



Применение акустического волнографа для измерения
статистических параметров волнения: теория и эксперимент.

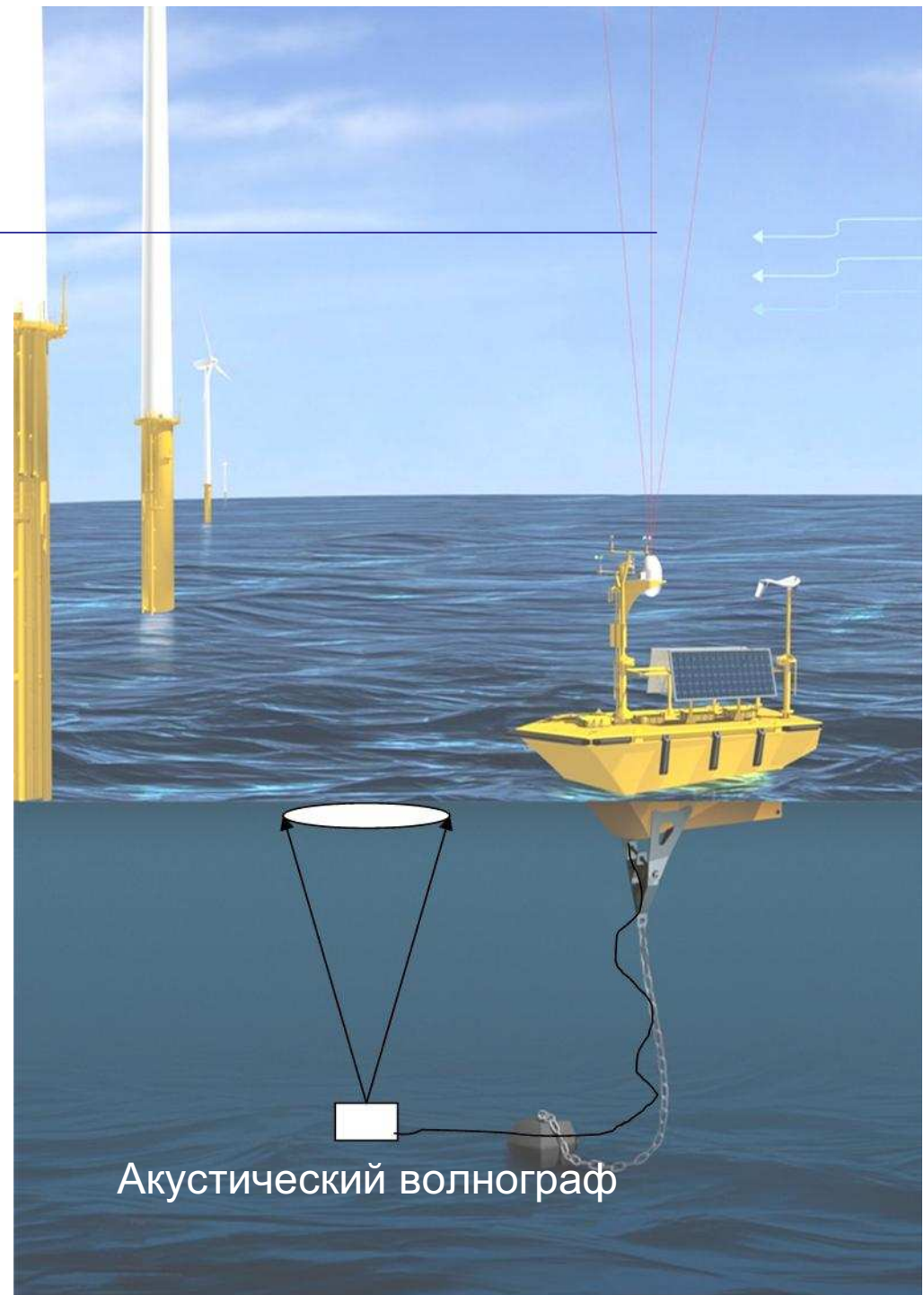
Титченко Ю. А., Караев В. Ю., Мешков Е. М., Титов В. И.

Введение

Развитие методов и аппаратуры для измерения статистических параметров волнения имеет важное значение для исследования процессов на водной поверхности.

К сожалению, существующие морские буи не способны обеспечить измерение статистических характеристик волнения с необходимой точностью.

Подводный акустический волнограф способен решить задачу измерения основных статистических характеристик волнения.



Обратное рассеяние акустических волн водной поверхностью

При малых углах падения механизм обратного рассеяния будет квазизеркальным, а поле отраженной волны рассчитывается в приближении метода Кирхгофа.

Алгоритмы восстановления статистических характеристик волнения основаны на зависимости доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния отраженного сигнала от них.

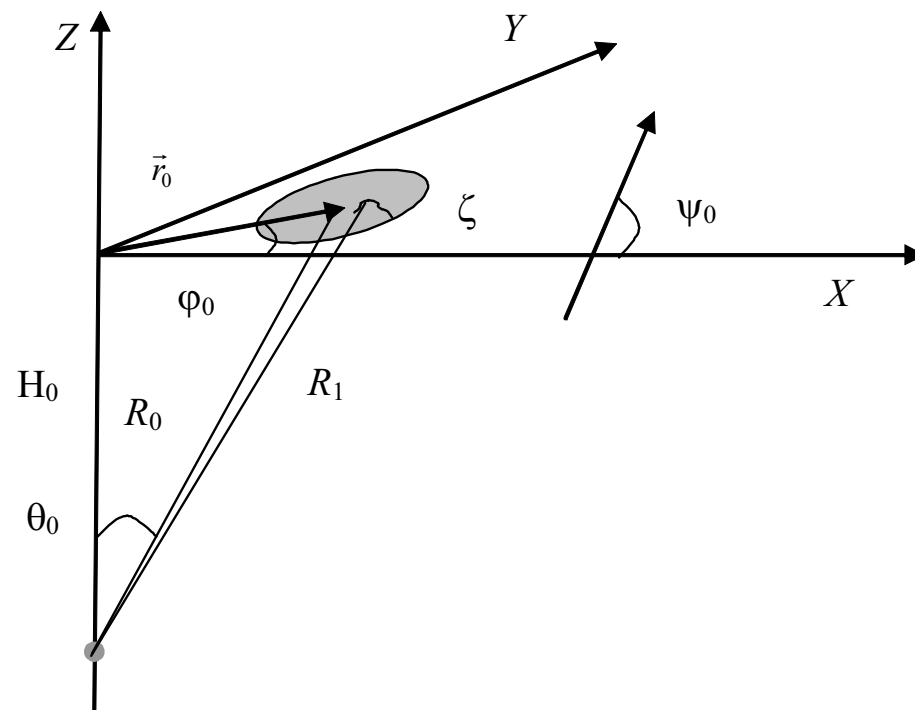


Схема измерений

Отраженный сигнал

Выражение для ширины доплеровского спектра на уровне –10 дБ от максимума при угле падения равном 0:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2\ln 10}}{\lambda} \left[\sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2 / 5,52} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2 / 5,52} \right]^{0,5}$$

Формула для сечения обратного рассеяния при угле падения равном 0:

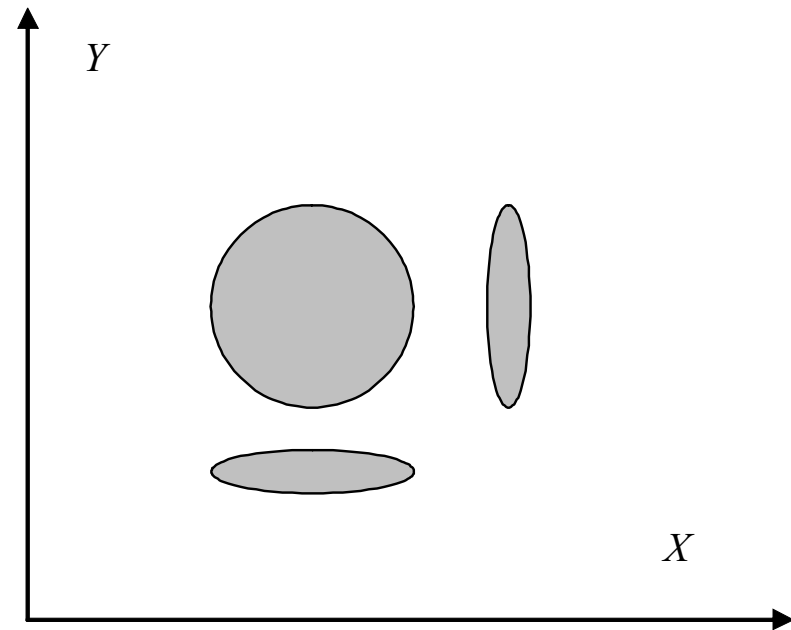
$$\sigma_0 = \frac{|V_{эфф}|^2}{2 \left[\sigma_{xx}^2 + \delta_y^2 / 5,52 \right]^{0,5} \left[\sigma_{yy}^2 + \delta_x^2 / 5,52 \right]^{0,5}}$$

- σ_{tt}^2 - дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости,
- $\sigma_{yy}^2, \sigma_{xx}^2$ - дисперсия наклонов вдоль и поперек направления движения волнения соответственно,
- K_{xt}, K_{yt} - ненормированные коэффициенты корреляции наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости,
- $V_{эфф}$ - эффективный коэффициент отражения.

