазерного уклономіра на океанографічній платформі МГІ НАН України. Отримана залежність статистичних характеристик схилів від швидкості вітру. Показані обмеження у використанні рядів Грама-Шарльє для апроксимації щільності імовірностей компонент схилів.

The static moments unsteadiness of the sea surface slopes is analyzed on the basis of the data of field measurements conducted in the Black Sea. The measurements were carried out by means of a 2D-laser slope meter from the oceanographic platform owned by Marine Hydrophysical Institute, NAS of Ukraine. The dependence of the slope static characteristics on the wind velocity has been found out. The limitation in using the Gram-Charlier series for the approximation of the slope component probability density is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению изменчивости характеристик локальных уклонов морской поверхности обусловлен интенсивным развитием дистанционных методов исследования океана [1]. В настоящее время для развития теории рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью в первую очередь необходимо иметь детальное представление о функциях распределения вероятностей высот волн и уклонов [2].

Проблема изучения тонкой топографической структуры морской поверхности в основном связана с технической сложностью проведения измерений в натурных условиях. Основной вклад в интегральные характеристики уклонов дают короткие волны, энергия которых на несколько порядков ниже энергии доминантных составляющих волнового поля. Наиболее эффективными техническими средствами исследований являются оптические, которые имеют высокое разрешение и, в отличие от контактных, не вносят возмущений в волновое поле. Оптические средства позволяют измерять уклоны, созданные волнами разной длины, включая масштабы капиллярных волн. Среди оптических средств наиболее распространенными являются фото- и телесъемка, а также лазерные уклонометры [3, 4].

К настоящему времени в лабораторных услови-

ях достаточно хорошо изучены отдельные физические механизмы, определяющие рост и затухание поверхностных волн. В то же время натурные измерения, выполненные в условиях короткого разгона, показали, что уровень спектральной плотности высокочастотных ветровых волн при слабых ветрах в море выше, чем в лабораторных экспериментах [5]. Различия в результатах натурных и лабораторных исследований связаны с флуктуациями скорости ветра, которые в морских условиях, как правило, более значительны [6], а также с влиянием длинных волн, которое невозможно в полной мере смоделировать в аэрогидродинамических каналах [7].

Изменение роли отдельных физических механизмов, ответственных за генерацию и затухание коротковолновых составляющих волнового поля, влияние геофизических факторов приводят к сильной изменчивости характеристик тонкой топографической структуры морской поверхности. Цель настоящей работы – определить фактическую изменчивость характеристик локальных уклонов морской поверхности в прибрежной зоне и оценить ее связь со скоростью ветра.

1. АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений уклонов морской поверхности ис-

пользовался двумерный лазерный уклономер, конструкция которого разработана Морским гидрофизическим институтом совместно с Киевским политехническим институтом. Принцип работы прибора основан на измерении углов отклонения лазерного луча при прохождении из-под воды взволнованной границы раздела вода-воздух. Прибор имеет следующие технические характеристики: диапазон измеряемых уклонов $\pm 30^\circ$; погрешность измерений (по лабораторным испытаниям) – 0.2° ; диапазон допустимых высот волн – до 1 м, дискретность измерений – 0.02 с.

Измерения проводились на океанографической платформе Морского гидрофизического института, которая расположена у Южного берега Крыма, в районе п. Кацивели. Глубина в том месте, где установлена платформа, порядка 30 м, что соответствует условию "глубокой воды" для ветровых волн на Черном море. Минимальное расстояние от платформы до берега – 650 м.

Несущая конструкция океанографической платформы состоит из 8 опор, 4 из которых образуют квадрат со стороной 18 м, 4 других расположены по периметру этого квадрата в центре каждой из сторон. Диаметр каждой из опор равен 55 см. На опорах на высоте 12 м над уровнем моря крепится палуба, на которой находится одноэтажная надстройка с жилыми и служебными помещениями. Крыша надстройки служит основанием мачты, на которой монтируются метеорологические датчики (на высоте 18 м).

Как и любой другой физический объект, платформа вносит возмущения в гидрофизические поля погранслоев моря и атмосферы. К таким возмущениям относятся: аэродинамическая тень, генерация паразитных волн опорами, генерация при сильном течении вихрей в "следе" платформы и т. д. Однако в силу особенностей конструкции платформы (небольшой диаметр опор, "прозрачность" 12-метровой зоны между морской поверхностью и палубой) эти возмущения значительно более слабые, чем в случае измерений с борта медленно движущегося или стоящего на якорю судна.

