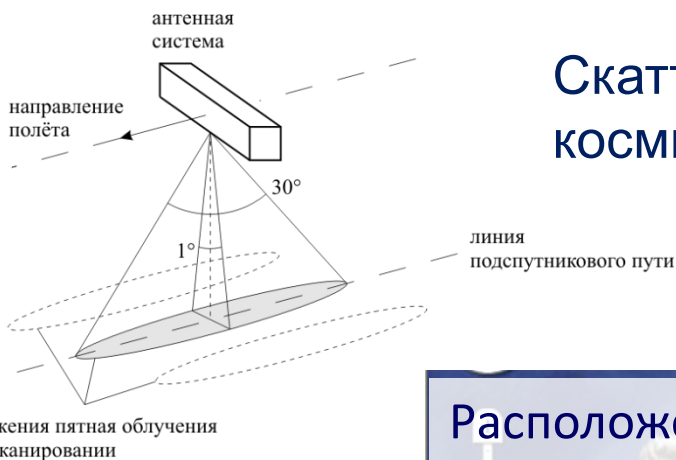


Определение направления волнения с помощью акустического волнографа

Докладчик: Мария С. Рябкова,
стажер-исследователь лаб. 270,
Института прикладной физики РАН,
Нижний Новгород

Научная группа: В.Ю. Караев, Ю.А. Титченко,
Е.М. Мешков, Р.В. Беляев Р.В., К.А. Понур

МОТИВАЦИЯ



Скаттеромет «СКАТ-3М» для космического аппарата «Метеор-М» №3



- Амплитудные характеристики и направление энергонесущих волн
- Состояние приводного слоя атмосферы (давление, скорость ветра и пр.)

Проблема: буи NDBC нельзя использовать во время замерзания водоема

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ВОЛНОГРАФ «КАЛЬМАР»

Доплеровский
гидролокатор



Импульсный
гидролокатор

- Высотомер – импульсный, ориентирован в надир, частота 200 кГц (длина волны 7.5 мм), частота повторения импульсов 2 Гц, диаграмма направленности $15 \times 15^\circ$. Длина импульса: 5, 10, 20, **40** мкс
- Доплеровский гидролокатор – непрерывное излучение, частота 200 кГц, наклон 5 градусов от надира, диаграмма направленности $15 \times 15^\circ$

Позволяет измерить всенаправленный спектр волнения и доплеровский спектр отраженного акустического сигнала

