

Определение высоты значительного волнения по анализу формы отраженного акустического импульса: измерения акустического волнографа в Черном море и сравнение с ADCP

*Рябкова М. С., Титченко Ю.А., Кареев В.Ю., Мешков Е. М., Беляев Р.В.,
Яблоков А.А., Понур К.А.*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

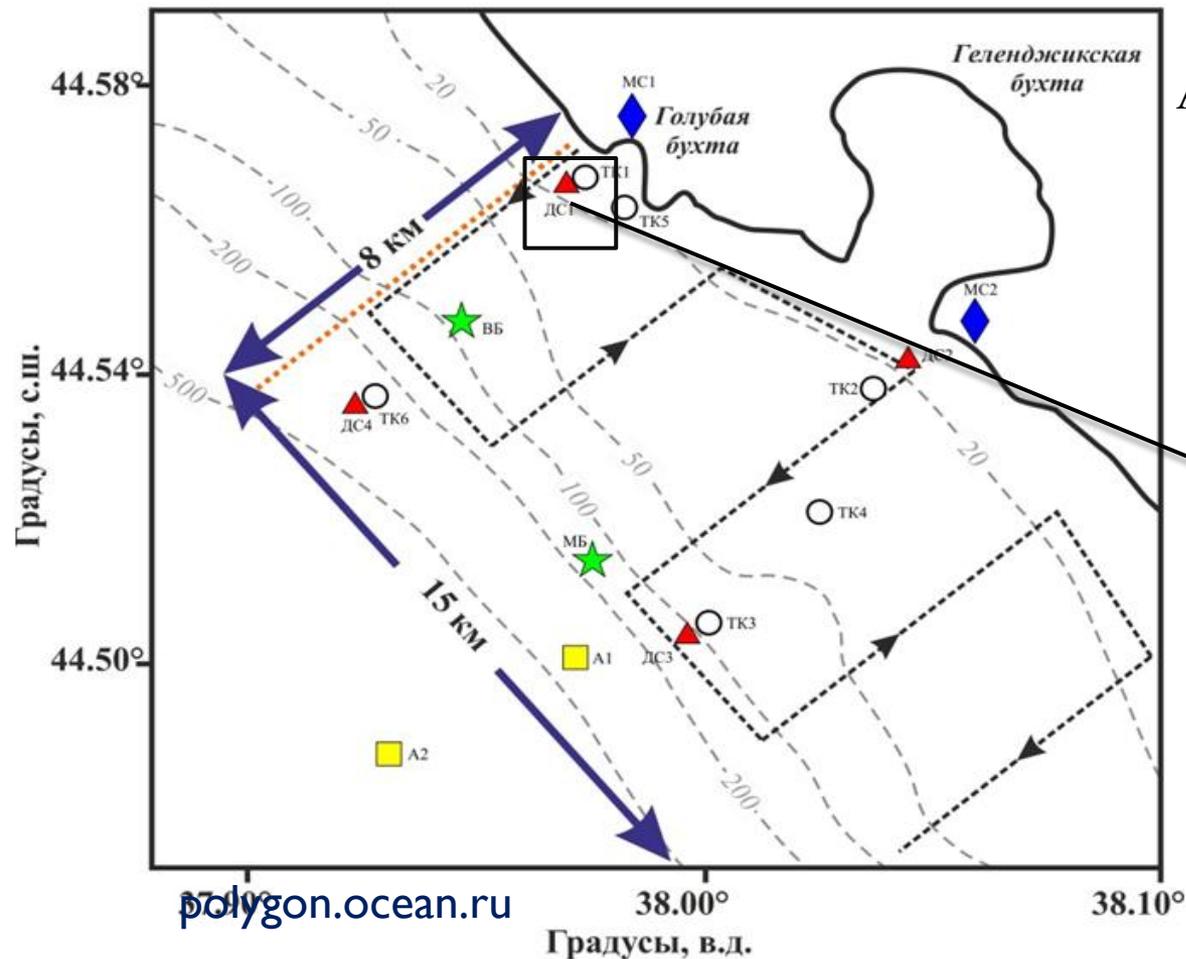
Баранов В.И., Очередник В. В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Южное отделение), Геленджик