При измерениях характеристик морской поверхности контролировались следующие параметры воздушного потока: температура, скорость и направление ветра. Датчики были установлены на высоте 18 м.

Скорость ветра менялась от нуля до 14 м/с. Измерения проводились как при ветре со стороны открытого моря, так и со стороны берега, что соответствует длинному и короткому разгону волн. Стратификация вода-воздух была близка к нейтральной.

Измерения проводились сеансами продолжительностью 30 с, с дискретностью измерений 0.02 с. Анализируемый в настоящей работе массив данных включает результаты 276 сеансов измерений.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Первой значительной публикацией по исследованию уклонов морской поверхности явилась работа Кокса и Манка [8], в которой статистика уклонов оценивалась по фотографиям солнечных бликов. Несмотря на прошедшие полвека с момента ее публикации, приведенные в ней регрессионные уравнения, связывающие статистические моменты уклонов со скоростью ветра, по-прежнему широко используются в приложениях, связанных с рассеянием электромагнитных волн морской поверхностью, а также для тестирования волновых моделей [9].

Предварительные результаты наших натурных исследований, проведенных с помощью двумерного лазерного уклономера, были опубликованы в работе [10]. Анализируемый массив включал 50 серий измерений лазерным уклономером при скоростях ветра 0.8–11 м/с.

Введем обозначение: ξ – возвышение морской поверхности; $\xi_u = d\xi/dx$ и $\xi_v = d\xi/dy$ – компоненты уклонов в продольном и поперечном относительно ветра направлениях, $\xi_m = \sqrt{\xi_u^2 + \xi_v^2}$ – модуль уклона (или полный уклон).

На рис. 1, а представлена зависимость асимметрии продольной компоненты уклонов A_u от скорости ветра W . Видно, что с ростом скорости ветра отклонение от нормального закона распределения в среднем возрастает. Регрессионное уравнение имеет вид

$$A_u = 0.04 - 0.019W \pm 0.16. \quad (1)$$

Коэффициент корреляции между A_u и W равен -0.34 с 95% доверительным интервалом, равным 0.11. Качественно поведение параметра A_u согласуются с результатами Кокса и Манка [8]:

$$A_u = 0.04 - 0.032W \pm 0.12. \quad (2)$$

Однако в нашем случае коэффициент при W в уравнении (1) оказался несколько ниже, чем в регрессии (2).

Согласно [8], эксцесс продольной компоненты уклонов не зависит от скорости ветра и имеет

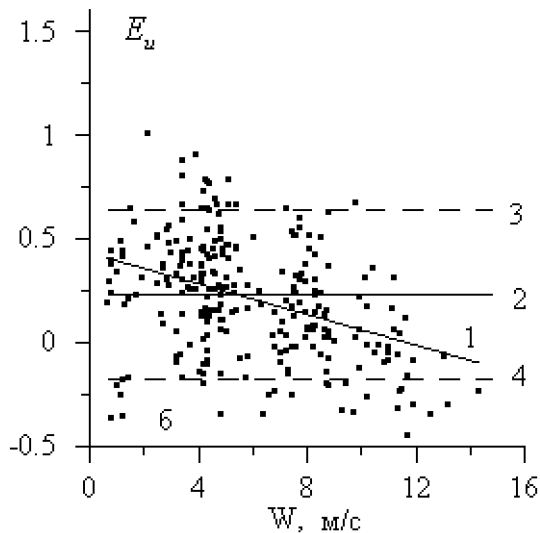
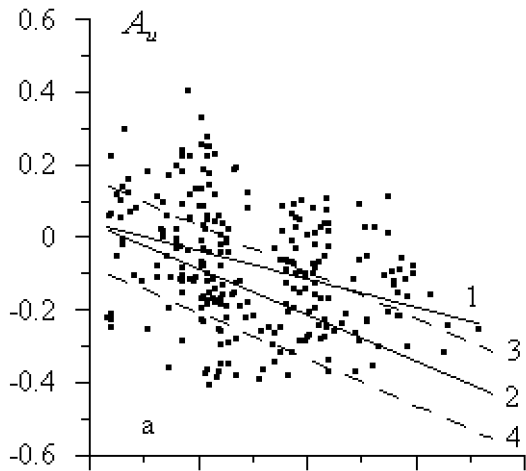