Буй SPOTTER



This site is for demo purposes only and may have limited functionality

SPOT-0104

New data received 35 minutes ago

0.3 m @ 3.3 s 4.4 m/s

WAVE HEIGHT	DIRECTION			PERIOD	SPREAD
	MEAN	180° ▲	2.6 s		
0.3 m	PEAK	207° ◀	3.3 s	72°	

WIND SPEED	DIRECTION	SURFACE
4.4 m/s	165° ▲	glassy

SEA SURFACE TEMPERATURE
Check out [Spotter v2](#) with SST sensor

44.515550°, 37.979367°

08/07/2020 13:13:01 MSK

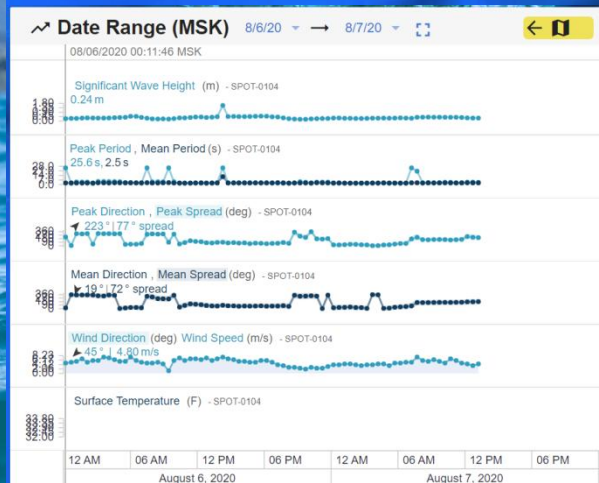
Subscription expires soon

<https://figshare.com/s/bdae3604e8fbaa1fcbc5>

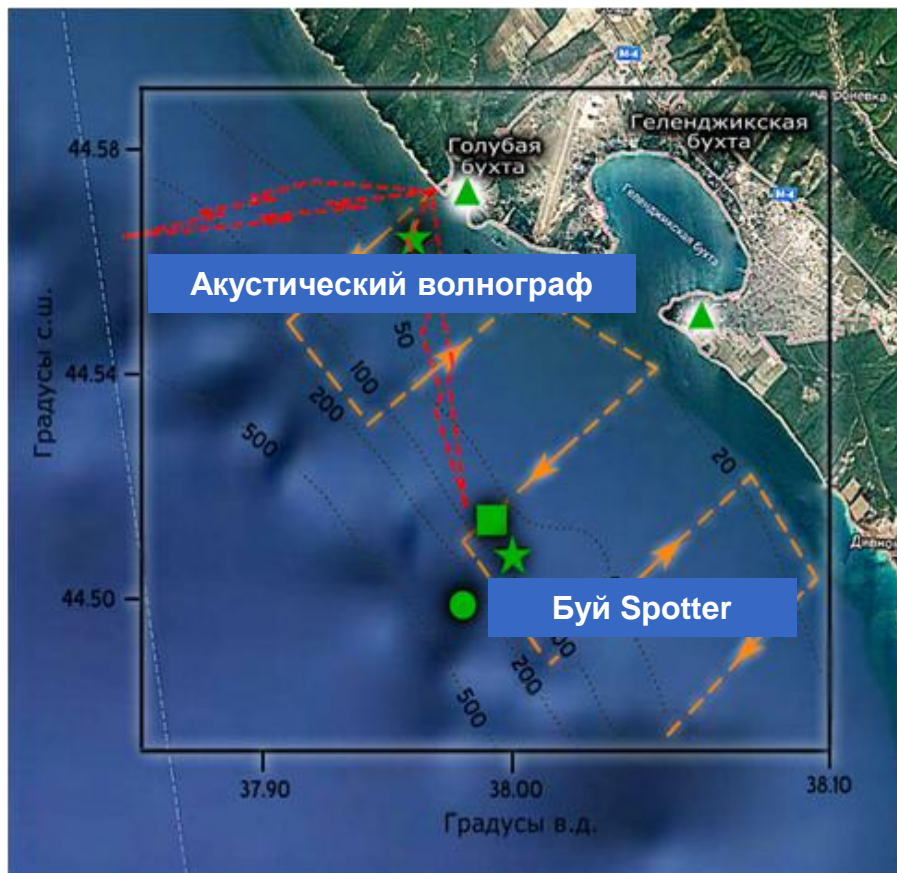
Производство
– компания
Sofar Ocean,
США

Был
установлен в 7
км от
Геленджикской
бухты. Прибор
производит
усреднение

данных каждые 30
минут. Измеряет
всенаправленный
спектр,
направление
волнения, ветер
(вычисление)



Полигон «Геленджик» ЮО ИО РАН



Зеленые звездочки –
донные станции в
составе ADCP и
термокосы

зеленый кружок –
станция профилографа
“Аквалог”