Введение

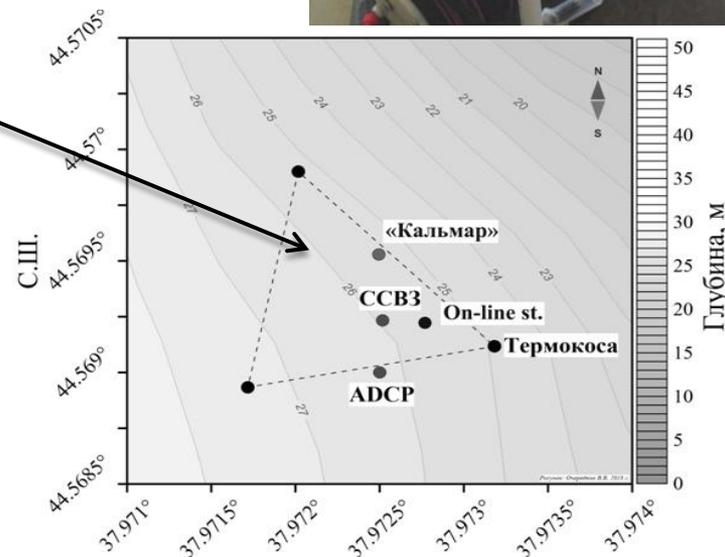
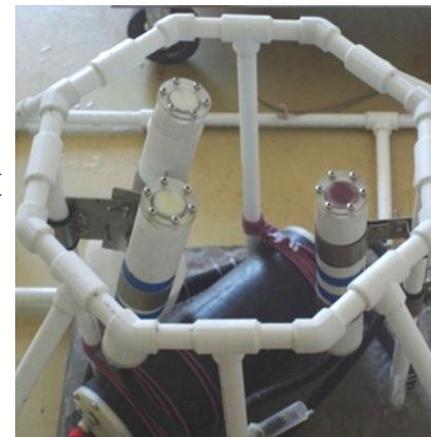
Акустический доплеровский профилограф течений ADCP RDI WHS-600 и подводный акустический волнограф «Кальмар» входят в состав многофункциональной системы онлайн мониторинга параметров водной среды, установленной на полигоне ЮО ИО РАН «Геленджик» на расстоянии 1 км от берега (красная звездочка ДС1 ближе к берегу). В состав комплекса входят также стационарная станция вертикального зондирования (ССВЗ) и термокоса. Данные передаются от приборов к системному блоку сбора данных (On-line st.) и далее по оптоволоконному кабелю на береговой компьютер, откуда их можно скачать по сети Интернет. На схеме используются следующие обозначения: треугольники – донные станции в составе ADCP и термокосы, квадрат – станция профилографа «Аквалог», звездочки – морские метеостанции, ромбы – наземные метеостанции, пунктирная ломаная – галсы судна для измерения пространственной структуры течений буксируемым ADCP. Подводный акустический волнограф и ADCP установлены на донной станции на глубине 28 м, расстояние между приборами составляет 60 м. Рабочая частота ADCP 600 кГц, диаграмма направленности менее 2 градусов. Скорости движения воды определяются каждые 30 с вертикальным разрешением 0.5 м. Измерение волнения проводится в течение 40 минут.

Схема полигона



- – Аквалогии; ▲ – донные станции; ○ – термокосы;
- ★ – метео и волномерные буи; - - - - - мониторинговый разрез;
- ◆ – метеостанции;

Акустический волнограф «Кальмар»



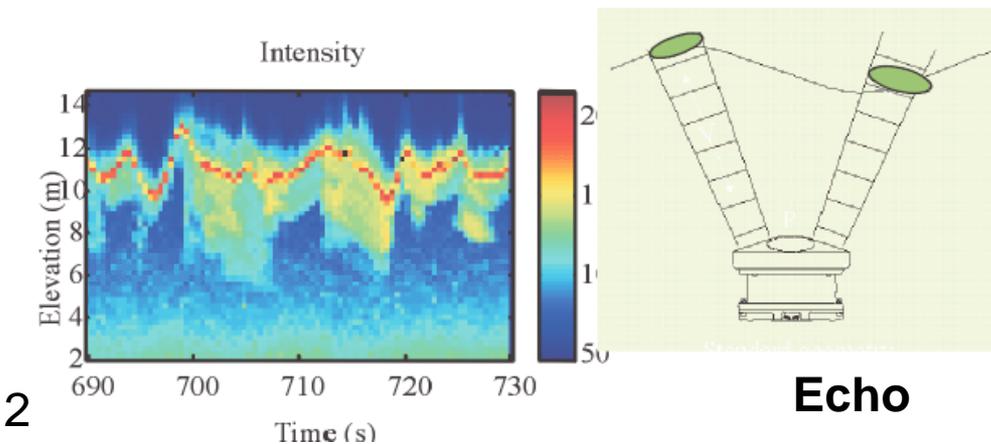
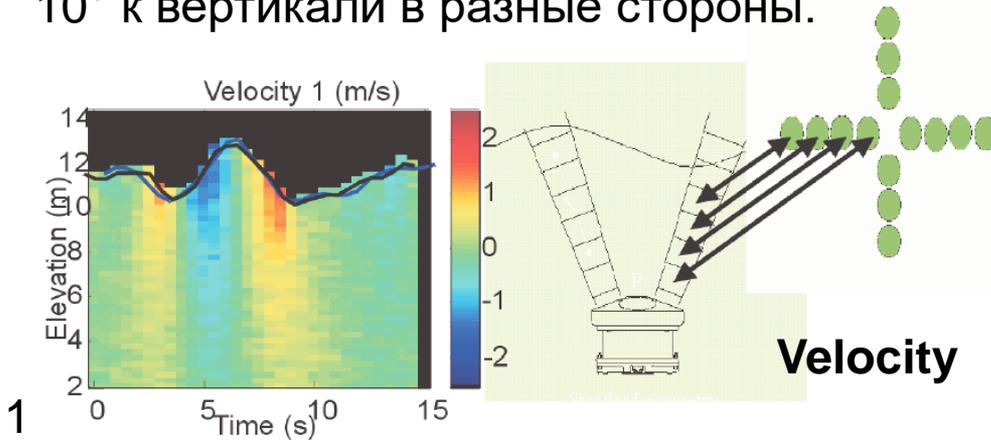
В. Д.