Система измерений

Задавая конфигурацию акустической системы можно обеспечить измерение всех статистических параметров волнения второго порядка. Это может быть, например, система из трех антенн: одна с широкой ДНА и две с ножевыми ДНА ориентированными перпендикулярно друг другу

В результате измерений мы сможем получить полную систему уравнений из которой можно восстановить все основные статистические моменты волнения второго порядка. Преимуществом схемы измерений является отсутствие необходимости в абсолютной калибровке акустической системы.

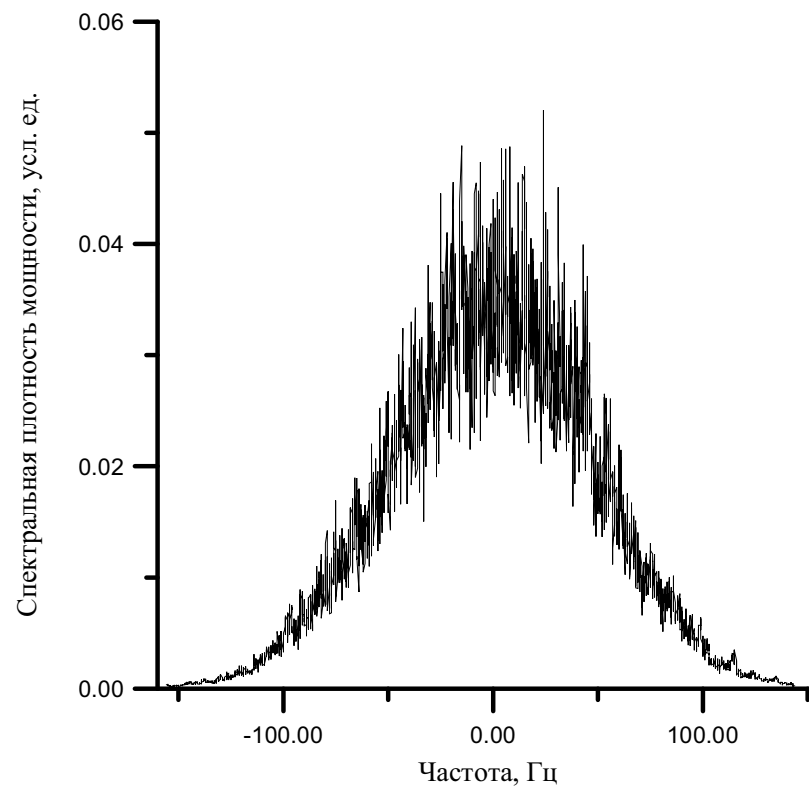


Предлагаемая схема размещения антенн

Исходные данные

В ходе эксперимента записывается отраженный акустический сигнал и по стандартной процедуре вычисляется доплеровский спектр отраженного сигнала.

Задача корректного определения ширины доплеровского спектра на уровне -10дБ от максимума не является тривиальной.



Вычисление спектра по формулам

Для отладки алгоритмов обработки использовались две схемы моделирования

По модели спектра волнения находим статистические характеристики водной поверхности (задаем скорость ветра и длину ветрового разгона):

$$\sigma_{yy}^2, \quad \sigma_{xx}^2, \quad \sigma_{tt}^2, \quad K_{xt}, \quad K_{yt}$$

Используем найденные значения в формулах для вычисления доплеровского спектра отраженного сигнала:

$$S(w) = A_0 \exp\left(-\frac{w^2}{4k^2 w_s}\right)$$

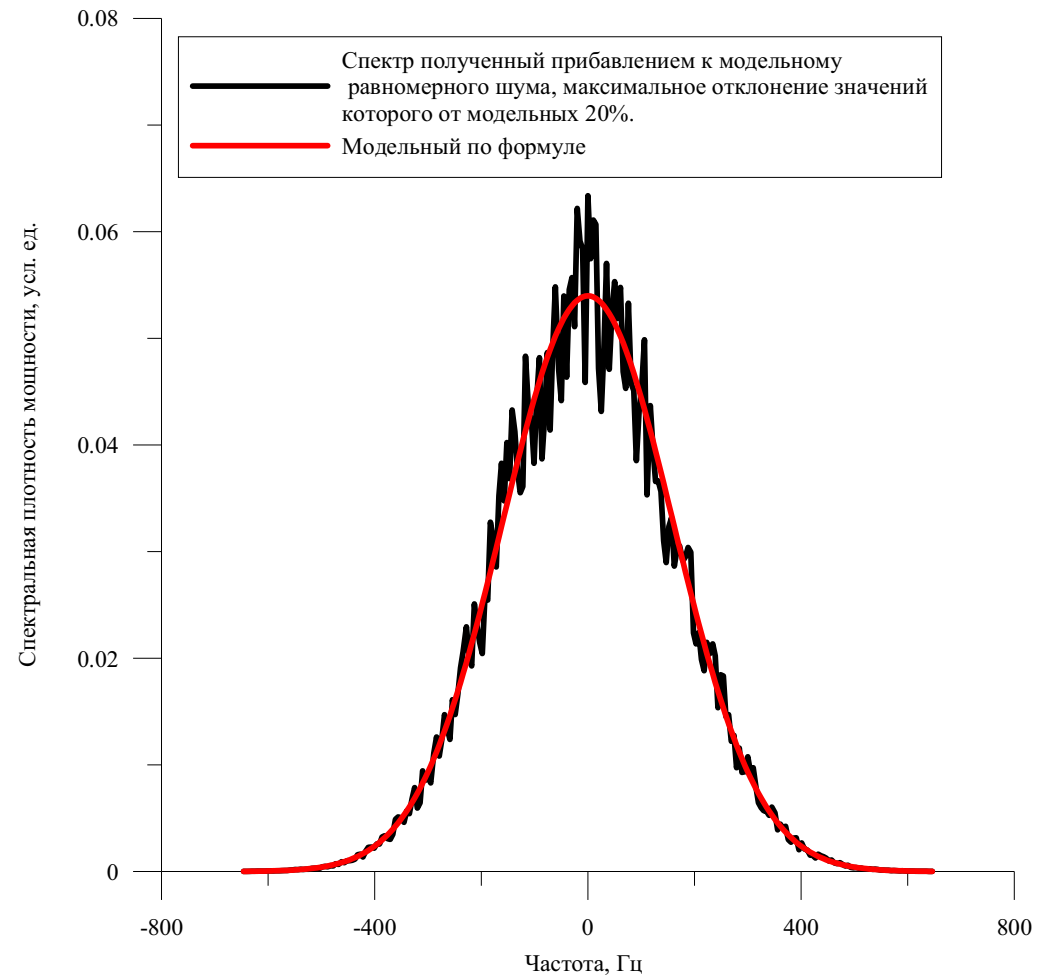
k - волновое число падающего излучения,
 A_0 - амплитуда спектра,
 w_s - коэффициент, зависящий от параметров волнения и ДНА.

Вычисление спектра по формулам

Преимущество такого подхода состоит в скорости моделирования.

Спектр получается гладким, поэтому на нем сложно отладить алгоритмы обработки реальных спектров

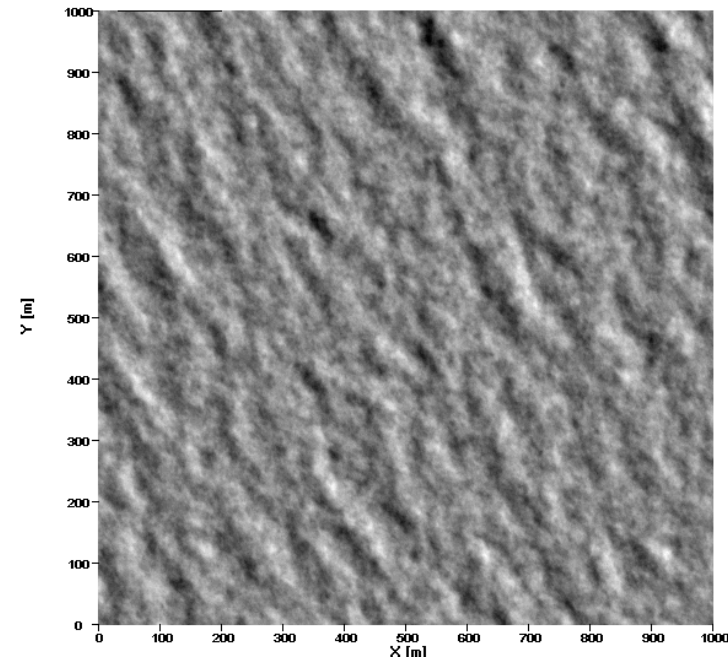
Вводя шумовую помеху, можно имитировать случайную погрешность измерения доплеровского спектра, но встает вопрос о выборе функции распределения шума и от ее вида много зависит. Равномерный шум слабо влияет на алгоритмы восстановления.



Численное моделирование

С помощью специально разработанного комплекса программ выполняется численное моделирование морской поверхности по спектру волнения и имитируется эксперимент.

По каждой реализации поверхности вычисляется доплеровский спектр отраженного сигнала, поэтому для получения достоверных результатов необходимо накопление реализаций отраженного сигнала и вычисление среднего доплеровского спектра, как это происходит в эксперименте.

