



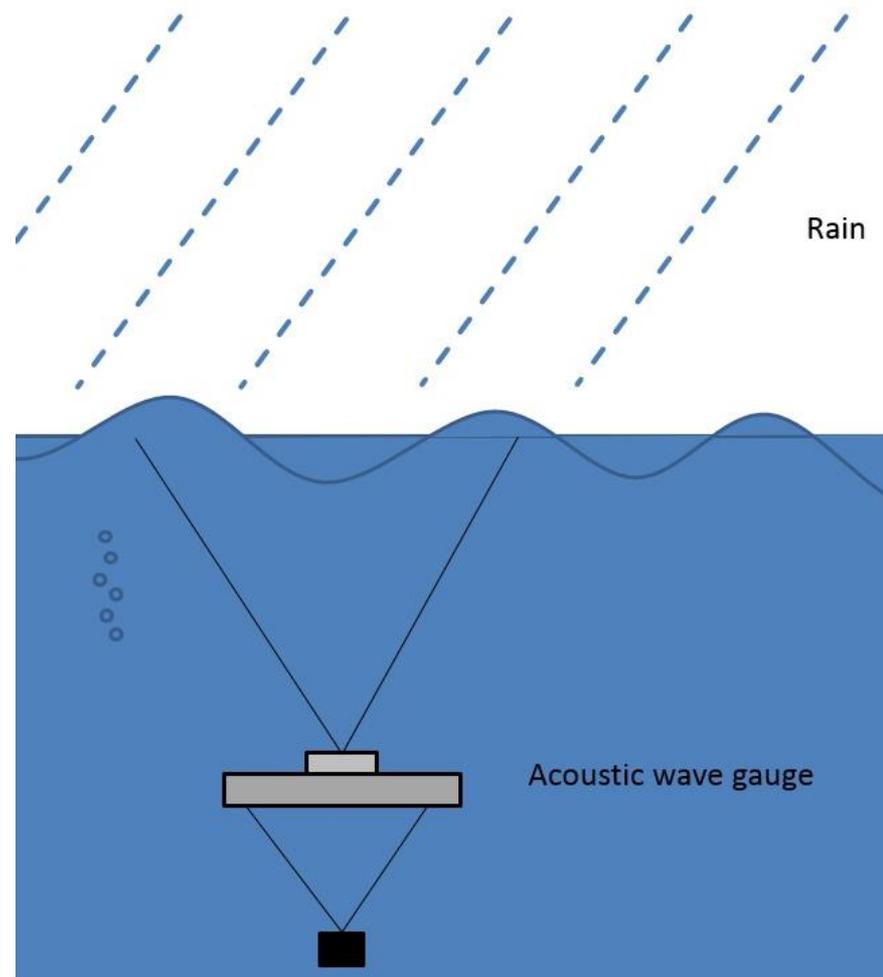
Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

*Возможности определения параметров
волнения на основе анализа формы
отраженного акустического импульса*

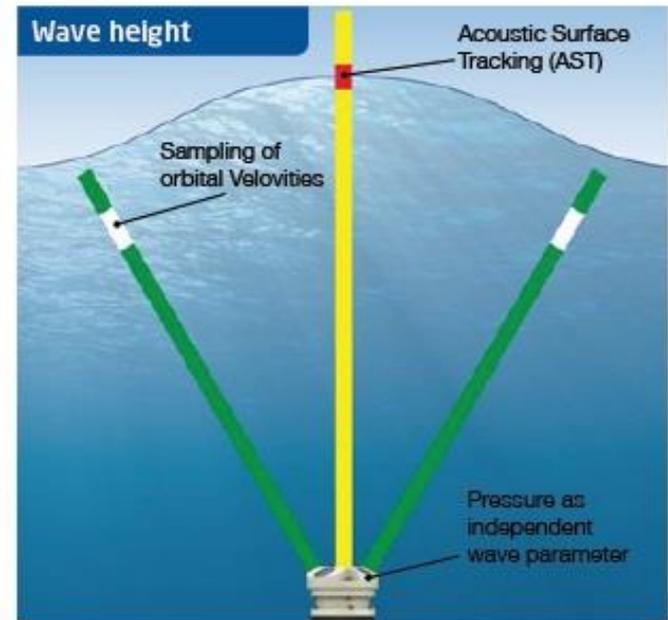
Титченко Ю.А., Кареев В.Ю., Мешков Е. М., Рябкова М. С.

Прорывным решением проблемы подспутниковых измерений параметров водной поверхности может стать использование гидроакустических методов:

- Подводный акустический волнограф позволяет измерять параметры водной поверхности в любом месте Мирового океана без использования морских платформ и без возмущений самой поверхности.
- Более того подводный акустический волнограф может работать при любых атмосферных условиях, например, в сильных штормах, во время осадков, в Арктическом регионе и в замерзающих внутренних водоемах.
- На сегодняшний день только подводный акустический волнограф способен измерять параметры водной поверхности влияющие на отражение спутниковых радиолокаторов.
- В данной работе впервые протестирован абсолютно новый подход для измерения параметров поверхностных волн позволяющий измерять не только параметры влияющие на сечение обратного рассеяния и доплеровский спектр (например, наклоны волн) но и высоту волн.