RDI WHS-600



RDI WHS-600: спектр волнения

RDI WHS-600 имеет 4 наклонных излучателя, ориентированными под углом 10° к вертикали в разные стороны.



RDI WHS-600 производит «сканирование» водной толщи по всей глубине, для измерения спектра волнения используется только несколько последних, приповерхностных, сканов. 1. По доплеровскому смещению можно восстановить орбитальную скорость в приповерхностном слое, а потом этот спектр скоростей пересчитать в спектр возвышений **Velocity**. 2. Измеряется время прихода сигнала для всех четырех каналов, по нему определяется изменение расстояния от прибора до поверхности воды от времени, по ней вычисляется спектр **Echo**.

Гидроакустический волнограф «Кальмар»

Доплеровский
гидролокатор

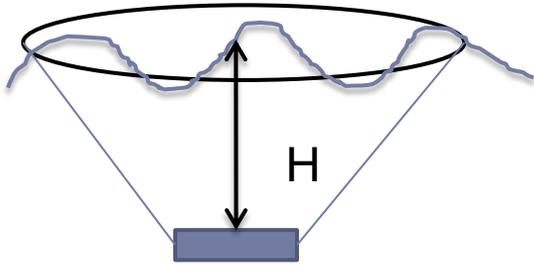
Импульсный
гидролокатор



- Высотомер – импульсный, ориентирован в надир, частота 200 кГц, частота повторения импульсов 2 Гц, диаграмма направленности 15x15°. Длина импульса: 5, 10, 20, 40 мкс
- Доплеровский гидролокатор – непрерывное излучение, частота 200 кГц, наклон 5 градусов от надира, диаграмма направленности 15x15°

В эксперименте длина импульса 40 мкс,
длина записи 15 минут

Импульсный канал



$$H = ct / 2$$

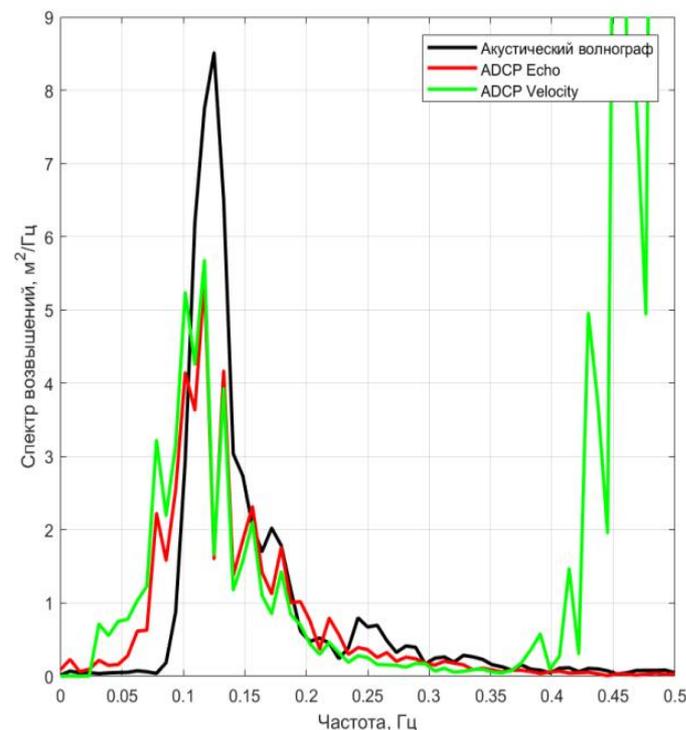
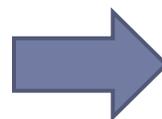
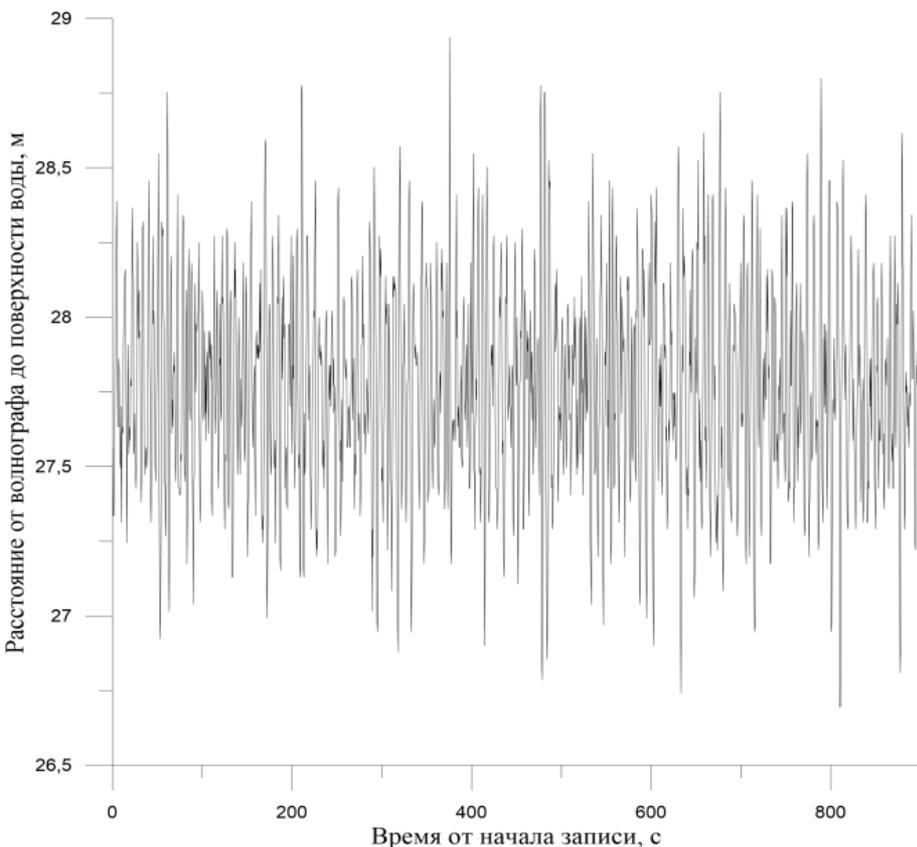
$c=1500$ м/с – скорость звука в воде