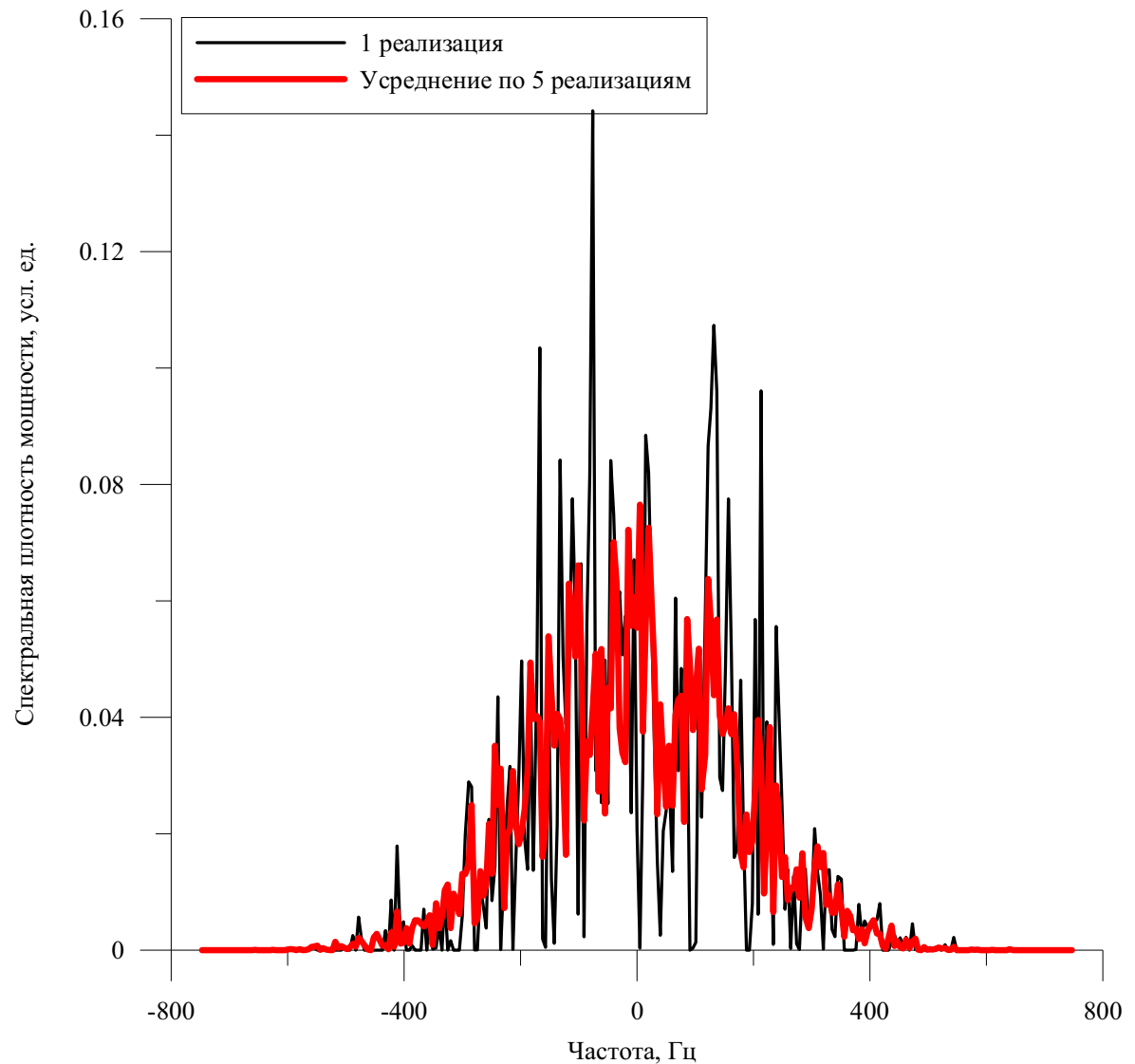


Полутоновое изображение высот морской поверхности для случая полностью развитого ветрового волнения, распространяющегося под углом 30 градусов относительно горизонтальной оси и скорости ветра 10 м/с.

Численное моделирование

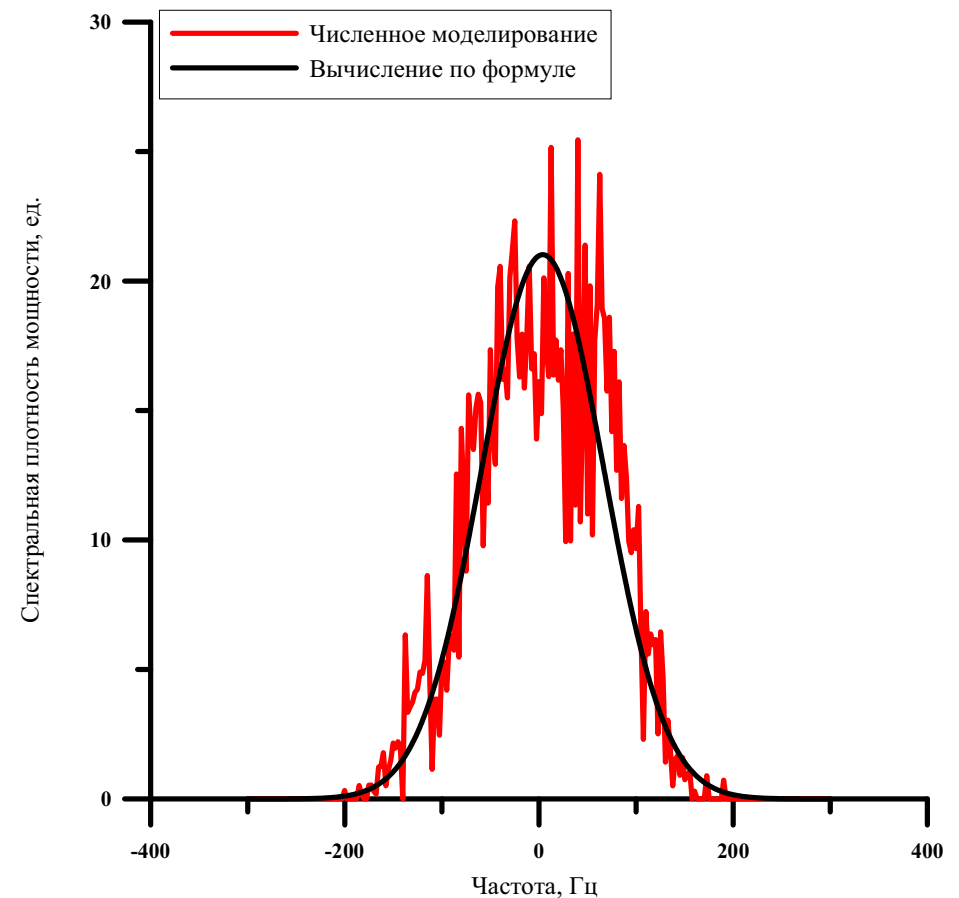
Объем вычислений при этом способе моделирования существенно возрастает, т.к. происходит численная имитация схемы эксперимента.

Но визуально наблюдается лучшее соответствие экспериментальным спектрам



Численное моделирование

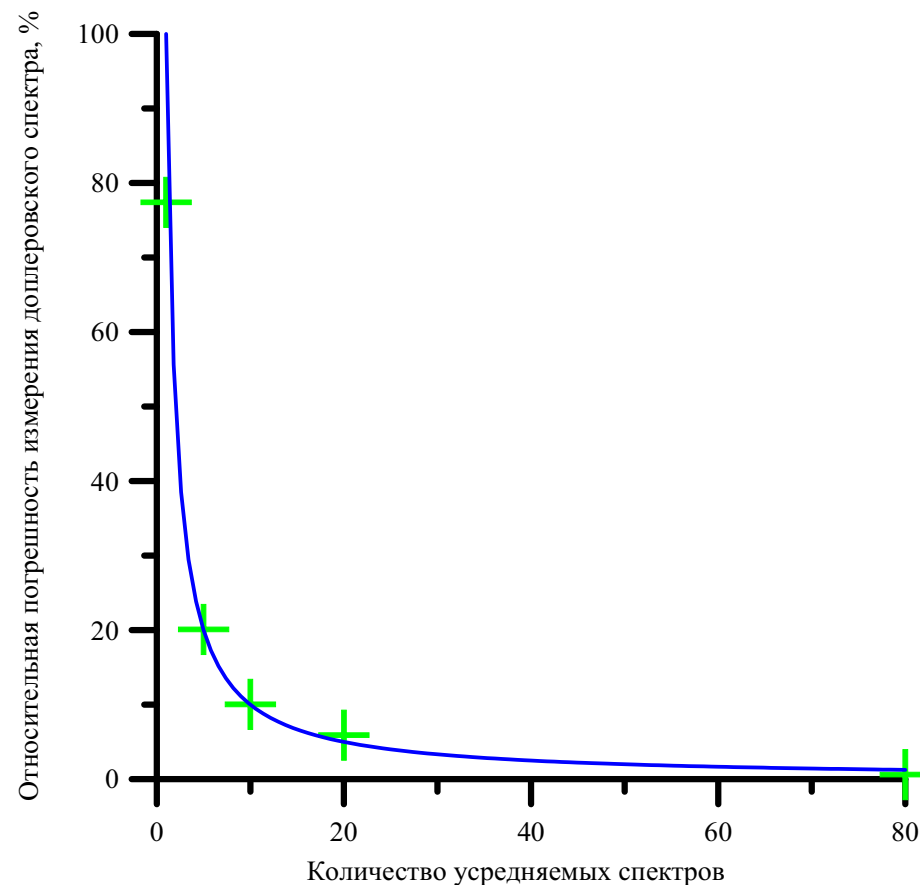
Моделирование проводилось для скорости ветра на высоте 10 м равной 5 м/с, безразмерной длины ветрового разгона 5000 и ДНА $30^\circ \times 30^\circ$. Усреднение результатов численного моделирования эксперимента выполнено по 10 реализациям доплеровского спектра отраженного сигнала.