Измерение высоты волн и направленного спектра волнения подводными акустическими системами хорошо известно. Принцип работы таких систем заключается в анализе реализации времени задержки до максимума отраженного импульса.



From the Nordek AWAC brochure.

Минимальная длина измеряемой волны в таких системах будет зависеть от диаграммы направленностей антенны и глубины погружения.

Такие системы могут так же измерять вертикальные скорости волн. Однако из-за низкого разрешения эти методы нельзя использовать для измерения наклонов волн и других параметров влияющих на отражение электромагнитного сигнала, например со спутников. Кроме того восстановленные параметры волн будут зависеть от глубины погружения.

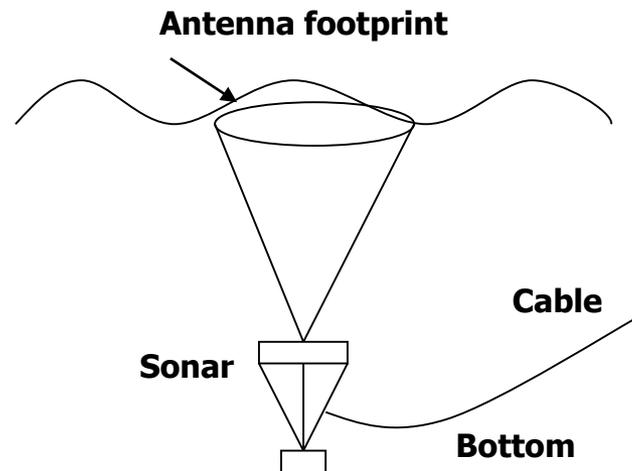
Мы предлагаем фундаментально другой подход:

- Миную стадию записи временной реализации волн и счета спектра волнения возможно сразу перейти к измерению интегральных параметров морских волн.

$$\sigma_h^2 = \int S(\omega) d\omega = \frac{\sum (h(t) - \bar{h}(t))^2}{n-1} \quad \text{Дисперсия высот}$$

$$\sigma_{xx}^2 = \int k_x^2(\omega) S(\omega) d\omega = \frac{\sum \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} - \overline{\left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right)} \right)^2}{n-1} \quad \text{Дисперсия наклонов}$$

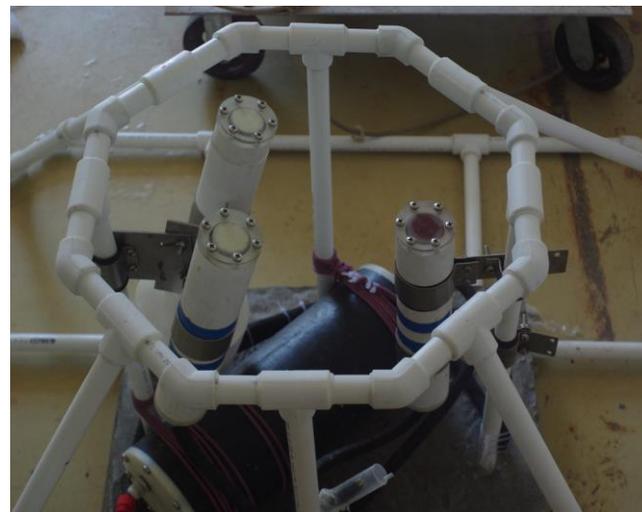
- Подход предлагаемый нашей научной группой позволяет точно измерять дисперсию высот независимо от глубины погружения. Важно что измерения проводятся не в одной точке а по площадке засвеченной антенной, так же как происходит при спутниковом дистанционном зондировании.
- Принципиально подход аналогичен применяемому в спутниковой альтиметрии, где по ширине переднего фронта отраженного импульса определяют высоту значительного волнения. При использовании широкой диаграммы направленности антенны помимо высоты значительного волнения, определяемой по переднему фронту отраженного импульса, может быть восстановлена дисперсия наклонов поверхности по форме заднего фронта.



Радиоальтиметр Topex/Posiedon

Для измерений предлагается использовать импульсный подводный ультразвуковой волнограф (или акустический волнограф) специальной конструкции. В эксперименте измерения должны проводиться акустическим волнографом установленном на дне так чтобы антенный блок ориентировался вертикально вверх на поверхность.

На фотографиях представлен акустический волнограф «Кальмар» закрепленный на подводной пирамиде подготовленной к погружению на дно Черного моря на глубину 28 м. Красный пьезо-излучатель ответственен за излучение и прием отраженного ультразвукового импульса, пьезо-излучатели молочного цвета предназначены для излучения и приема непрерывного излучения для измерения доплеровского спектра отраженного сигнала. Важными особенностями акустического волнографа «Кальмар» является работа на длине волны (8 мм) используемой в радиолокаторах Кадиапазона и приемо-передающая антенна с широкой диаграммой направленности (15°).