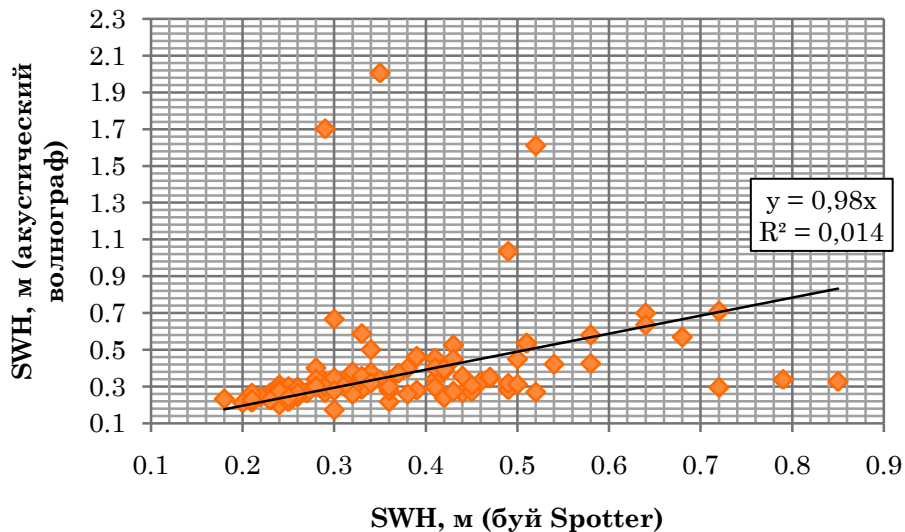
зеленый квадрат –
морская метеостанция

красные молнии –
радиолокационные
измерения

Акустический волнограф работал на полигоне с октября 2019 по декабрь 2020 г., буй Spotter работал в июле-декабре 2020

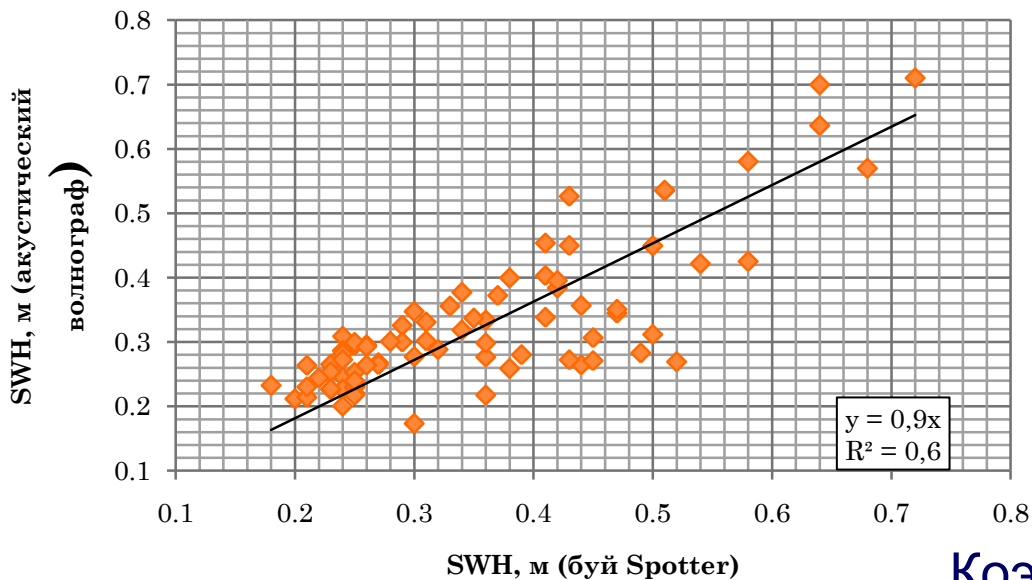
XIX.Е.324 Епанова К.С. Акустический волнограф для долговременного мониторинга волнения в Черном море, комн. 220, пт. 11:10-11:20

