

## **Исследование статистических характеристик распределения уклонов взволнованной водной поверхности**

Д.С. Сазонов

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Профсоюзная 84/32

E-mail: [sazonov\\_33m7@mail.ru](mailto:sazonov_33m7@mail.ru)

*В работе представлены результаты натурных волнографических исследований распределения уклонов взволнованной водной поверхности, выполненных в 2007г. в рамках международного эксперимента "CAPMOS" (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring). Основной целью проведения волнографических измерений является верификации данных радиометрических измерений. В работе представлены результаты восстановления мгновенных значений уклонов площадок водной поверхности, а также результаты аппроксимации восстановленного распределения уклонов статистическими функциями распределения.*

*The on-site wavegraph researches' results of the disturbed water surface distribution, fulfilled in 2007 according to the program of the international experiment "CAPMOS" (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring) are presented. The main goal of the wavegraph measurements' is to verify data obtained from the remote radio polarimetric measurements. This paper deals with the instant slopes values of disturbed water surface platforms retrieved results' and with the approximation results' of the retrieved slopes distribution by statistic distribution functions.*

За последние 60 – 70 лет было проведено множество экспериментальных исследований по определению характеристик взаимодействия океана и атмосферы. Актуальность таких исследований определяется тем, что именно поверхностный слой океана наиболее интенсивно взаимодействуют с атмосферой и, в конечном счете, контролируют ее структуру и эволюцию.

Использование новых средств и методов наблюдений а, именно дистанционное зондирование океана с борта космических аппаратов, самолетов, беспилотных устройств является наиболее перспективным из-за его возможности охватывать наблюдениями большие площади морской поверхности. Однако на этапе разработки новых методов невозможно обойтись без проведения экспериментальных исследований.

Настоящая работа посвящена обработке данных натурных волнографических измерений для верификации данных радиометрических измерений, полученных в рамках международного натурального эксперимента «CAPMOS'07».

К основным задачам работы относятся:

- восстановление распределения уклонов взволнованной морской поверхности по данным струнного волнографа;
- подбор стандартных функций описывающих распределение уклонов взволнованной морской поверхности.

Для определения параметров волнения использовалась решетка 5-ти струнного волнографа разработанного в ИКИ РАН. Не рассматривая схемотехническое решение данного устройства, следует сказать, что определение высоты волнения в каждой из 5-и точек входа струн в воду, определяется через изменение сопротивления надводной части струны. Измерения осуществлялись с частотой 10 Гц, в 5-и разнесенных в пространстве точках. При этом 5 струн располагались так, что каждая тройка струн (струны 2, 3, 4 и 1, 3, 5) образует равнобедренный прямоугольный треугольник.

Расстояние между струнами 1 и 3, 3 и 5 равно 150 мм, а между струнами 2 и 3, 3 и 4 – 50 мм. Геометрия расположения струн проведена на Рис.1.

Подобная схема расположения струн позволяет определять мгновенные значения уклонов площадок, образованных векторами  $s_3s_2$  и  $s_3s_4$ , а также площадок большего размера, образованных векторами  $s_3s_1$  и  $s_3s_5$ . При этом, длина поверхностных волн, для которой могут быть рассчитаны значения уклонов, меняется в зависимости от взаимной ориентации волнографа и направления распространения волн. Так, при рассмотрении площадки  $s_3s_2s_4$ , это значение лежит в пределах от 7 до 10 см, а для площадки типа  $s_3s_1s_5$  – от 20 до 30 см.

Порядок определения мгновенных значений уклонов выделенных площадок выглядит следующим образом (Рис.2):

1. Определение координат точек  $s_i$  путем совмещения начала координат с  $s_3$ . Эта операция эквивалентна определению координат векторов  $\overrightarrow{s_3s_i}$ .

2. Расчет координат векторов нормали к выделенным площадкам  $\vec{n}_i$ , путем векторного перемножения образующих эту площадку векторов. Например:  $\vec{n}_1 = \overrightarrow{s_3s_1} \times \overrightarrow{s_3s_5}$ .

3. Знание координат векторов нормали  $\vec{n}_i$ , однозначно определяет такие величины как: уклон площадки относительно вертикальной оси и знак этого уклона при выборе соответствующей плоскости. Абсолютное значение уклона при этом вычисляется по формуле:

$$\eta = \operatorname{tg}(\alpha) = \left| \overline{n_{xy}} \right| / n_z,$$

где  $\left| \overline{n_{xy}} \right|$  – модуль проекции вектора на плоскость  $XOY$  и  $n_z$  – проекция вектора на ось  $OZ$ .