Подводный акустический волнограф «Кальмар»

Теоретические формулы для формы отраженного импульса, полученные в приближении касательной плоскости (Приближении Кирхгофа)

$$F(\tau) = F_1(\tau) + F_2(\tau) - F_3(\tau)$$

$$F_{1i} = 0,5 \cdot \sigma_{0i} \left(\exp \left[A_i H_0 \cdot c \tau_p \right] - 1 \right) \times$$

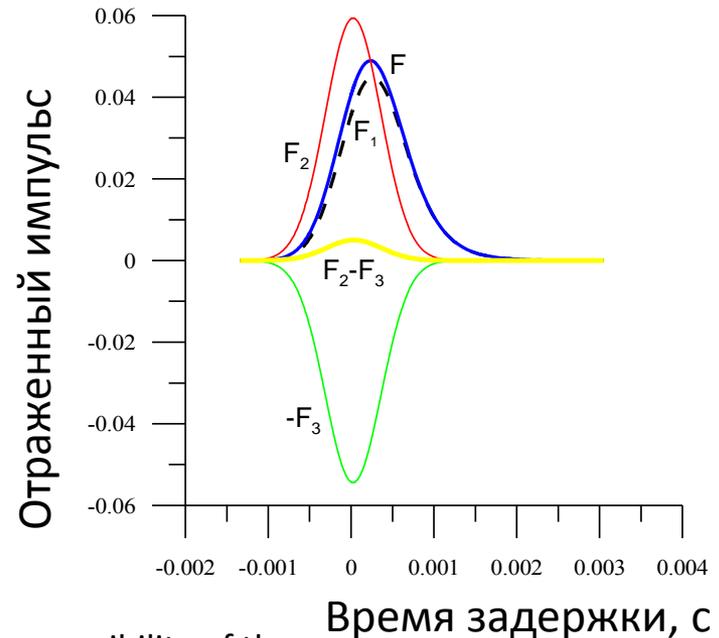
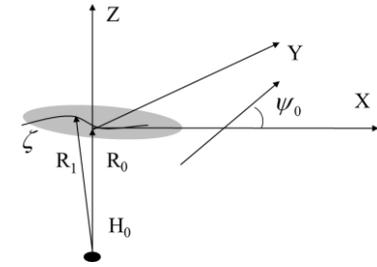
$$\times \exp \left[-A_i H_0 \cdot c \tau + 2\sigma_\zeta^2 A_i^2 H_0^2 \right] \times \left[1 - \Phi \left(A_i H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} + \frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right]$$

$$F_{2i} = 0,5 \cdot \sigma_{0i} \left(\Phi \left(\frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) + \Phi \left(\frac{\tau \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right)$$

$$F_{3x} = 0,5 \cdot \sigma_{0i} \exp \left[-A_i H_0 c \tau + 2\sigma_\zeta^2 A_i^2 H_0^2 \right] \times$$

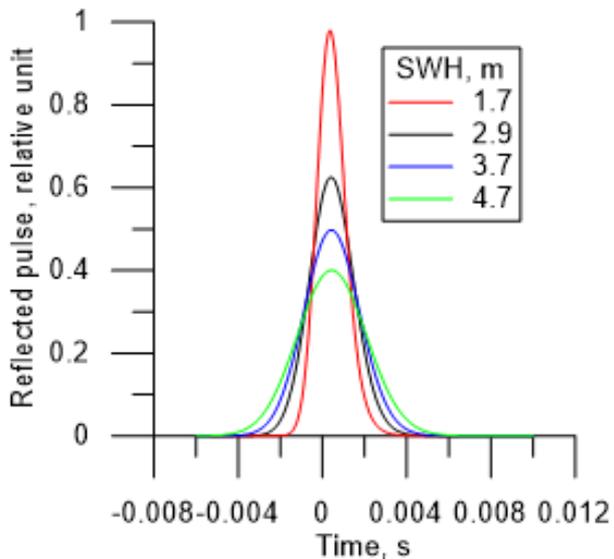
$$\times \left(\Phi \left(A_i H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} + \frac{(\tau_p - \tau) \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) - \Phi \left(A_i H_0 \sqrt{2\sigma_\zeta^2} - \frac{\tau \cdot c}{2\sqrt{2\sigma_\zeta^2}} \right) \right)$$

$$\sigma_{0i} = \frac{2,76 \cdot |V_{eff}|^2 \pi}{\pi \cdot H_0^2 \delta^2 \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2} A_i}$$