Погрешность численного моделирования

Относительная погрешность численного моделирования доплеровского спектра (изменчивость спектра) в зависимости от числа усредняемых реализаций

Для уменьшения изрезанности доплеровского спектра необходимо проводить сглаживание различными методами



Сглаживание заданной гауссовой функцией

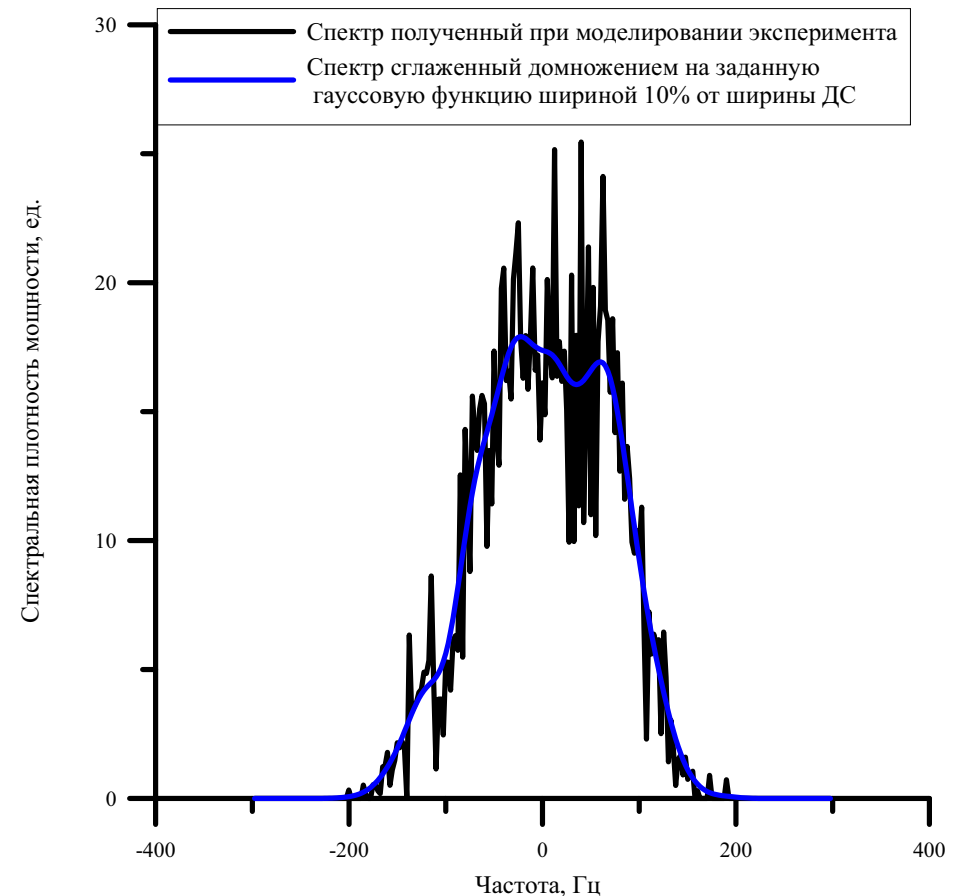
Используется гаусс, ширина которого заведомо меньше ширины зашумленного доплеровского спектра.

Выполняется свертка заданной гауссовой функции с доплеровским спектром.

Ширина гауссовой функции задавалась равной 10% от ширины доплеровского спектра, полученного при численном моделировании.

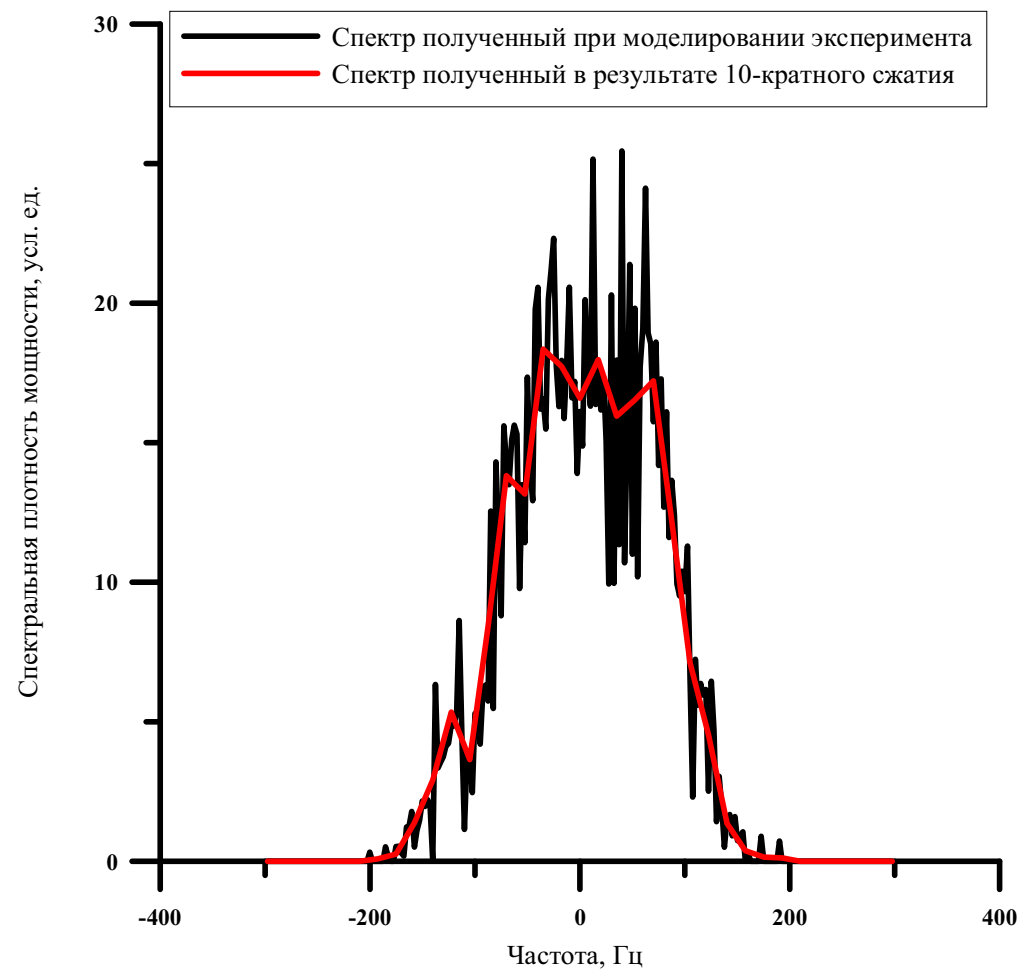
$$\Delta f_{10}(исх.) = \sqrt{\Delta f_{10}^2(св.) - \Delta f_{10}^2(гаус)}$$

$\Delta f_{10}(св.)$ - ширина заданной гауссовой функции, с которой производится свертка, на уровне -10 дБ от максимума,
 $\Delta f_{10}(исх.)$ - ширина полученной после свертки функции на уровне -10 дБ от максимума.