ВЫСОТЫ ВОЛН



Геленджик, высоты волн
с 1 по 21 августа 2020
года

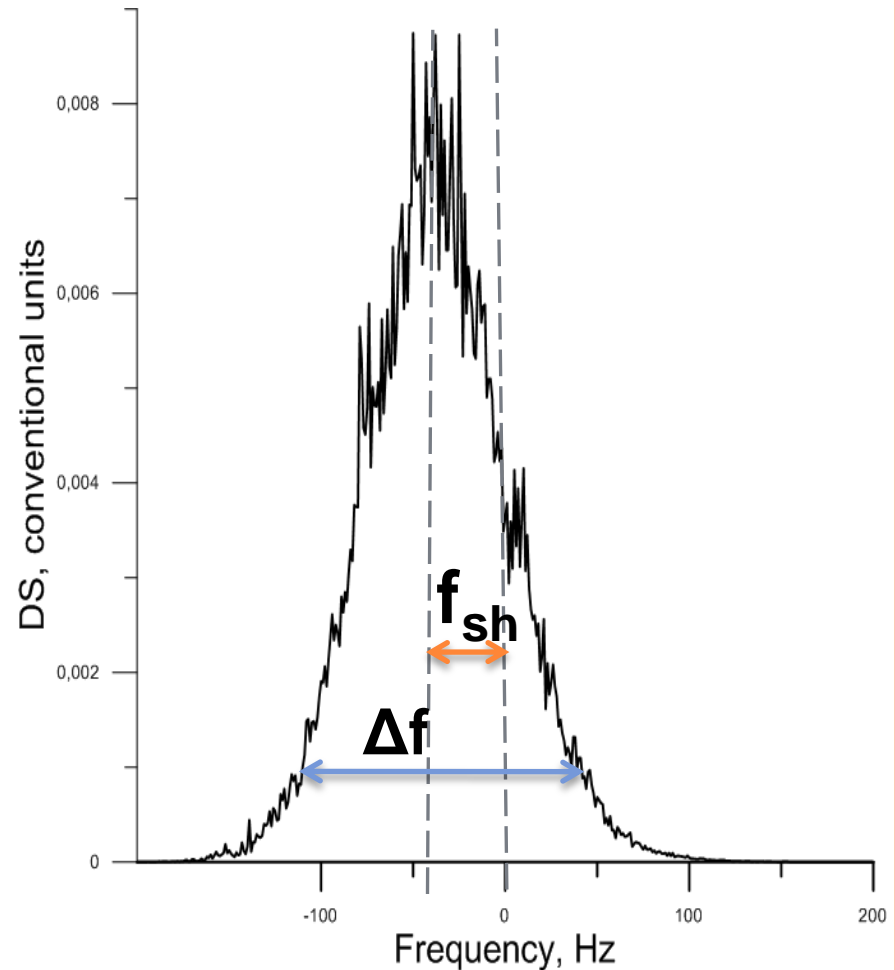
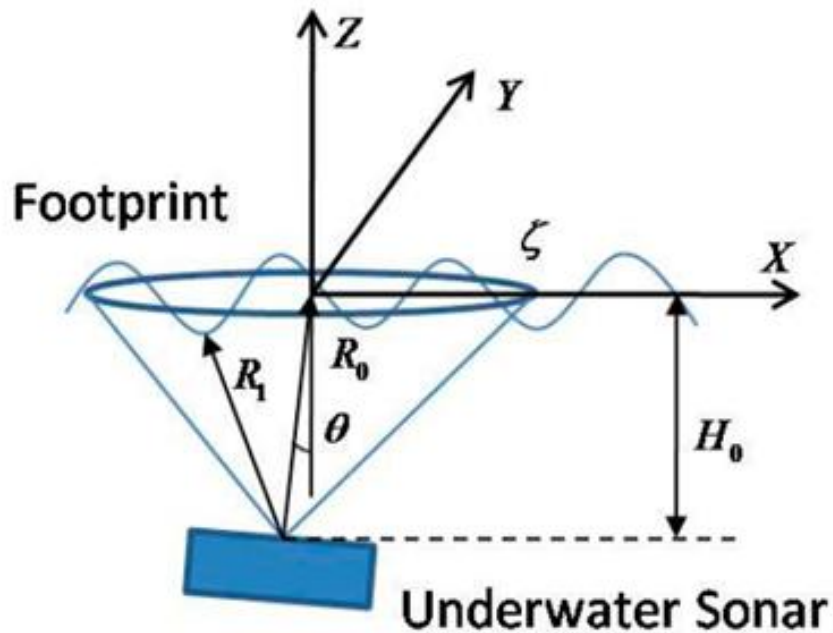
Коэффициент корреляции $r = 0,4$



Для волн, идущих
с моря, высоты
волн, измеренных
акустическим
волнографом и
волномерным
бумом, коррелируют