t – время с момента излучения импульса

до момента приема отраженного импульса

Записывается время прихода максимума отраженного импульса. Далее можно восстановить зависимость расстояния между прибором и водой от времени. При обработке сеанс записи разбивается на части по 128 с и для каждой части записи вычисляется среднее и вычитается. Для вычисления энергетического спектра каждой части записи используется метод P.D. Welch (Welch, 1967) с окном Hann (Essenwanger, 1986). Средний спектр для сеанса (всей записи) находится как среднее из спектров, вычисленных для перекрывающихся участков записи (перекрывание составляет 50%). Это позволяет уменьшить шум в спектре.

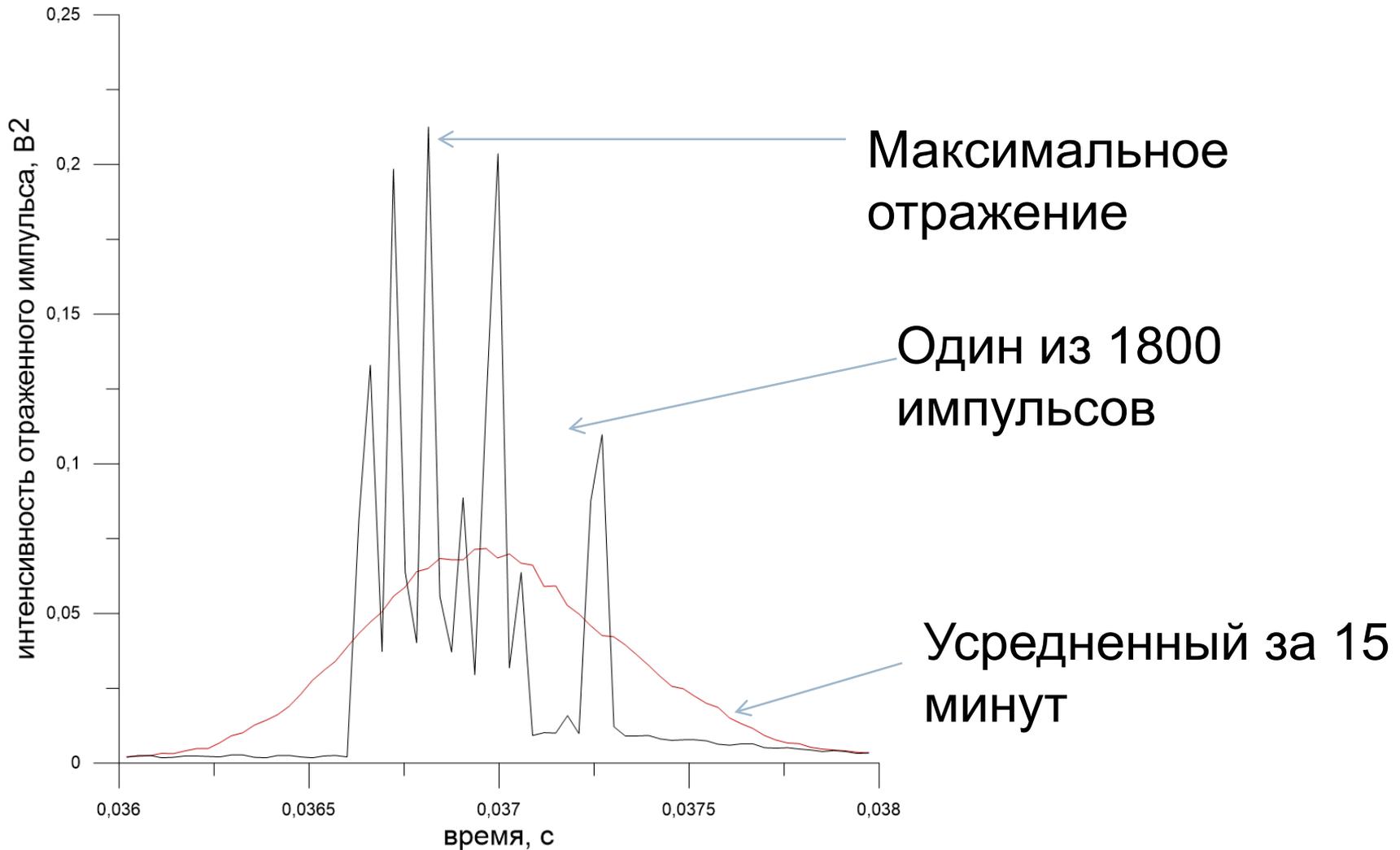
Вычисление спектра волнения



Расстояние от акустического волнографа до поверхности воды от времени. 5.02.2020 20:58-21:13