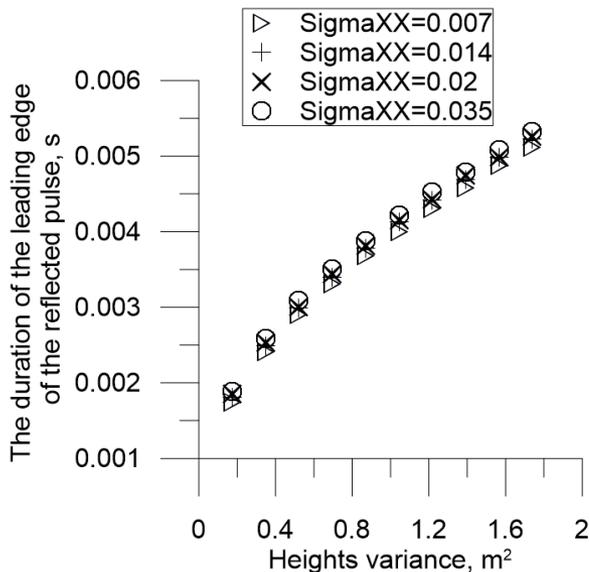


V. Karaev, E. Meshkov and Y. Titchenko, "Sub-satellite measurements: New possibility of the advanced underwater acoustic wave gauge," 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC, 2014, pp. 706-709. doi: 10.1109/IGARSS.2014.6946521

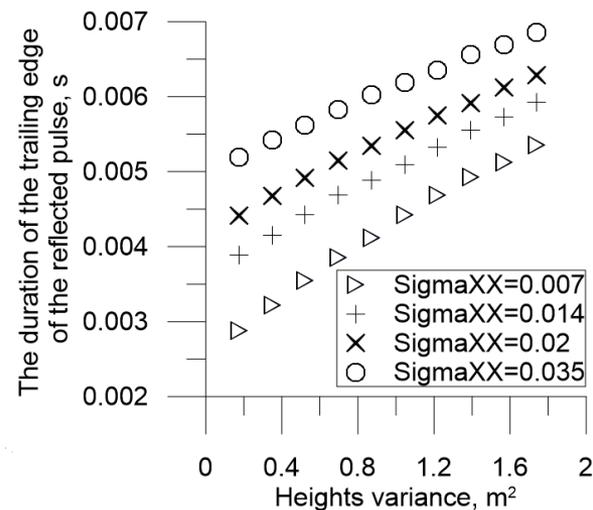
V.Karaev, E.Meshkov, Yu.Titchenko, «Underwater acoustic altimeter», Radiophysics and Quantum Electronics, v. 57, N 7, 2014, pp. 488-497.

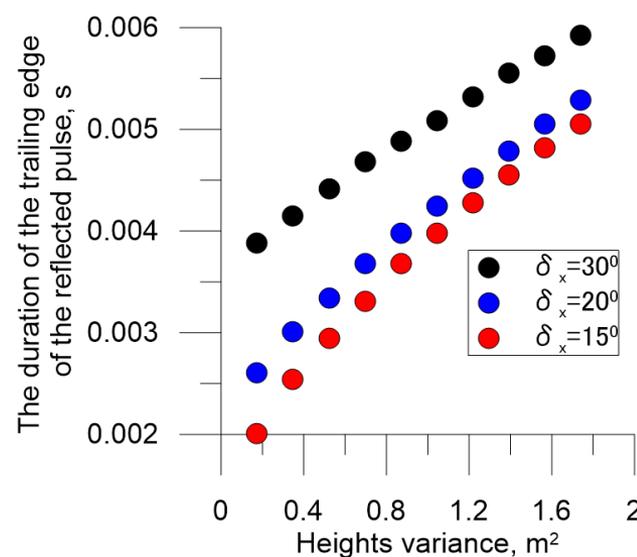
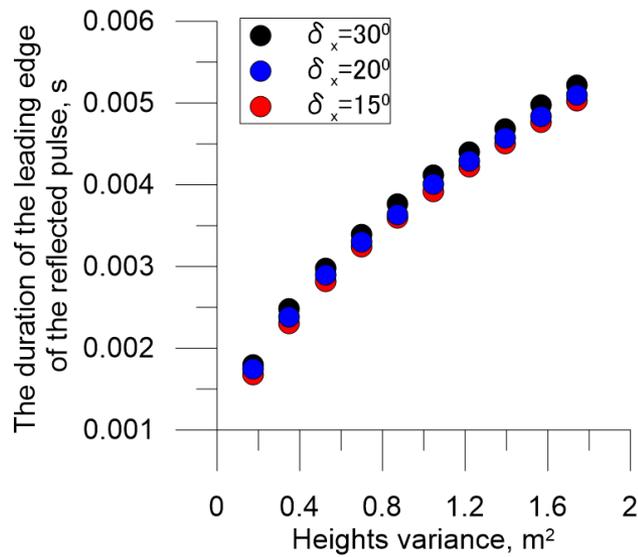


Зависимость формы отраженного импульса от высоты значительного волнения. Глубина погружения 50 м, эквивалентная дисперсия наклонов 0.014, ширина диаграммы направленности антенны 30 °.