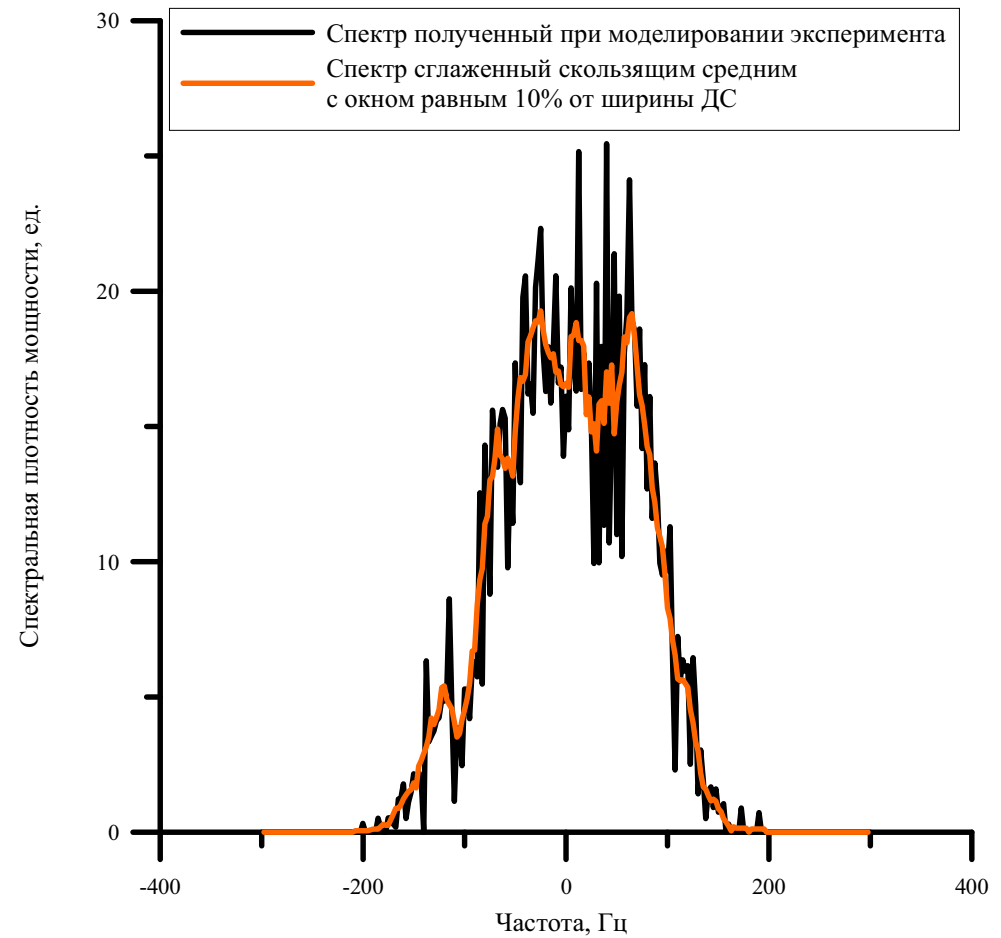
Сжатие данных с коэффициентом 10

Спектр полученный в результате 10- кратного сжатия.



Сглаживание скользящим средним с прямоугольным окном

Сглаживание скользящим средним с прямоугольным окном равным 10% от ширины доплеровского спектра.



Вычисление ширины доплеровского спектра на уровне -10 дБ

Из первого и второго
начальных моментов.

$$\Delta f_{10} = 2\sqrt{2\ln 10(M(w^2) - M^2(w))}$$

Из первого и четвертого
начальных моментов.

$$\Delta f_{10} = 2\sqrt{2\ln 10\sqrt{(12M^2(w))^2 - \frac{M^4(w) - M(w^4)}{3}}}$$

Вычисление ширины доплеровского спектра на уровне -10 дБ

Из тангенса наклона прямой, полученной линеаризацией доплеровского спектра.

Форма доплеровского спектра может быть представлена следующим образом:

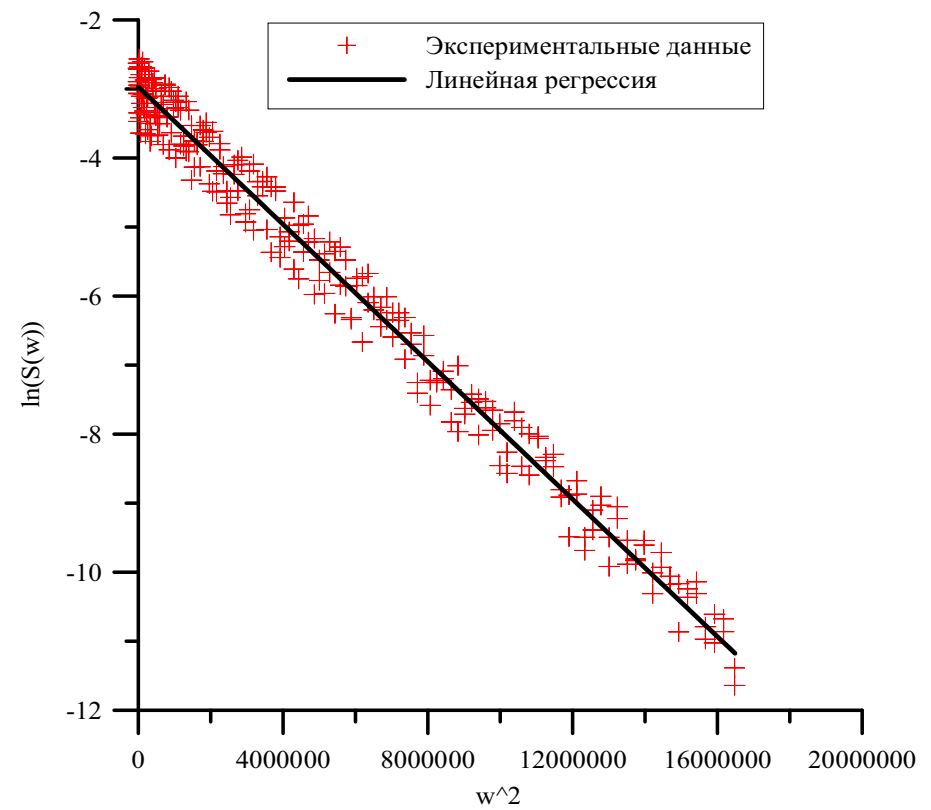
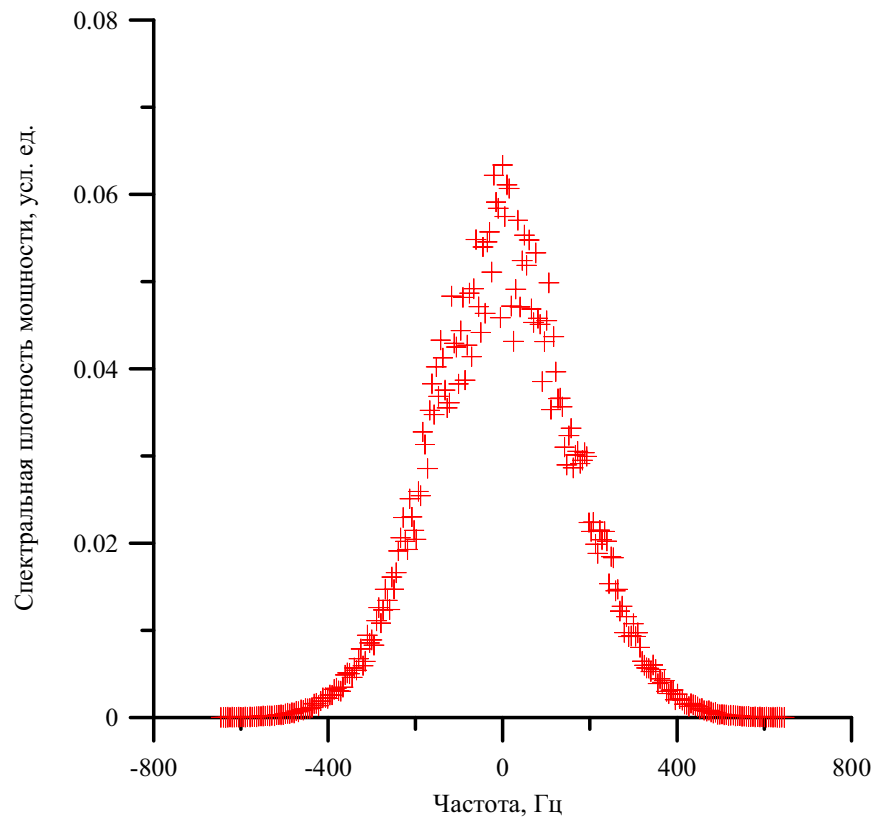
$$S(w) = A_0 \exp\left(-\frac{w^2}{4k^2 w_s}\right)$$

$$\ln(S(w)) = \ln(A_0) - \frac{w^2}{4k^2 w_s}$$

Проведя линейную регрессию найдем значение w_s

$$\Delta f_{10} = \frac{k \sqrt{w_s \ln 10}}{\pi}$$

Вычисление ширины доплеровского спектра на уровне -10 дБ



Сравнение алгоритмов определения ширины доплеровского спектра

Применяем три алгоритма вычисления ширины доплеровского спектра для среднего по 10 и 80 реализациям спектра и сглаженных тремя различными способами

10 реализаций	средний спектр, Гц	Сглаживание Гауссом, ширина 10%, Гц	Сжатие данных в 10 раз, Гц	Скользящее среднее, прямоугольное окно 10%, Гц	Модельная ширина ДС, Гц
1 и 2 моменты	284	288	284	285	270
1 и 4 моменты	269	274	270	270	
Линейная регрессия	280	278	280	251	

Невозможно предсказать, какой алгоритм окажется точнее. Эффективность рассмотренных подходов зависит от уровня шумов и количества усредняемых реализаций спектра.

80 реализаций	средний спектр, Гц	Сглаживание Гауссом, ширина 10%, Гц	Сжатие данных в 10 раз, Гц	Скользящее среднее, прямоугольное окно 10%, Гц	Модельная ширина ДС, Гц
1 и 2 моменты	267	268	267	269	264
1 и 4 моменты	262	264	263	264	
Линейная регрессия	252	252	252	236	

Действующий макет акустического волнографа

Доплеровского гидролокатора с длиной волны 8 мм и антенной с широкой диаграммой направленности $\delta_x^2 = \delta_y^2 = 30^\circ$

Гидролокатор (акустический излучатель и приемник) закреплен на плавучем диске.

К диску привязан груз, обеспечивающий погружение излучателя на дно.

Блок управления соединен с гидролокатором 20 метровым кабелем и находится на судне. Принятый сигнал передается на судно и через АЦП записывался на ноутбук.