Рис. 1. Статистические моменты продольной компоненты уклонов: а) асимметрия A_u : точки – экспериментальные оценки, кривые 1 и 2 соответствуют регрессиям (1) и (2); б) эксцесс E_u : точки – экспериментальные оценки, кривая 1 – регрессия (3), кривые 2, 3, 4 – среднее значение и среднеквадратические отклонения согласно [8]

среднее значение, равное 0.23 при среднеквадратическом отклонении ± 0.40 . Полученные нами оценки в основном лежат внутри области 0.23 ± 0.40 , однако наблюдается слабая зависимость от скорости ветра (рис. 1, б). Коэффициент корреляции составляет -0.38 с 95% доверительным интервалом, равным 0.1. Связь параметра E_u со скоростью ветра описывается линейной регрессией:

$$E_u = 0.43 - 0.037W \pm 0.26. \quad (3)$$

Значения асимметрии и эксцесса поперечной

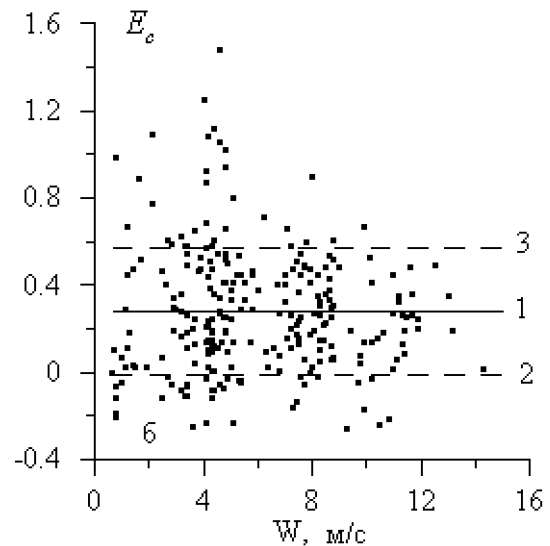
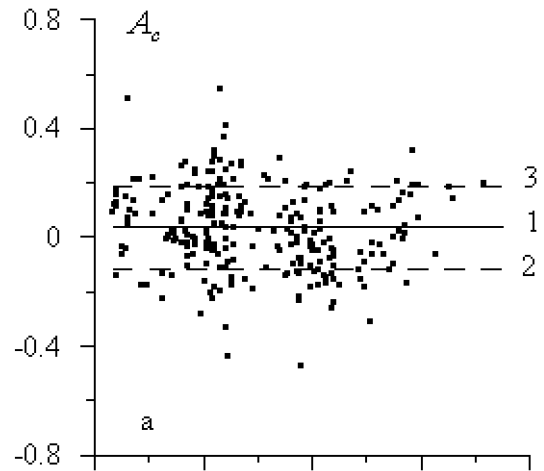


Рис. 2. Статистические моменты поперечной компоненты уклонов: а) – асимметрия A_c : точки – экспериментальные оценки, кривая 1 – среднее значение, кривые 2, 3 – среднеквадратические отклонения; б) – эксцесс E_c : точки – экспериментальные оценки, кривая 1 – среднее значение, кривые 2, 3 – среднеквадратические отклонения

компоненты уклонов не зависят от скорости ветра (рис. 2). Для них, как и для оценок A_u и E_u , характерен значительный разброс: $A_c = 0.036 \pm 0.15$; $E_c = 0.28 \pm 0.29$.

Рассмотрим статистические характеристики модуля уклонов морской поверхности. Выше было показано, что характеристики поперечной компоненты уклонов A_c и E_c не зависят от скорости ветра, а характеристики продольной компоненты уклонов A_u и E_u зависят слабо. В то же время,

из рис. 3 видно, что имеют место хорошо выраженные зависимости асимметрии A_m и эксцесса E_m модуля уклонов от W , которые описываются уравнениями линейной регрессии:

$$A_m = 0.97 - 0.024W \pm 0.12, \quad (4)$$

$$E_m = 1.22 - 0.087W \pm 0.41. \quad (5)$$

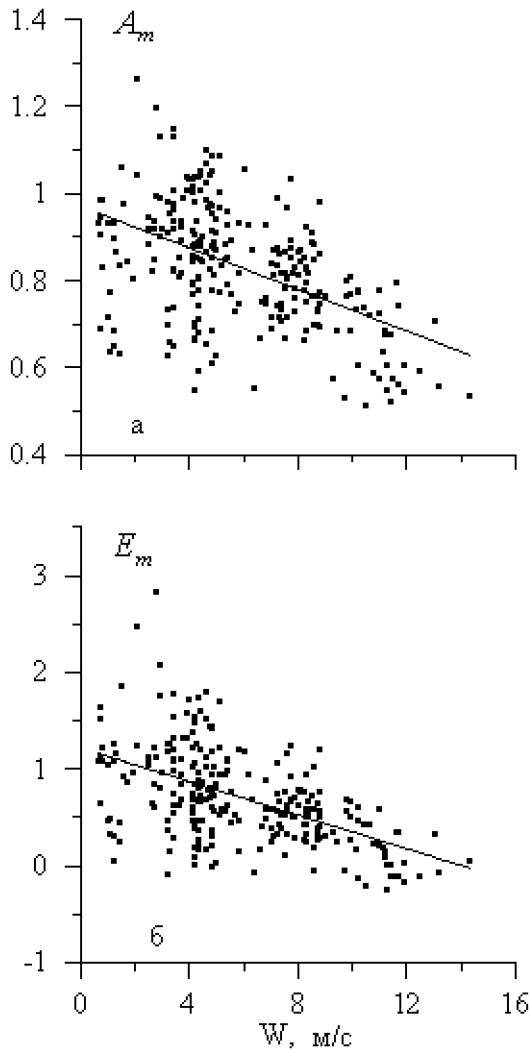


Рис. 3. Статистические моменты модуля уклонов: а) – асимметрия A_m : точки – экспериментальные оценки, сплошная линия – регрессия (4); б) – эксцесс E_m : точки – экспериментальные оценки, сплошная линия – регрессия (5)

Коэффициенты корреляции асимметрии A_m и эксцесса E_m со скоростью ветра соответственно равны -0.50 и -0.52 (95% доверительные интервалы составляют 0.092 и 0.089).

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАМА-ШАРЛЬЕ

Для аппроксимации плотности вероятностей квазигауссовых распределений, подобных тому, какое имеют компоненты уклонов морской поверхности, обычно используются ряды Грама-Шарлье, представляющие собой обобщенное Фурье-разложение искомой функции по полиномам Чебышева-Эрмита на интервале $[-\infty, \infty]$ с весом $\exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right)$. Достоинством этого подхода является явная связь между моментами искомого распределения и коэффициентами ряда.

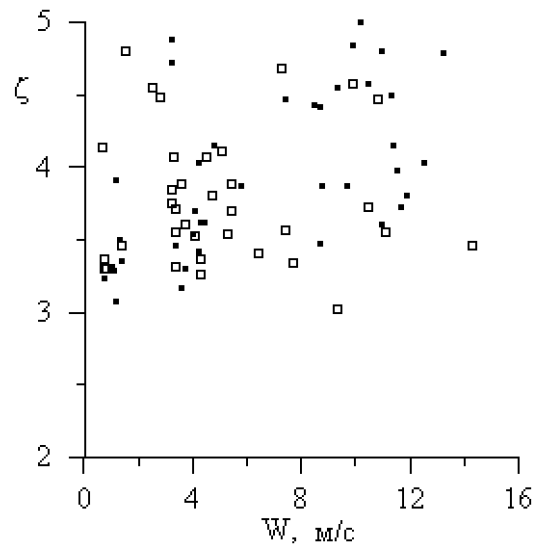


Рис. 4. Границы ξ появления отрицательных значений в аппроксимации (6): точки – продольная компонента уклонов, квадратики – поперечная

При измерениях в полевых условиях определение старших статистических моментов сопряжено с большими ошибками. Поскольку коэффициенты ряда Грама-Шарлье рассчитываются по статистическим моментам, то при моделировании распределений уклонов морской поверхности используется не сам ряд Грама-Шарлье, а аппроксимации, учитывающие только его первые члены. Как правило, в экспериментах определяются статистические моменты до четвертого порядка включительно, поэтому модели распределений имеют вид [11]

$$P_{G-C}(\xi_u^n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi_u^n)^2}{2}\right] \times \left\{ 1 + \frac{1}{6}A_u H_3(\xi_u^n) + \frac{1}{24}E_u H_4(\xi_u^n) \right\}, \quad (6)$$

$$P_{G-C}(\xi_c^n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi_c^n)^2}{2}\right] \times$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{1}{6} A_c H_3(\xi_c^n) + \frac{1}{24} E_c H_4(\xi_c^n) \right\}, \quad (7)$$

где $\xi_u^n = \xi_u / \sigma_u$; $\xi_c^n = \xi_c / \sigma_c$; H_3 и H_4 – полиномы Чебышева-Эрмита третьего и четвертого порядка соответственно.