Коэффициент корреляции $r = 0,8$

ДОПЛЕРОВСКИЙ СПЕКТР

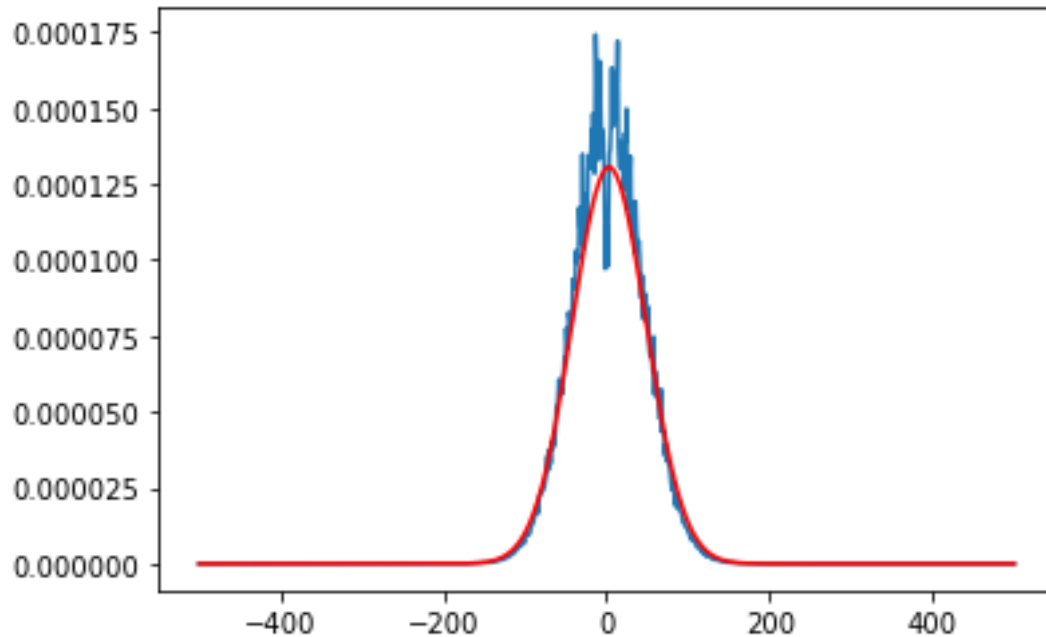


f_{sh} – смещение ДС

Δf – ширина ДС

$$DS(f) = A_0 \exp\left(-\frac{(f - f_{sh})^2}{2(\Delta f)^2}\right)$$

Зондирование вблизи надира



При зондировании вблизи надира доплеровский спектр описывается гауссовой кривой

Угол падения $\theta_0 = 5^\circ$

$$DS(f) = A_0 \exp\left(-\frac{(f - f_{sh})^2}{2(\Delta f)^2}\right)$$

$$f_{sh} = \frac{\int f \cdot DS(f) df}{\int DS(f) df}$$

$$\Delta f = \sqrt{\frac{\int f^2 DS(f) df}{\int DS(f) df} - f_{sh}^2}$$

ДС (МАЛЫЕ УГЛЫ ПАДЕНИЯ)

$$\Delta f \propto \frac{\cos \theta_0}{\lambda} \sqrt{\sigma_{tt}^2 - \frac{11.04 \cdot (K_{xt})^2}{\delta_x^2 + 11.04 \cdot \sigma_{xx}^2} - \frac{11.04 \cdot \cos^2 \theta \cdot (K_{yt})^2}{\delta_y^2 + 11.04 \cdot \sigma_{yy}^2}}$$

$$f_{sh} = -\frac{2 \cdot \sin \theta_0}{\lambda} \cdot \frac{11.04 \cdot K_{xt}}{\delta_x^2 + 11.04 \cdot \sigma_{xx}^2}$$

$$\sigma_0 \cong \frac{|R_{eff}(U_{10})|^2 \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta_0}{2} \left(\frac{11.04}{\delta_x^2 + 11.04 \sigma_{xx}^2}\right)\right]}{2 \cos^4 \theta_0 \sqrt{\left(\frac{\delta_x^2}{11.04} + \sigma_{xx}^2\right) \left(\frac{\delta_y^2}{11.04 \cos^2 \theta_0} + \sigma_{yy}^2\right)}}$$

Y. A. Titchenko
and V. Y. Karaev,
Radiophysics and
Quantum
Electronics, vol.
55, pp. 493-501,
2013.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА

$$\sigma_{xx}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} W(\kappa, \phi) \kappa^3 \cos^2(\phi) d\phi d\kappa,$$

$$\sigma_{yy}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} W(\kappa, \phi) \kappa^3 \sin^2(\phi) d\phi d\kappa,$$

$$\sigma_{tt}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} W(\kappa, \phi) \kappa \omega^2(\kappa) d\phi d\kappa,$$