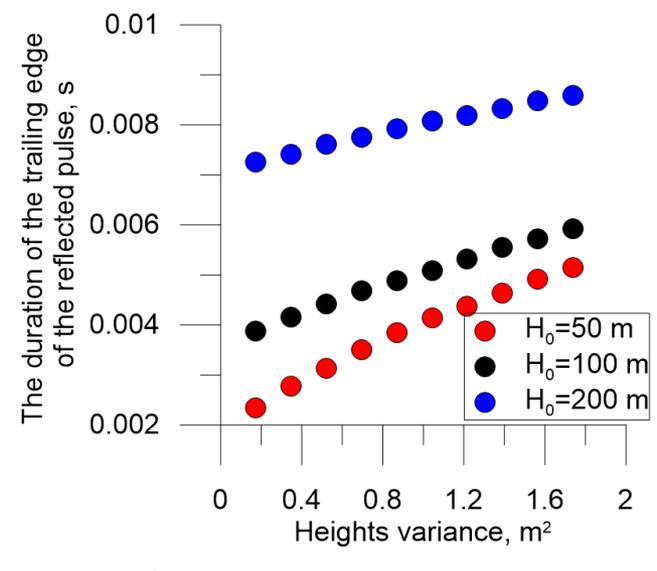
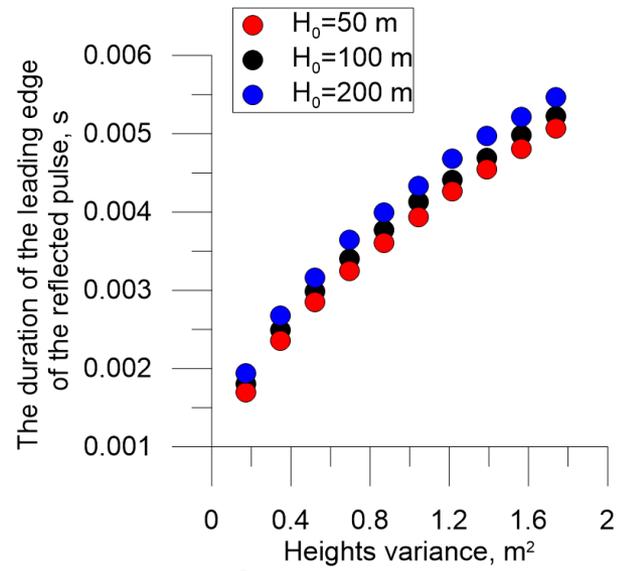


Зависимости переднего и заднего фронта отраженного импульса от дисперсии высот для различных дисперсий наклонов: 0.007, 0.014, 0.02, 0.035. Глубина погружения 100 м, антенна 30 °.



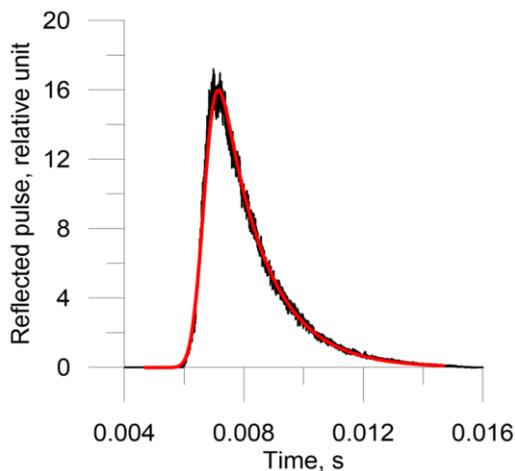


Зависимости переднего и заднего фронта отраженного импульса от дисперсии высот для различных антенн. Глубина погружения 100 м, дисперсия наклонов 0.014

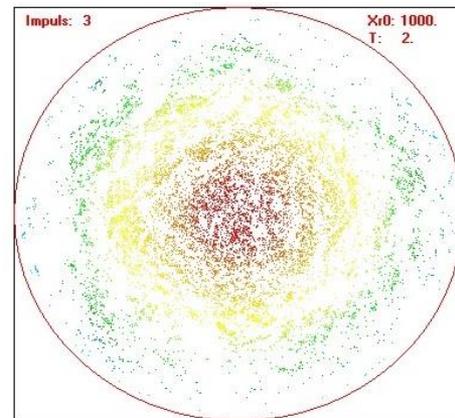
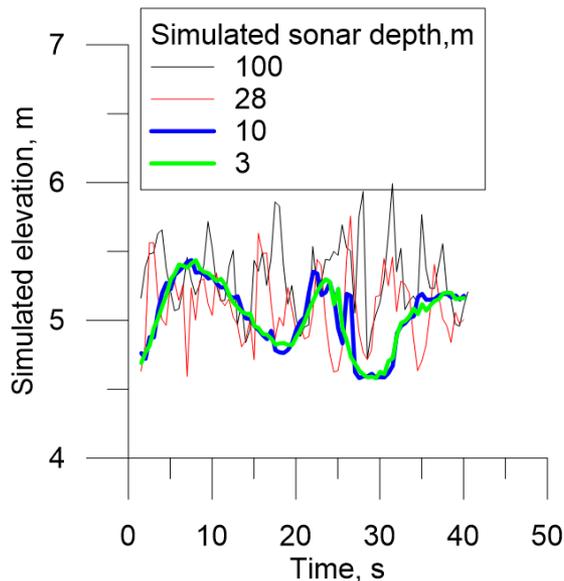
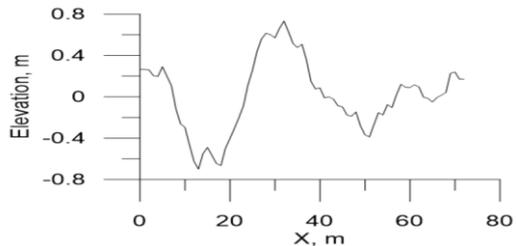
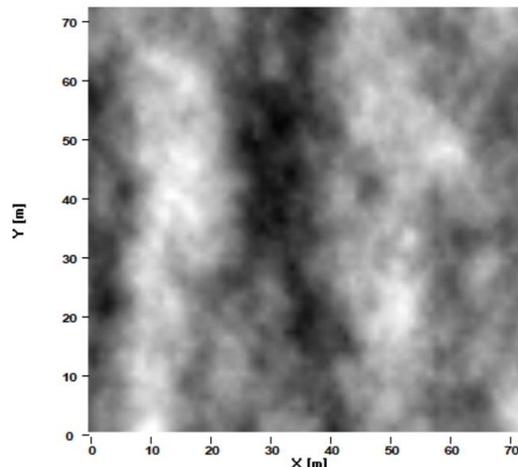