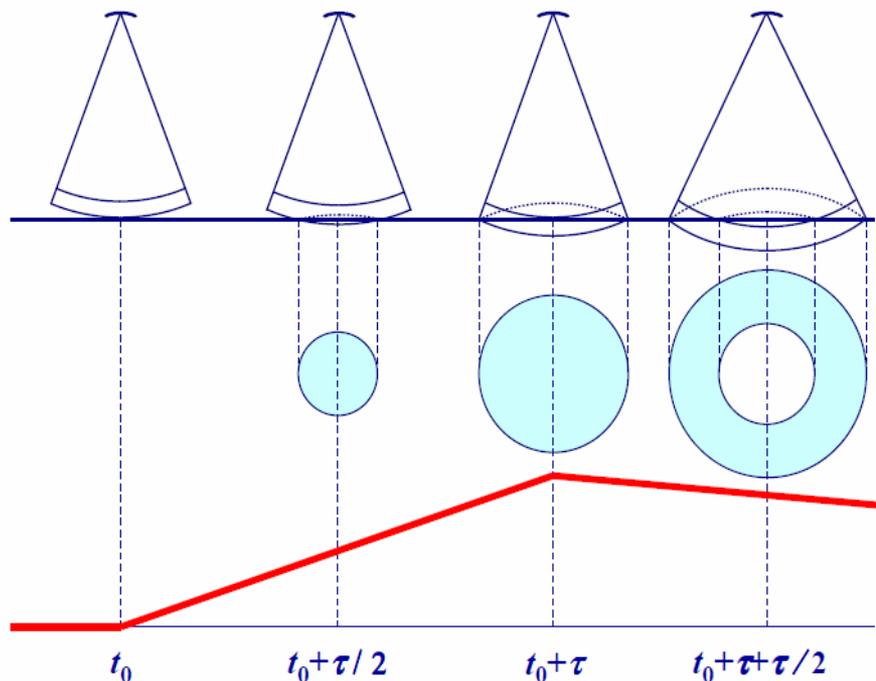
Черная кривая – акустический волнограф,
Красная кривая – спектр Echo,
Зеленая – спектр Velocity, 20:21– 21:01

Отраженный импульс



Акустический альтиметр

Принцип работы импульсного канала акустического волнографа сходен с принципом работы космического радиоальтиметра.



Интенсивность отраженного импульса начинает расти в момент, когда передний фронт импульса касается поверхности воды, (t_0 на рисунке), затем площадь «засвеченного» круга увеличивается и достигает максимума в момент, когда задний фронт импульса касается поверхности воды ($t_0 + \tau$, где τ – длительность импульса). В дальнейшем, на заднем склоне отраженного импульса, в «засвеченном» круге появляется «дырка».

Анализ формы отраженного импульса

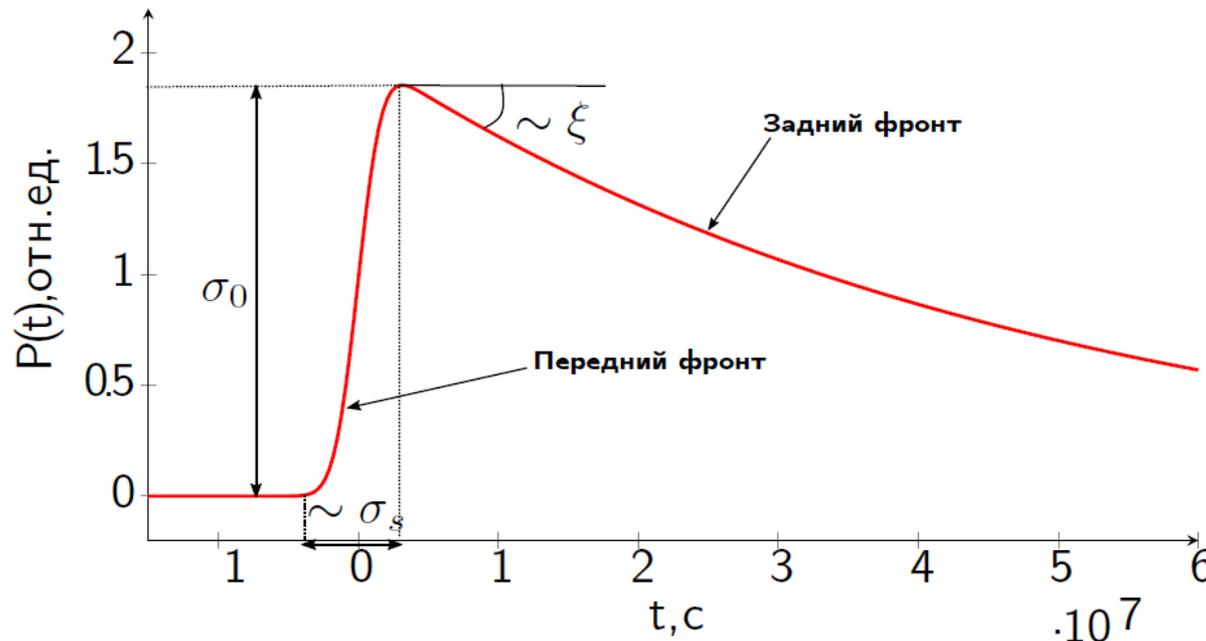
$$P(t) = A \exp\left\{S_T\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right\} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{t - \tau}{\sigma_L}\right), \text{ где } \leftarrow \text{Формула Брауна}$$