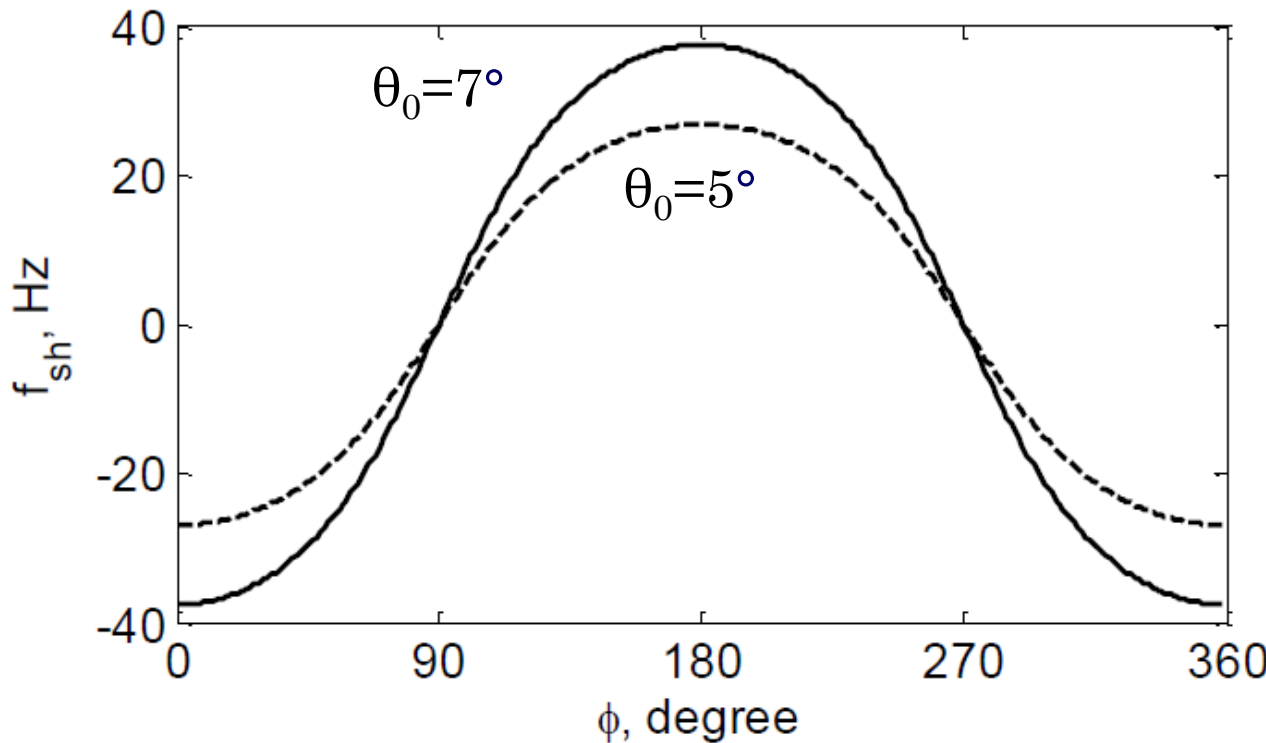
$$K_{xt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} W(\kappa, \phi) \kappa^2 \omega(\kappa) \cos(\phi) d\phi d\kappa,$$

$$K_{yt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} W(\kappa, \phi) \kappa^2 \omega(\kappa) \sin(\phi) d\phi d\kappa,$$

where κ and $\omega(\kappa)$ are the wavenumber and the angular frequency of sea waves connected by the dispersion relation, ϕ is the azimuth angle of wave propagation relative to the axis x , $W(\kappa, \phi)$ is the sea wave spectrum in polar coordinates, and κ_b is the boundary wavenumber

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЛНЕНИЯ

$$\varphi^* = \varphi(f_{cm} = 0) \pm 90^\circ \quad f_{cm}(\varphi^*) < 0^\circ$$