Зависимости переднего и заднего фронта отраженного импульса от дисперсии высот для различных глубин погружения. Дисперсия наклонов 0.014, антенна 30°

Для тестирования теоретической модели отраженного импульса и методов решения обратной задачи, был разработан комплекс компьютерных программ для численной симуляции отражения волн различной природы от морской поверхности сформированной при заданном ветре и ветровом разгоне. В рамках численного моделирования морская поверхность в различных состояниях (ветровые волны, зыбь и смешанное волнение) моделируется по спектру волнения.



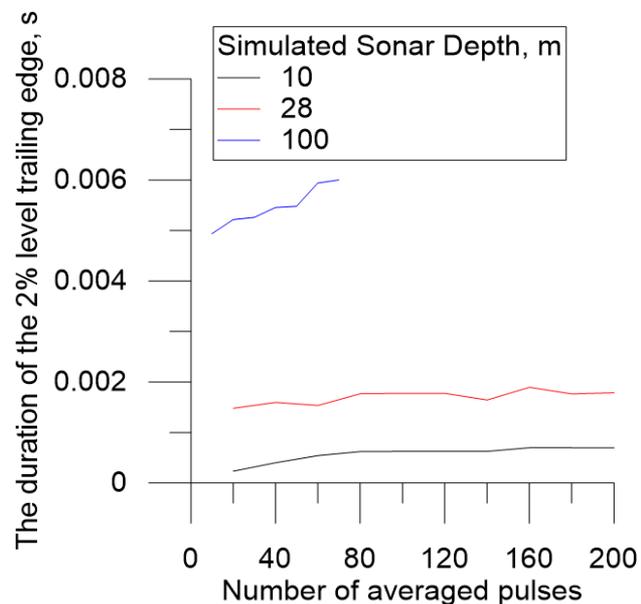
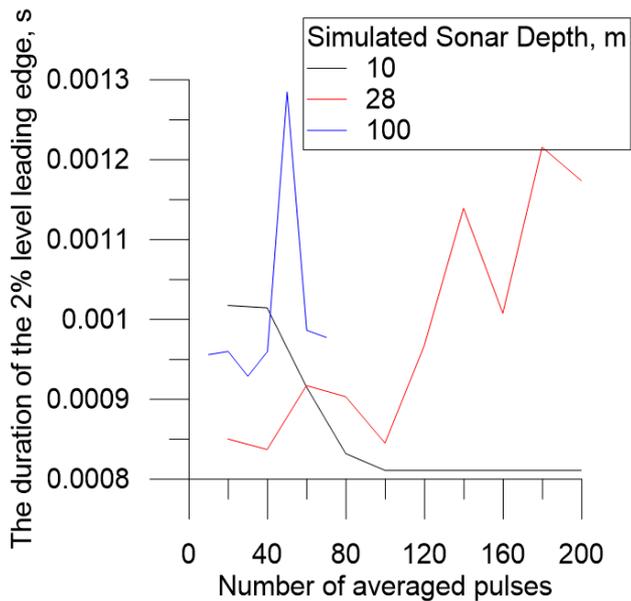
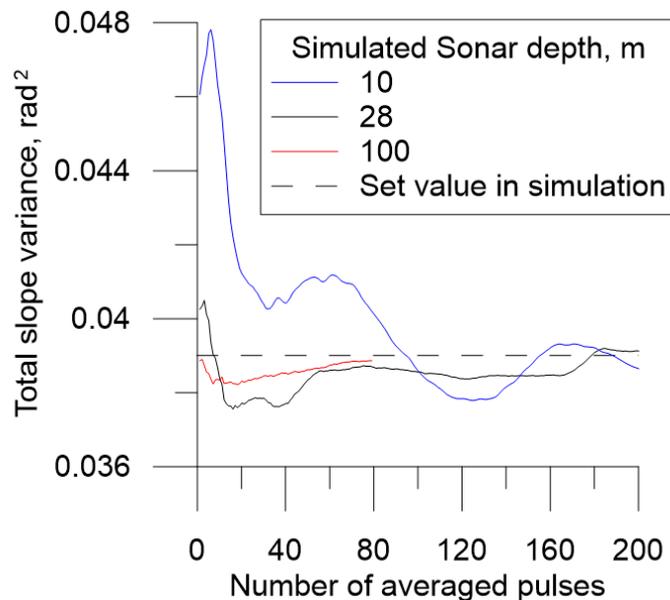
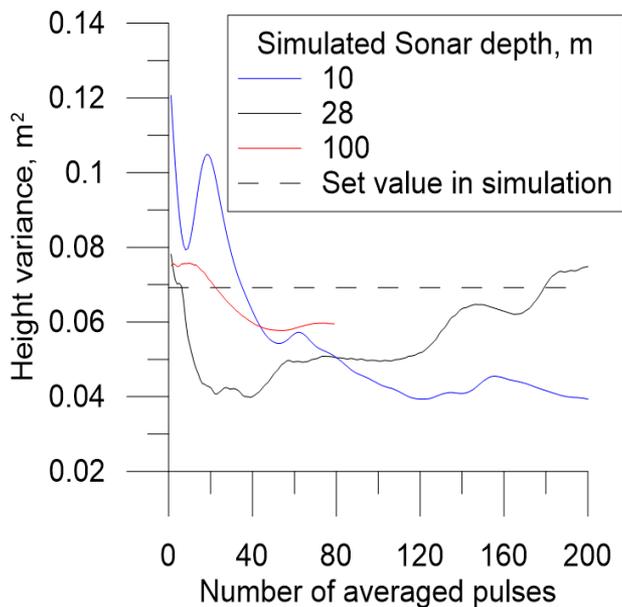
Накопление 79 смоделированных отражений (черная) и импульс полученный по формуле с подобранными параметрами волн (красная).