S_T – коэффициент наклона заднего фронта импульса,

τ – эпоха,

σ_L – ширина переднего фронта импульса, \leftarrow Связана с высотой волны

σ_0 – удельное сечение обратного рассеяния,



Подбираем функцию ошибок, определяем высоту волны и эпоху, затем корректируем полученные значения, моделируя полную форму импульса

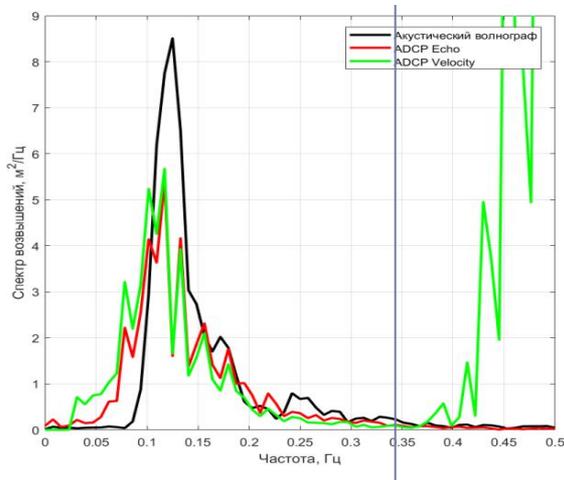
Определение SWH

SWH – significant wave height – высота значительного волнения

может быть определена по измерениям акустического волнографа

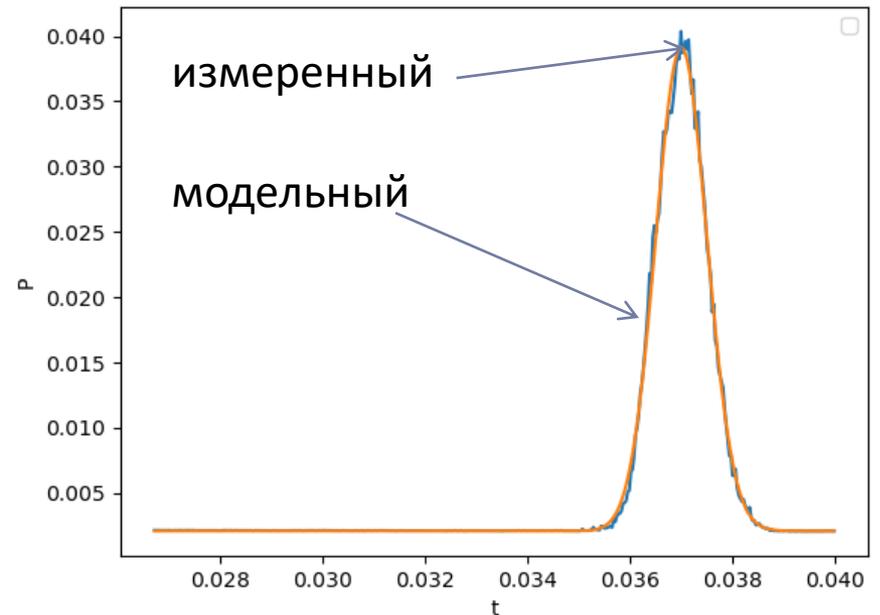
Интегрирование спектра

$$H_s = 4\sqrt{\int_0^{0.35} S(f)df}$$



При частотах выше 0.35 Гц спектр Velocity (зеленая кривая) растет

Подбор параметров формулы Брауна



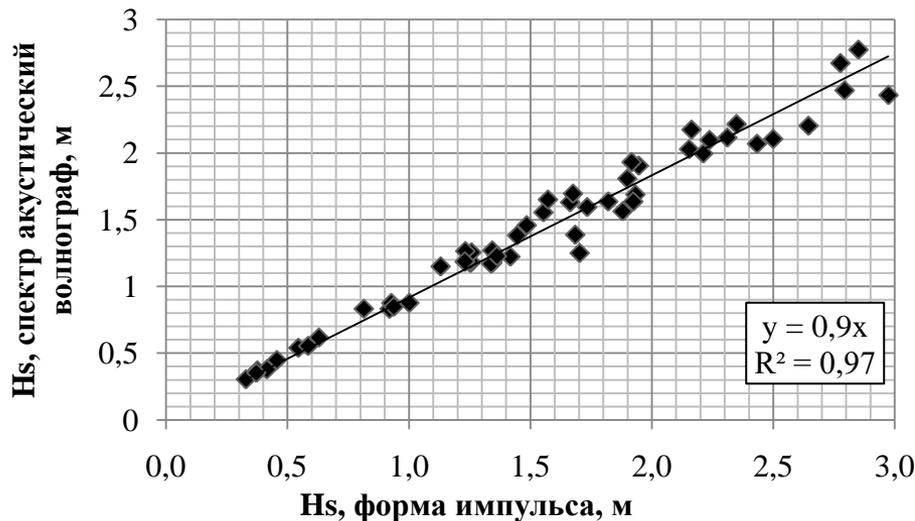
Сравнение методов

Акустический волнограф:

интегрирование спектра волнения

vs

анализ формы отраженного импульса

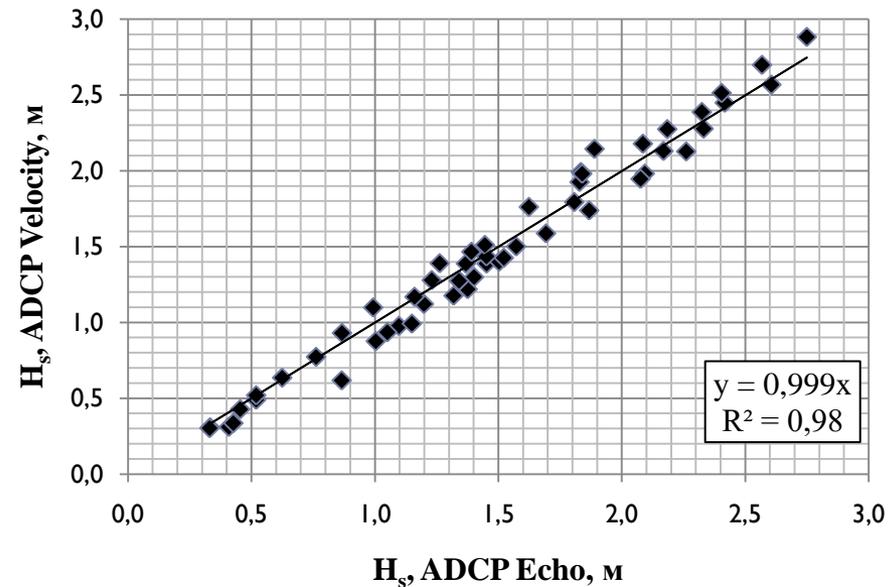


RDI WHS - 600:

Velocity

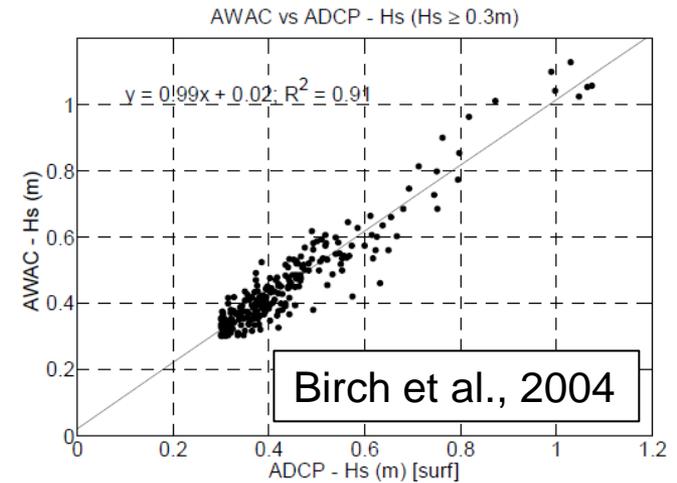
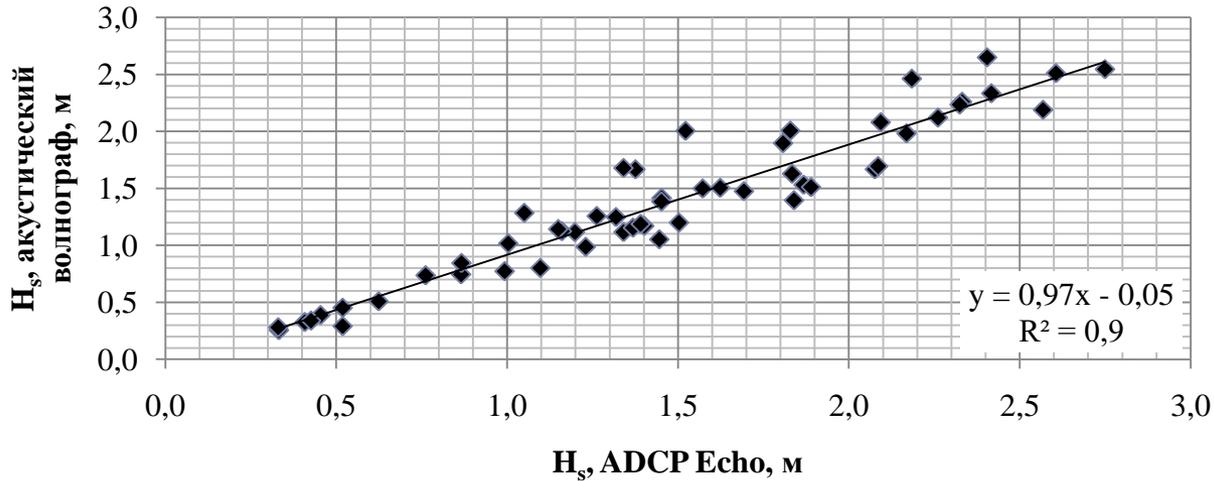
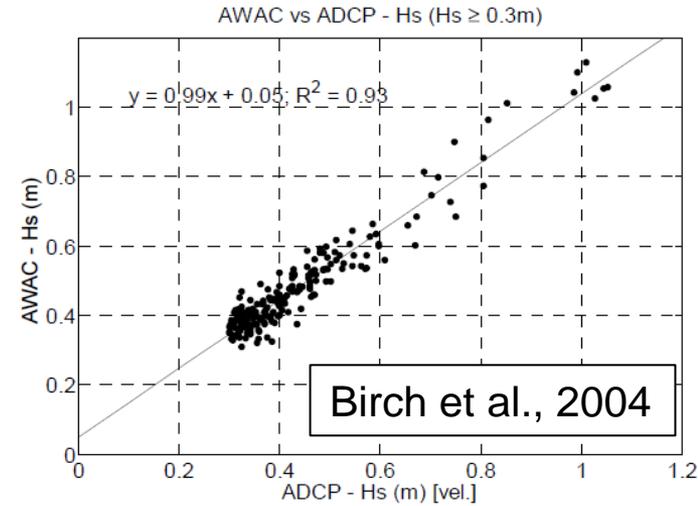
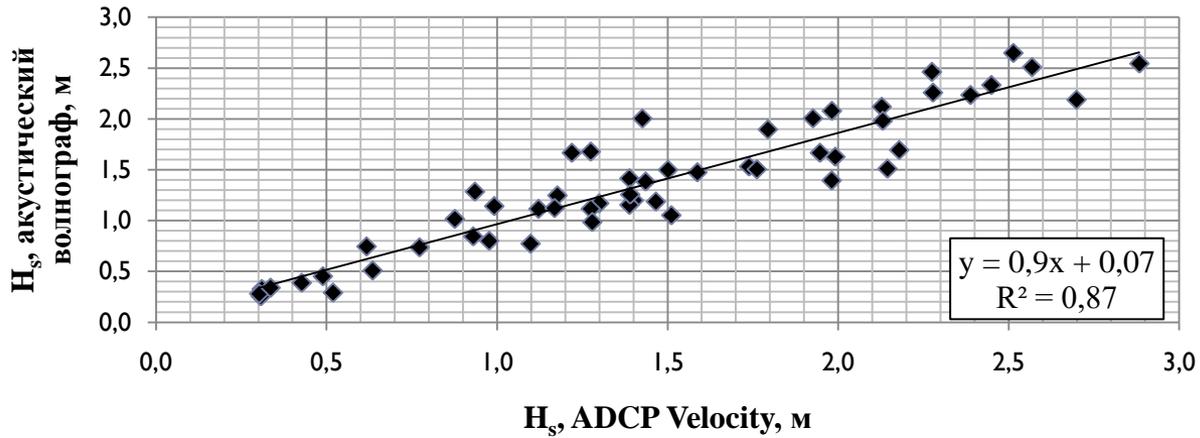
vs