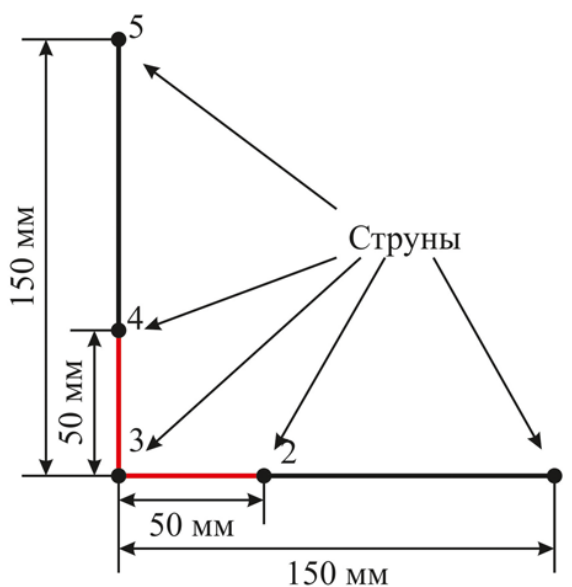


Рис.1. Геометрия решетки струнного волнографа.

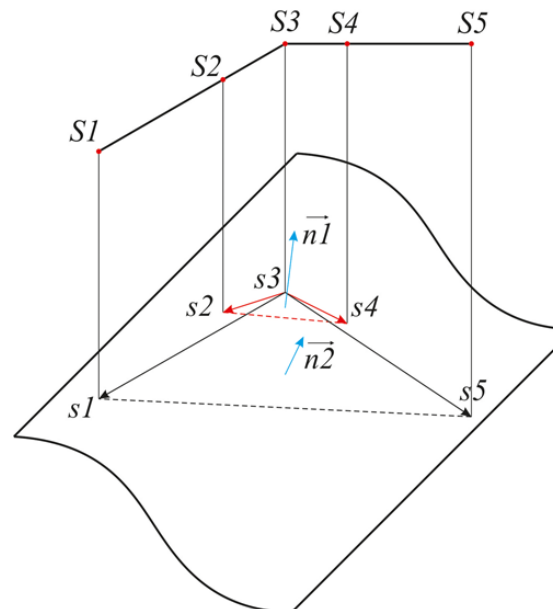


Рис.2. Определения мгновенных значений уклонов площадок.

На основе рассчитанных координат и ненаправленного значения уклона вектора нормали  $\vec{n}$ , можно вычислить значение уклона в любом направлении. Приняв направление  $OX$  за нулевое, значение уклона в данном направлении вычисляется по формуле:

$$\operatorname{tg}(\beta_0) = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\gamma).$$

Если направление произвольное со смещением  $\varphi$  относительно нулевого направления, тогда:

$$\operatorname{tg}(\beta) = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \cos(\theta),$$

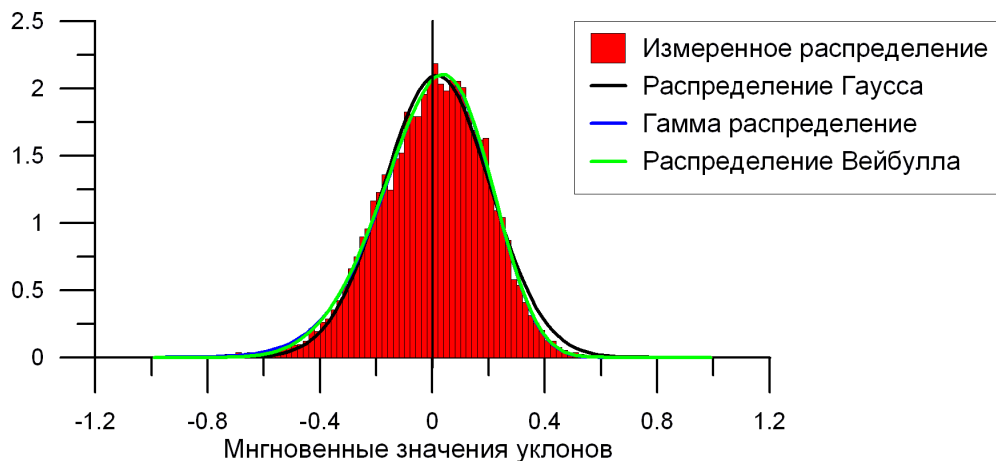
где  $\theta = \gamma - \varphi$  есть поправки на направление.

Рассчитав значения уклонов в некотором выбранном направлении можно вычислить статистические характеристики (дисперсию  $\sigma^2$  и математическое ожидание  $\mu$ ) полученного распределения, и построить гистограмму (Рис.3).

Известно, что волны на поверхности моря почти всегда случайны в том смысле, что детальная конфигурация поверхности изменяется нерегулярным образом в пространстве и времени. Наблюдая волны можно сказать, что существует различие в крутизне переднего (подветренного) и заднего (наветренного) склона волны. Результаты, полученные Коксом и Манком [2, 3] свидетельствуют, что наклон поверхности максимальной вероятности не равен нулю, а составляет несколько градусов, причем в направлении ветра он положителен [1], и для коротковолновых компонент имеет более значительную асимметрию.