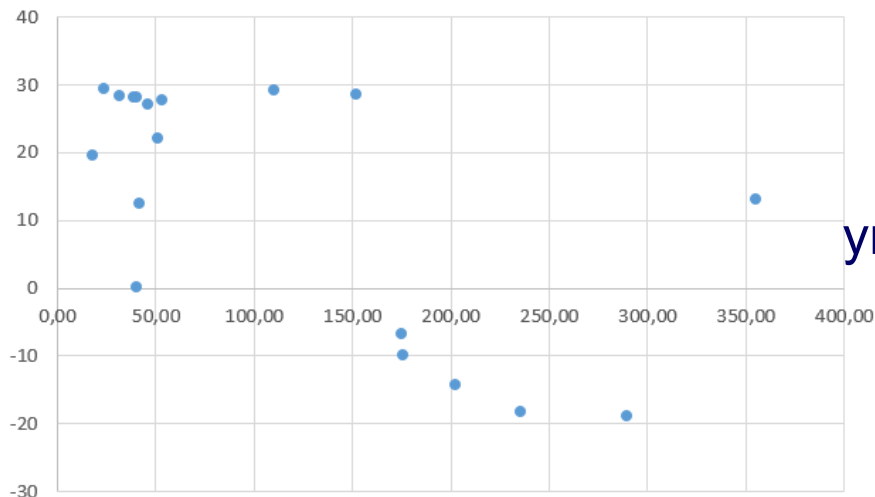
При зондировании перпендикулярно волнению смещение доплеровский спектр становится равным 0. Зондированию вдоль волнения соответствуют отрицательные значения смещения

АЗИМУТАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

Смещение ДС от направления волнения 5-9

Смещение ДС, Гц

августа



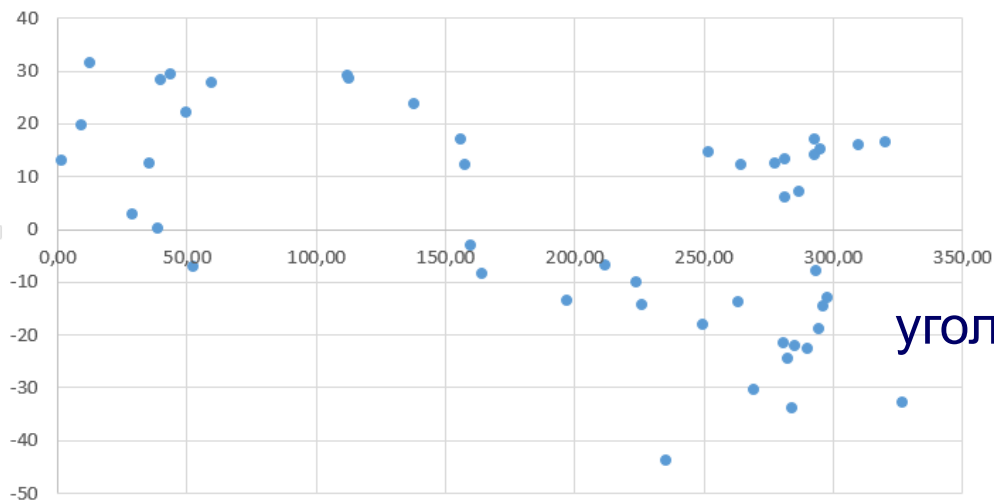
угол, °

Переход через 0 происходит при угле около 180 градусов, отрицательные значения при углах от 180 до 350. локатор смотрит в направлении около 270 градусов.

Смещение ДС от направления волнения при высотах

Смещение ДС, Гц

волн 0,2-0,4м



угол, °

0 – волнение идет с севера на юг, 270 – волнение идет с запада на восток, т.е. локатор ориентирован на восток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Импульсный канал акустического волнографа позволяет восстанавливать спектр волнения, параметры волнения.
- Доплеровский канал акустического волнографа позволяет проводить измерения ДС отраженного взволнованной поверхностью сигнала. Смещение ДС можно использовать для определения направления волнения при использовании двух доплеровских каналов, расположенных перпендикулярно друг другу. В таком случае можно однозначно подобрать функцию $f_{sh} = A \cos(\phi - \phi_0)$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Работа поддержана грантом Президента РФ
МК-1130.2020.5 и госзаданием 0030-2021-0005.

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)

marygo@mail.ru (Мария Панфилова)

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА



Акустический волнограф «Краб» (2021 г.)
оснащен двумя взаимно перпендикулярными
доплеровскими каналами