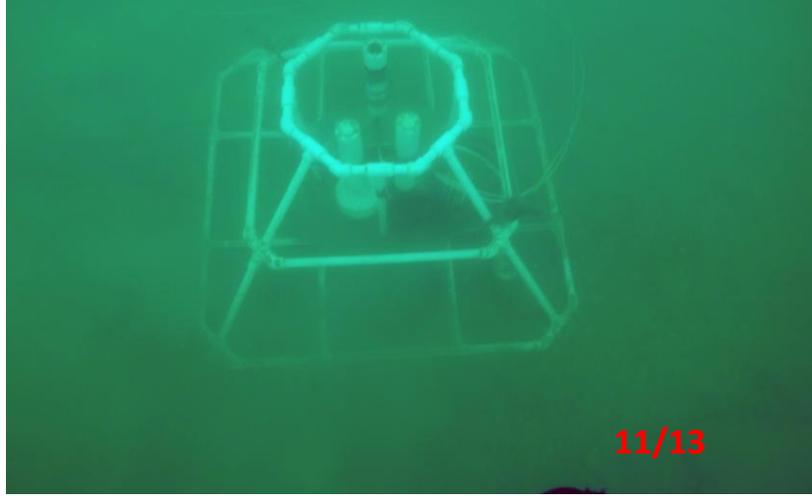
Пример визуализации поверхности и отражающих точек в программе симуляции эксперимента. Каждая точка на правом рисунке показывает отражение с учетом антенны.

Данный график иллюстрирует работу традиционного алгоритма для определения высот вол по данным акустического гидролокатора. По графику видно что данный подход чувствителен к глубине погружения.