Натурный эксперимент

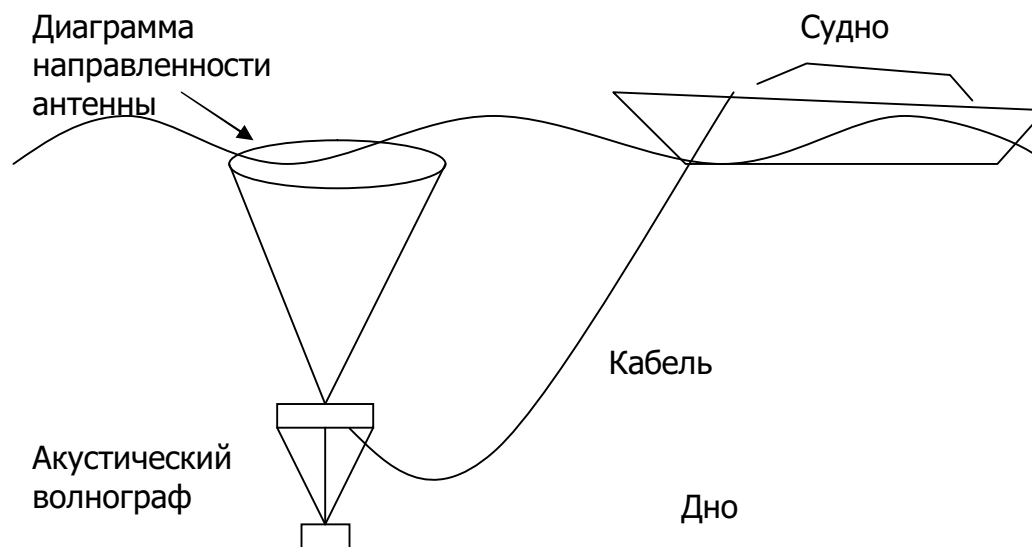
Эксперименты проводились во время экспедиций на Горьковское водохранилище в августе – сентябре 2011.

Испытания проводились с дебаркадеров на реке Волге и Оке в Нижнем Новгороде.



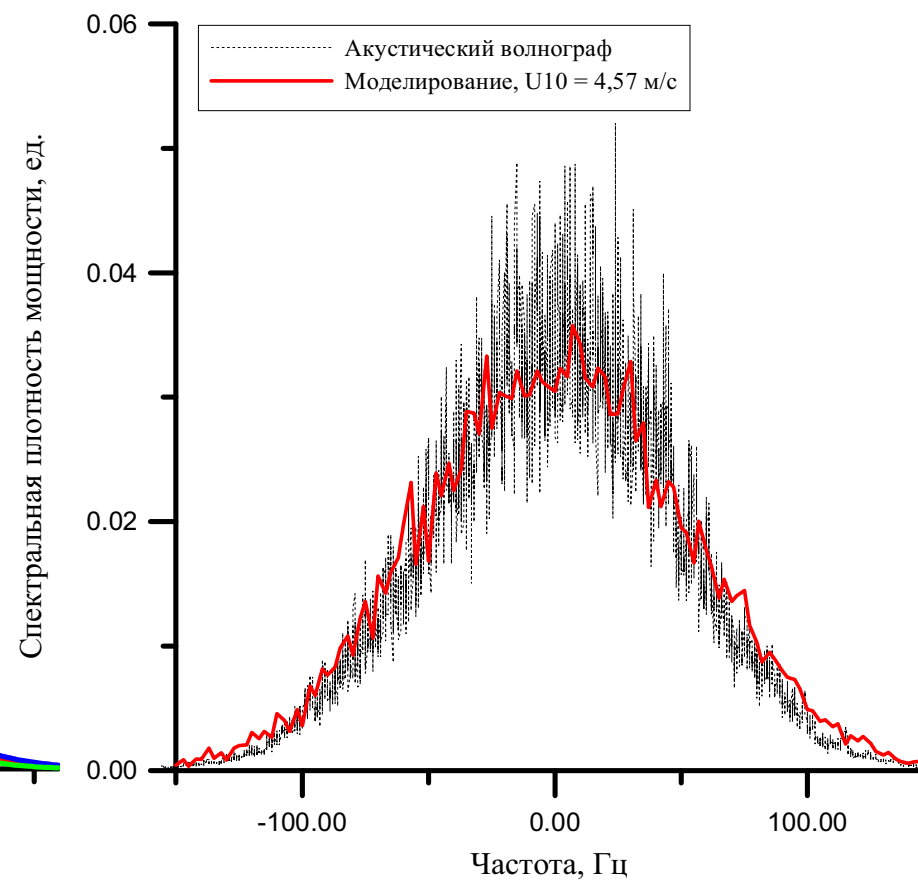
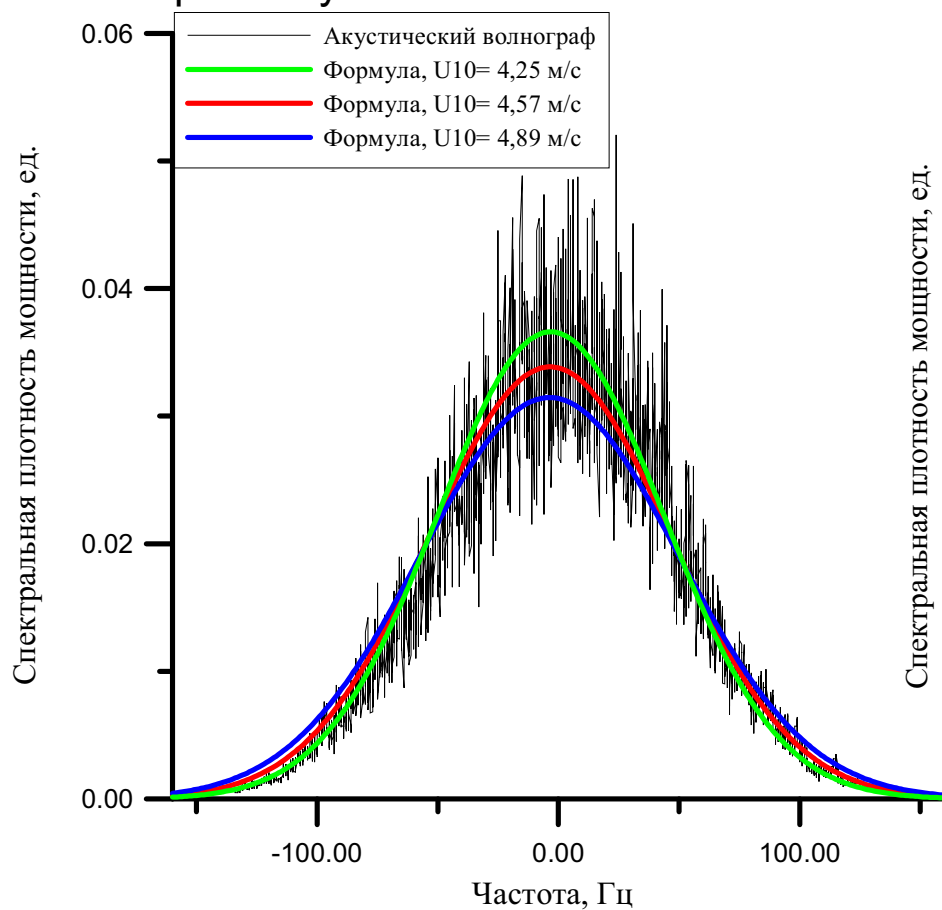
Натурный эксперимент

В ходе эксперимента измерения проводились при погружении гидролокатора на дно и ориентации антенны вертикально вверх.



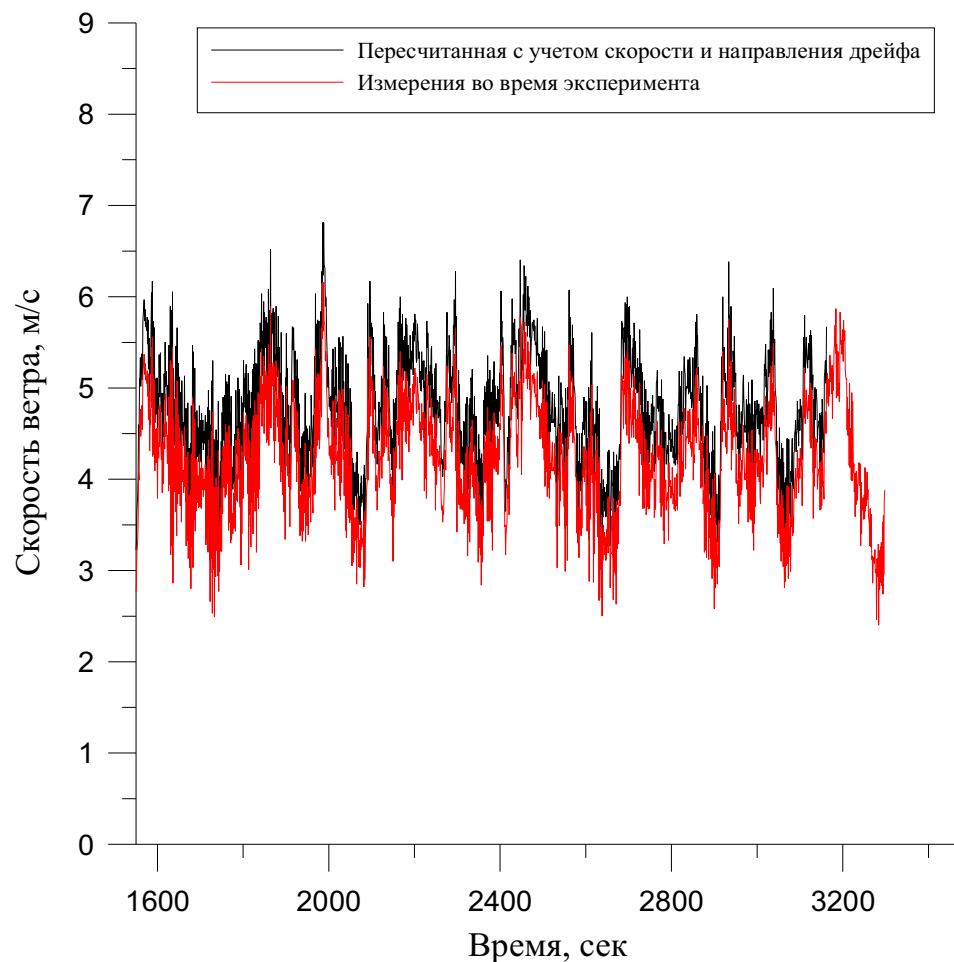
Экспериментальные данные

Сравнение экспериментальных данных с двумя вариантами моделирования для которых задавались ветровой разгон и скорость ветра соответствующие эксперименту.