Для того чтобы учесть описанный выше эффект, экспериментально полученные гистограммы распределения уклонов взволнованной поверхности были аппроксимированы известными статистическими законами распределения вероятности. Кроме распространенного нормального закона распределения вероятности были выбраны: гамма, логистическое, логнормальное распределение и распределения Релея, Стьюдента, Вейбулла.

Проведя аппроксимацию имеющихся данных по методу наименьших квадратов (МНК) было установлено, что лучший результат показали следующие функции: распределение Гаусса, гамма распределение и распределение Вейбулла (Рис.3).

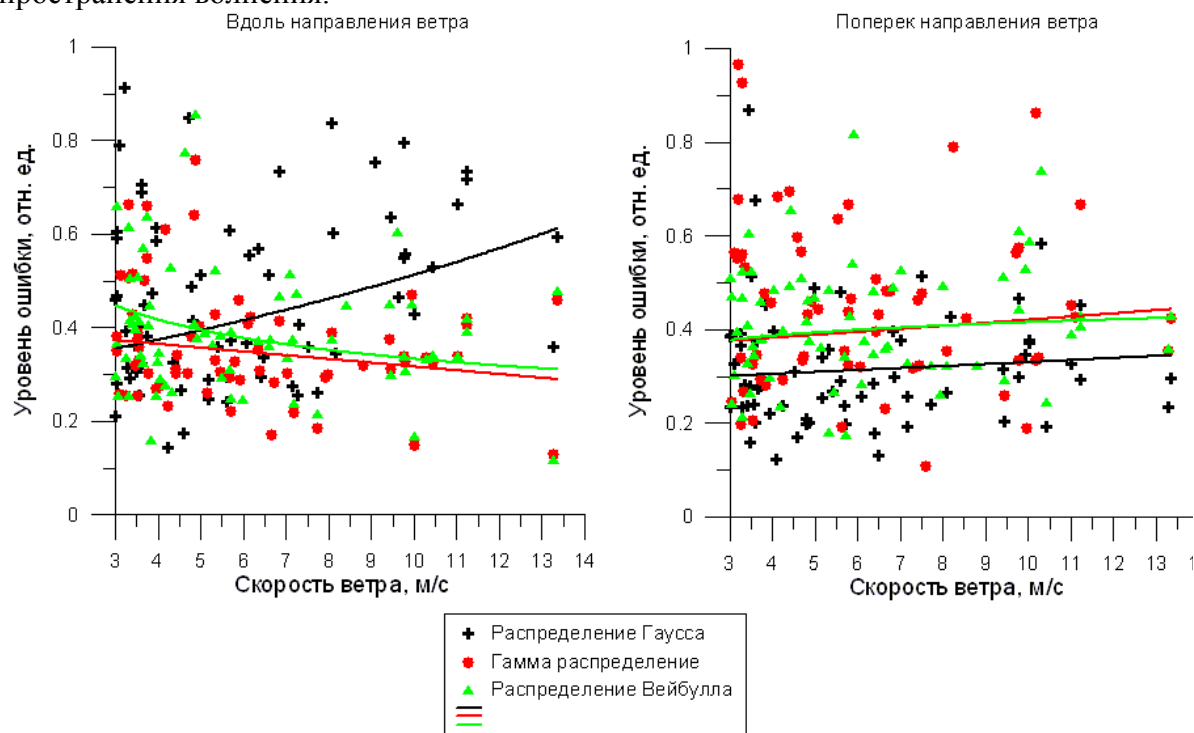


**Рис.3. Гистограмма распределения уклонов волн с длиной от 7 до 10 см, вдоль направления распространения волнения и подобранные аппроксимирующие ее функции.**

На рис.4. представлены ошибки аппроксимации распределения уклонов различными функциями распределения. Для поверхностных волн с длиной от 7 до 10 см распределение уклонов вдоль генерального направления распространения волнения оказывается смещенным относительно нуля, и с увеличением скорости ветра величина смещения возрастает. Вследствие чего, ошибка аппроксимации распределением Гаусса возрастает с увеличением скорости ветра. При аппроксимации несимметричными

функциями распределения (Гамма функцией и функцией Вейбулла) наблюдается обратный эффект: ошибка аппроксимации уменьшается при увеличении скорости ветра.

Рассматривая распределения уклонов поперек генерального направления распространения волнения, следует отметить, что, как и было показано в работах [1, 2, 3] распределение уклонов имеет вид функции Гаусса. Небольшой тренд ошибки на Рис.4 может быть вызван погрешностью в определении генерального направления распространения волнения.