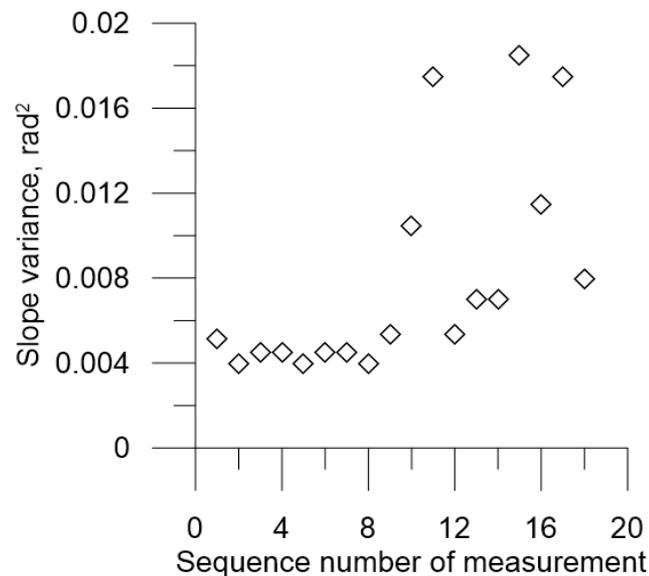
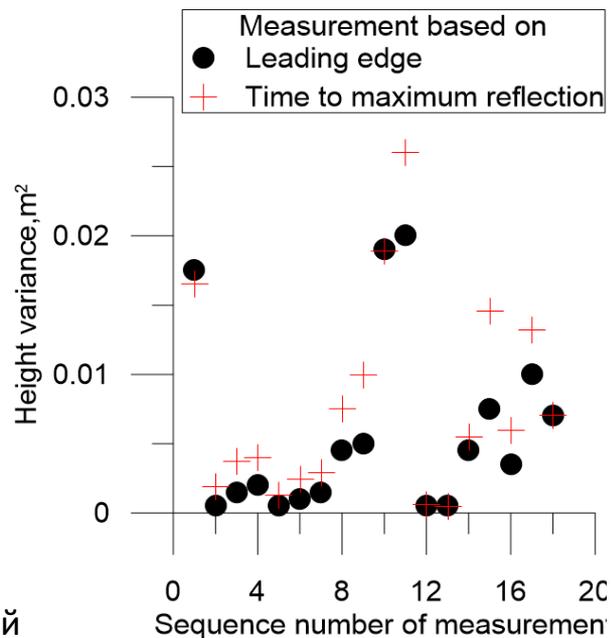
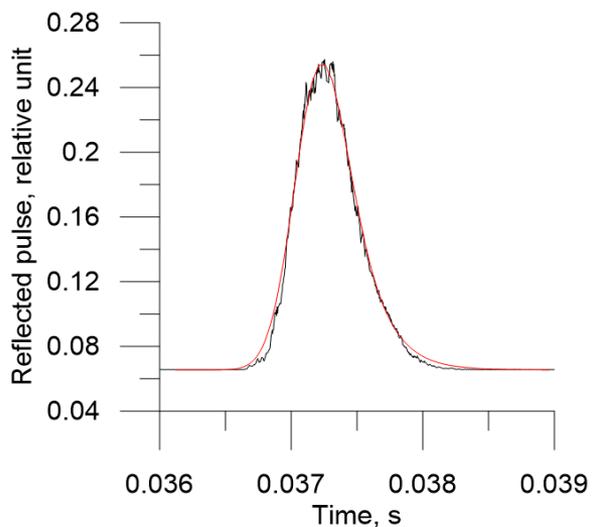
Накопление отражений полученных в эксперименте



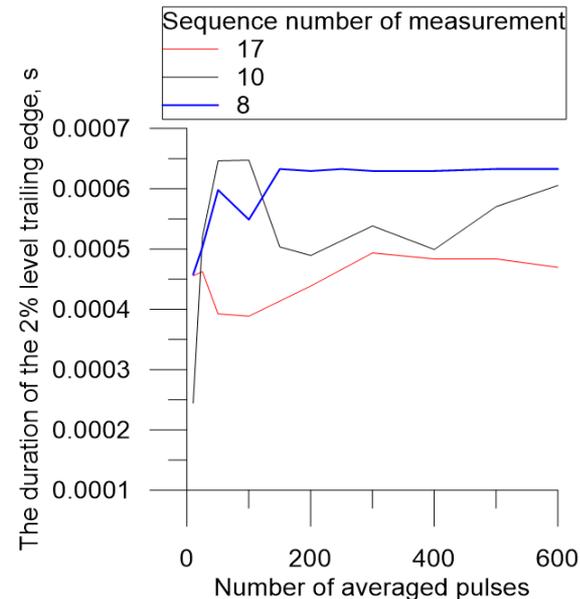
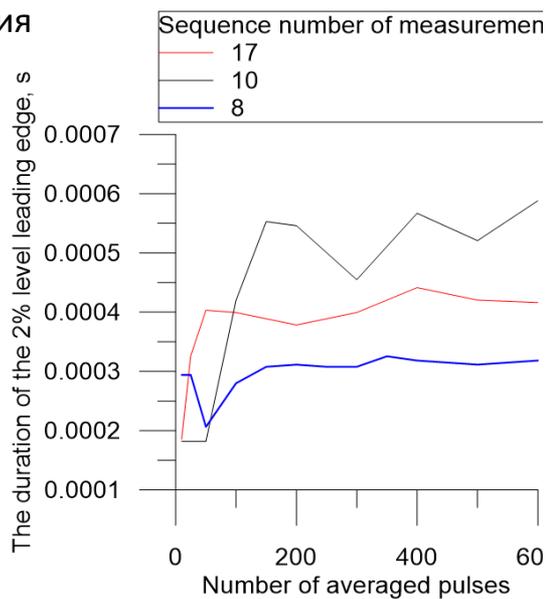
Измерения подводного акустического волнографа «Кальмар» с 16 августа по 10 сентября 2018 года



Измерения подводного акустического волнографа «Кальмар»



Сравнение измеренного за 5 минут отраженного импульса с теоретической формулой с использованием подобранных параметров волнения



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высота волн и дисперсия наклонов могут быть восстановлены по форме отраженного импульса.

Длительный эксперимент был проведен для исследования влияния параметров морской поверхности на форму отраженного импульса.

Подводный акустический волнограф «Кальмар» сейчас работает круглогодично в Черном море и его данные доступны по запросу авторам презентации.