Обработка экспериментальных данных о ветре

Доплеровский спектр, полученный в натурном эксперименте на Горьковском водохранилище, усреднялся за 120 секунд. Безразмерный ветровой разгон во время измерений равнялся 1470, а скорость ветра в среднем 4,57 м/с со среднеквадратическим отклонением 0,32 м/с. Длина ветрового разгона и ветер для теоретических зависимостей вычислялся из показаний GPS приемника и мобильной метеорологической станции Windsonic, определяющей направление и скорость ветра.

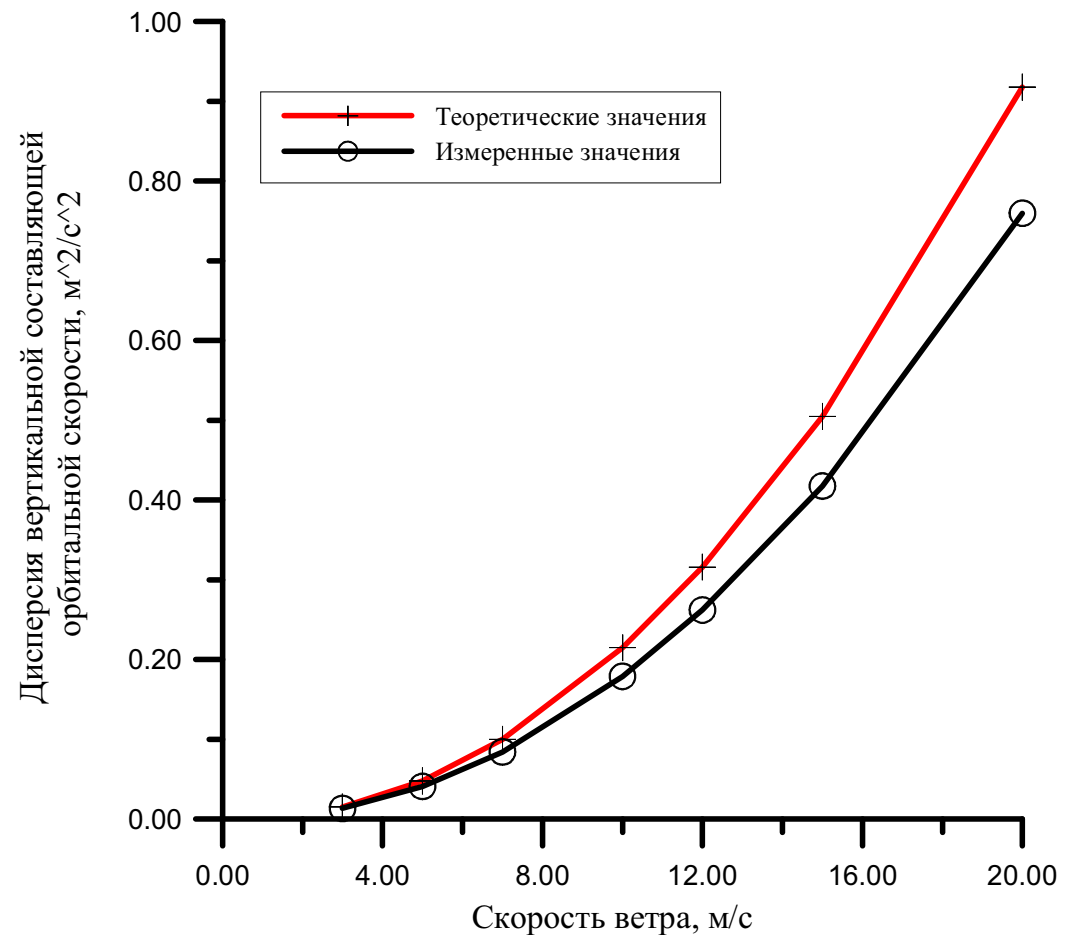


Алгоритм оценки дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости

В изготовленном макете есть только одна приемно-передающая антенна с симметричной диаграммой направленности антенны, что позволяет измерить только одну статистическую характеристику волнения.

Численное моделирование показало, что для неподвижного гидролокатора основной вклад в ширину доплеровского спектра вносит дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости, которую можно оценить с приемлемой точностью.

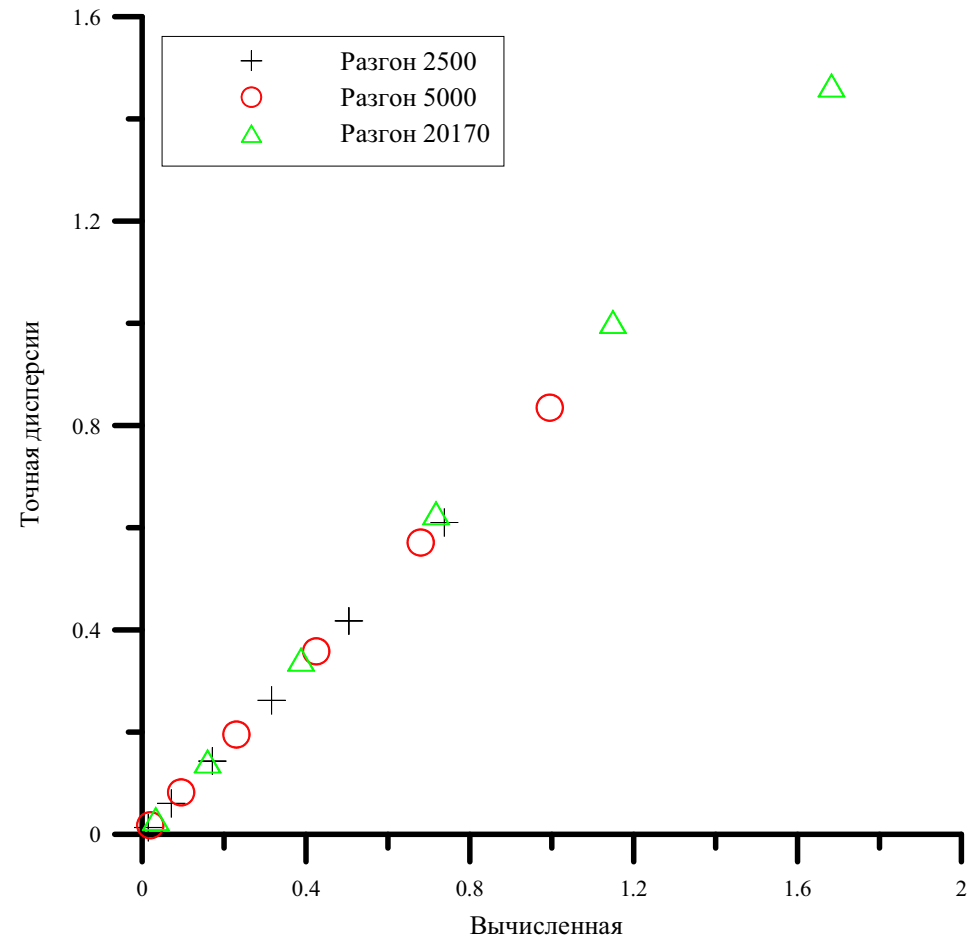
$$\sigma_{tt}^2 = \frac{(\Delta f_{10} \lambda)^2}{32 \ln 10}$$



Алгоритм пересчета

Связь точных значений дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости (по спектру волнения) и значений дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости полученных по формуле для оценки дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости для трех различных ветровых разгонов.

$$\sigma_{\text{ит}}^2(\text{пер.}) = 1,185 * \sigma_{\text{ит}}^2(\text{выч.}) - 0.0028$$