**Рис.4. Сравнение ошибок аппроксимации распределения уклонов различными функциями распределения.**

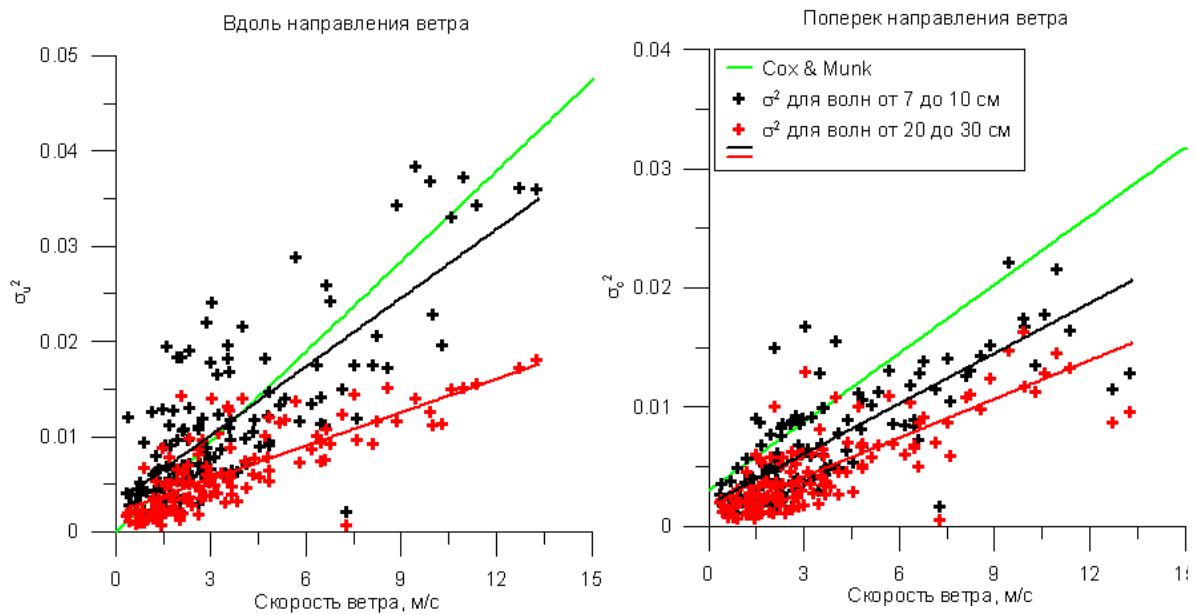
Основным критерием оценки достоверности полученных результатов, является их сравнение с результатами полученными Коксом и Манком в работе [2, 3]. Результат сравнения представлен на Рис.5. Измеренные зависимости дисперсии уклонов для волн от 7 до 10 см и от 20 до 30 см возрастают медленнее, чем зависимости полученные Коксом и Манком. Это связано с тем, что измеренные значения дисперсии уклонов находятся в длинноволновой области поверхностных волн, а измерения Кокса и Манка соответствуют коротковолновой области поверхностных волн (капиллярные волны).

Как видно из Рис.5, полученные результаты хорошо сходятся с измерениями Кокса и Манка для дисперсии уклонов волн распространяющихся поперек направления ветра. Что касается дисперсии уклонов волн вдоль направления ветра, то при скоростях ветра менее 4 м/с наблюдается переоценка значений дисперсии уклонов для волн с длинами от 7 до 10 см. Данное расхождение можно объяснить тем, что измерения в работе [2, 3] проводились в оптическом диапазоне.

В рамках проведенных исследований были восстановлены значения уклонов для волн от 7 до 10 см и от 20 до 30 см. Обработка данных позволила получить вероятность распределения уклонов и статистические характеристики волнения в точке проведения измерений.

Как показали результаты работы, распределение уклонов волн с длиной от 7 до 10 см в направлении распространения волнения лучше всего описываются не функцией Гаусса, а Гамма распределением, при этом наблюдается ярко выраженная асимметрия

функции распределения относительно математического ожидания и его отличие от нуля. В направлении перпендикулярном направлению распространения волн распределение уклонов лучше описывается функцией Гаусса.



**Рис.5. Значения дисперсии уклонов вдоль и поперек направления ветра в зависимости от скорости ветра.**

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №09-02-00780-а, №11-05-00493-а и №11-05-90407-Укр\_ф\_а.*

#### **Литература:**

1. Филипс О. Динамика верхнего слоя океана // Л.: Гидрометеиздат, 1980. 319 с.
2. Cox C.S., Munk W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Bull. Scripps Inst. Oceanography. 1956. V. 6. P. 401–488.
3. Cox C.S., Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter // J. of Marine Research. 1954. V. 13. P. 198–227.