Echo



Высоты значительного волнения, определенные разными методами, близки.

Сравнение приборов



Заключение

На рисунках приведены коэффициенты корреляции между измерениями акустического волнографа (метод вычисления спектра) и ADCP, проведено сравнение разных методов определения высоты волнения по измерениям акустического волнографа и ADCP, прямые линии на рисунках – линии $y=ax+b$. Здесь a лежит в интервале $[0,9; 0,97]$, а коэффициент корреляции не ниже 0.87. Таким образом, высота значительного волнения, вычисленная по спектру, измеренному подводным акустическим волнографом, и вычисленная по спектрам, измеренным ADCP, близки. Можно заметить, что результаты метода Echo лучше совпадают с измерениями акустического волнографа. Похожие результаты были получены в работе (Birch et al., 2004), в которой произведено сравнение двух ADCP с функцией измерения волнения: RDI 1200 kHz Doppler Current Profiler, принцип работы которого такой же, как у RDI WHS-600, и Nortek 1000 kHz AWAC Doppler Profiler, использующий surface track method, сходный с принципом работы акустического волнографа.

Приведенные данные подтверждают, что подводный акустический волнограф обеспечивает измерение параметров волнения с точностью, не уступающей ADCP.

Спасибо за внимание!

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 20-77-10089).

Если вы заинтересованы в экспериментальных данных, свяжитесь со мной:

m.rjabkova@gmail.com (Мария Рябкова)

или с моими коллегами:

yuriy@ipfran.ru (Юрий Титченко), **volody@ipfran.ru** (Владимир Караев).

Более подробно о методе моделирования отраженного импульса можно узнать из работы К.А. Понура и В.Ю. Караева «Влияние модели заостренной морской поверхности на форму отраженного импульса и эффективную площадь рассеяния». В работе Титченко с соавторами «Алгоритм вычисления зависимости мощности отраженного излучения от угла падения без изменения пространственной ориентации антенны по форме отраженного импульса» рассмотрено влияние широкой антенны акустического волнографа на отраженный импульс.

Статья, посвященная сравнению измерений ADCP и акустического волнографа, «Измерение статистических характеристик морской поверхности с помощью подводного акустического волнографа в Черном море и сравнение с ADCP», принята в журнал Современные проблемы ДЗЗ.