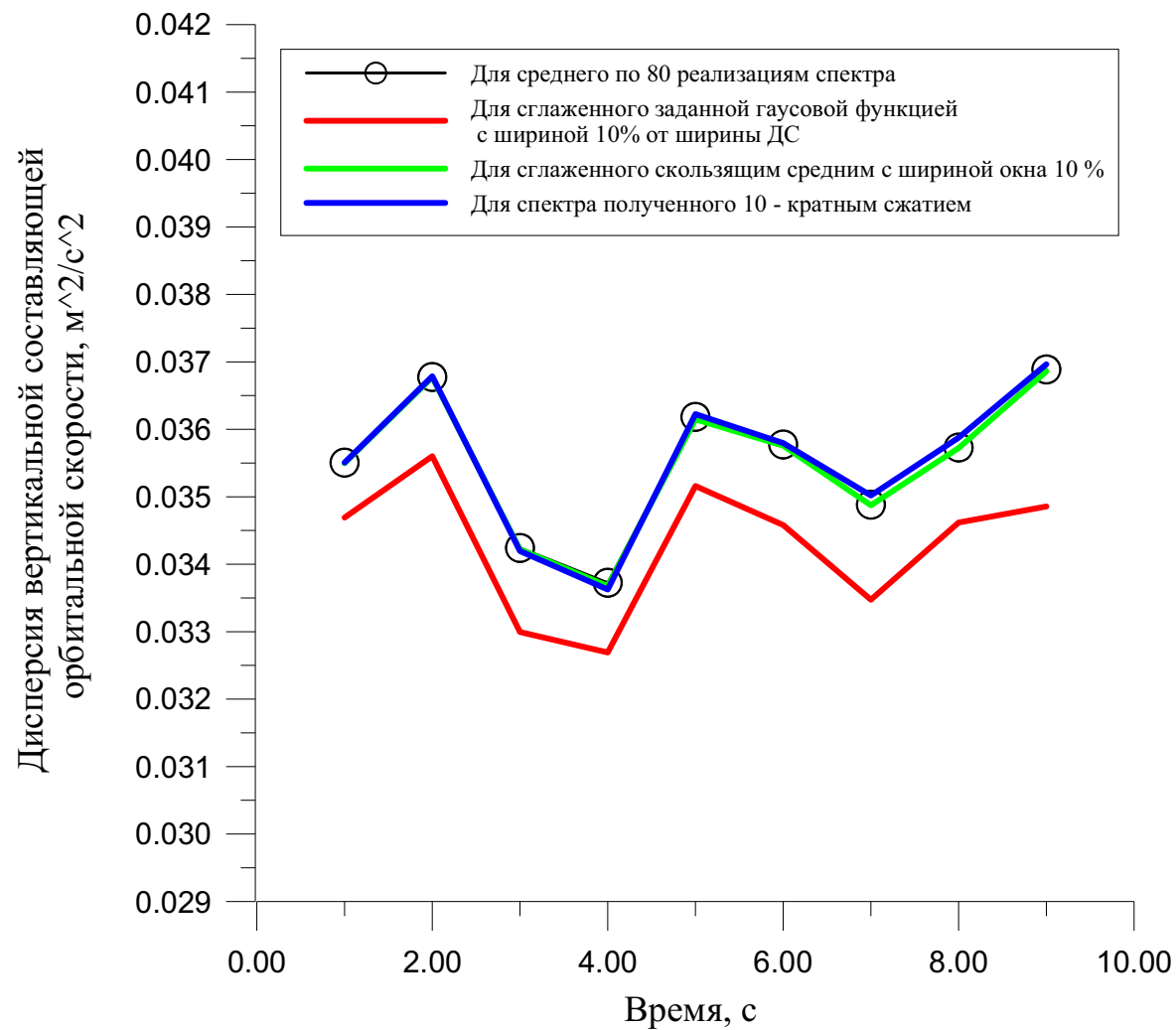
Обработка экспериментальных данных

Результаты применения формулы для оценки и алгоритма пересчета дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости, а также теоретические значения, использованные при численном моделировании эксперимента приведены в таблице.

дисперсия вертикальной сост. орб. скорости	Акустический волнограф,	Формула, 4,25 м/с	Формула, 4,57 м/с	Формула, 4,89 м/с	Моделирование, 80 реализаций, 4,57 м/с
по формуле оценки дисп., $\text{м}^2/\text{с}^2$	0.036	0.031	0.037	0.043	0.038
пересчитанная $\text{м}^2/\text{с}^2$	0.04	0.034	0.041	0.048	0.042
по модели спектра волнения, $\text{м}^2/\text{с}^2$		0.044	0.052	0.06	

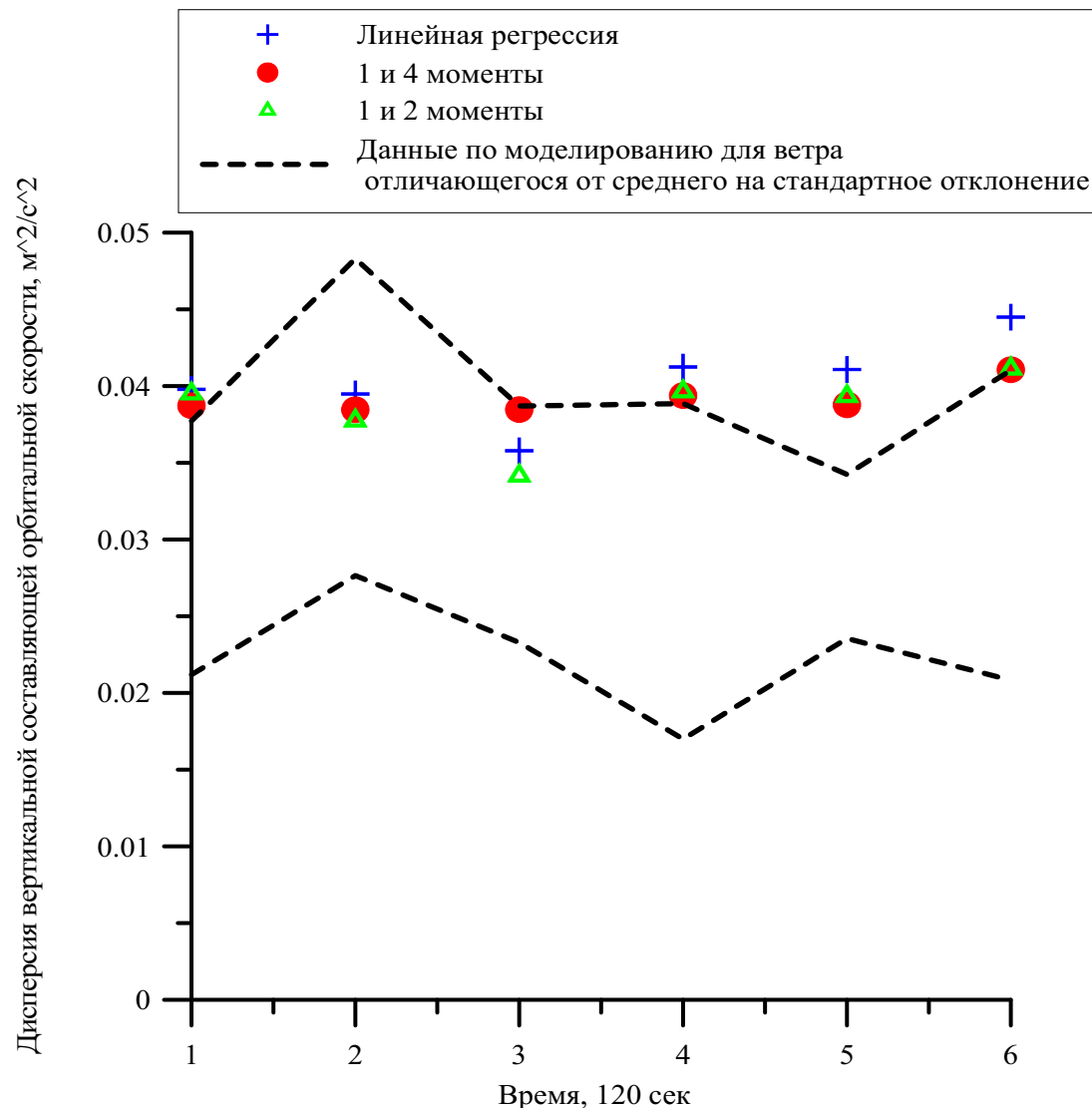
Обработка

Сравнение результатов использования методов сглаживания на экспериментальных данных.



Обработка

Сравнение дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости полученной тремя способами при измерении акустическим волнографом с данными полученными при моделировании для скоростей ветра отличающихся от средней скорости ветра за 120 секунд записи на стандартное отклонение. Средняя за 120 секунд скорость ветра изменялась от 5 м/с до 5,8 м/с, безразмерный разгон был выбран равным 1500



Выводы

- 1) Разработан комплекс программ для обработки данных с акустического волнографа с одной широкой приемо-передающей антенной.
- 2) На модельных данных были отработаны алгоритмы обработки данных.
- 3) Проведены эксперименты с макетом акустического волнографа в составе научных экспедиций на Горьковское водохранилище.
- 4) Часть экспериментальных данных обработана и проанализирована.
- 5) Показано соответствие измеренных доплеровских спектров с модельными, соответствующими условиям эксперимента.
- 6) Выполняется обработка данных совместных измерений с вехой Фруде на Горьковском водохранилище.
- 7) Также ожидается создание полноценной акустической системы для которой разрабатывается комплекс программ для обработки данных.

Сравнение со струнный волнографом

Был проведен эксперимент в котором струнный волнограф был закреплен на дебаркадере над акустическим волнографом. Измерения двумя волнографами проводились одновременно.