Как известно [12], замена ряда Грама-Шарлье аппроксимациями типа (6) в некоторых случаях может приводить к появлению отрицательных значений плотности вероятностей. В частности, если использовать регрессии, связывающие со скоростью ветра статистические моменты продольной компоненты уклонов, приведенные в работе [8], то отрицательные значения появляются при $W > 10.4$ м/с. Граница зоны отрицательных значений $P_{G-C}(\xi_u^n)$ с ростом W смещается в область меньших величин ξ_u^n , при $W > 14.6$ м/с отрицательные значения имеют место для $\xi_u^n < 3$ [11].

Границей зоны отрицательных значений (обозначим ее ζ) является наименьший по модулю корень уравнения $P_{G-C}(\xi_u^n) = 0$ или $P_{G-C}(\xi_c^n) = 0$. Существенный разброс и отсутствие корреляции между значениями статистических моментов компонент уклонов вызвали необходимость определения значений ζ не по осредненным, а по фактическим значениям асимметрии и эксцесса. Результаты этого анализа отображены на рис. 4. Использовался тот же массив данных, по которому выше анализировалась связь статистических моментов уклонов со скоростью ветра.

Расчеты по данным 276 сеансов измерений показали, что в 25 случаях для продольной компоненты уклонов и в 30 случаях для поперечной значения ζ оказались ниже 4. Появление значений $\zeta < 4$ наблюдается как при высоких, так и при низких скоростях ветра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована связь третьего и четвертого статистических моментов компонент и модуля уклонов морской поверхности со скоростью ветра. В отличие от ранее существовавших представлений [8] выявлена слабая зависимость эксцесса продольной компоненты уклонов от скорости ветра W , которая может быть аппроксимирована линейной регрессией (3). Коэффициент корреляции между параметрами E_u и W равен -0.38 (95% доверительный интервал равен 0.1).

Построены регрессионные зависимости асимметрии A_m и эксцесса E_m модуля уклонов от ско-

рости ветра. Коэффициенты корреляции между параметрами A_m и W , а также E_m и W соответственно равны -0.50 и -0.52.

Проанализирована возможность аппроксимации плотности вероятностей распределений компонент уклонов моделями, построенными на основе рядов Грама-Шарлье, в которых используются статистические моменты не старше четвертого порядка. Показано, что около 10% подобных аппроксимаций имеют отрицательные значения при значениях компонент уклонов, не превышающих 4σ .

1. Караев В. Ю., Баландина Г. Н. Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование океана // Исследование земли из космоса.– 2000.– N 5.– С. 45–56.
2. Apel J. R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter // J. Geophys. Res.– 1994.– vol. 99, N C8.– P. 16269–16291.
3. Стрижкин И. И. Исследование высокочастотного ветрового морского волнения // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана.– 1988.– Т. 24, N 10.– С. 1089–1099.
4. Bock E. J., Hara E. Optical measurements of capillary-gravity wave spectra using a scanning laser slope gauge // J. Atmos. Oceanic Technol.– 1995.– N 12.– P. 395–403.
5. Hara E., Bock E. J., Luzenga D. In situ measurements of capillary-gravity wave spectra using a scanning laser slope gauge and microwave radars // J. Geophys. Res.– 1994.– vol. 99.– P. 12593–12602.
6. Hwang P. A., Atakturk S., Sletten M. A., Trizna D. B. A study of the wavenumber spectra of short water waves in the ocean // J. Phys. Oceanogr.– 1996.– vol. 26.– P. 1266–1285.
7. Hara E., Bock E. J., Edson J. B., McGillis W. R. Observation of short wind waves in coastal waters // J. Phys. Oceanogr.– 1998.– vol. 28.– P. 1425–1438.
8. Cox C., Munk W. Measurements of roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical Soc. America.– 1954.– V. 44, N 11.– P. 838–850.
9. Banner M. L., Young I. R. Modeling spectral dissipation in the evolution of wind waves. Part 1: Assessment of existing model performance // J. Phys. Oceanogr.– 1994.– vol. 24.– P. 1550–1571.
10. Христофоров Г. Н., Запезалов А. С., Бабий М. В. Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология.– 1992.– Т. 32, вып. 3.– С. 452–459.
11. Запезалов А. С., Ратнер Ю. Б. Аналитическая модель плотностей вероятностей уклонов морской поверхности // Морской гидрофизический журнал.– 2003.– N 1.– С. 3–17.
12. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Теория распределений.– М.: Наука, 1966.– 587 с.