



МИРЭА-Российский технологический университет

## Определение уклонов морской поверхности методом лазерных «юбок»

**Стерлядкин В.В<sup>1,2</sup>., Лихачева М.В<sup>1</sup>., Рубан О.А<sup>1</sup>., Алиев Г.М<sup>1</sup>.**

**МИРЭА – Российский технологический университет  
Институт космических исследований, ИКИ РАН**



Дистанционное  
зондирование  
морской  
поверхности



Структура  
морской  
поверхности



Метео-  
параметры  
атмосферы и  
океана

Традиционно при радиолокационном и радиометрическом зондировании морской поверхности статистически связывают принимаемые сигналы со скоростью ветра. Но сигналы формирует не ветер, а морская поверхность, и при одинаковых параметрах ветра структура морской поверхности может быть совершенно разной.

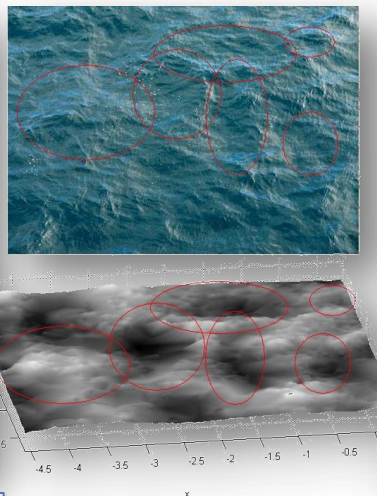
## Методы измерения ветрового волнения



Волномерные  
рейки



Струнный  
волнограф



Стереосъемка



Волнографические  
буи



Акустический  
волнограф

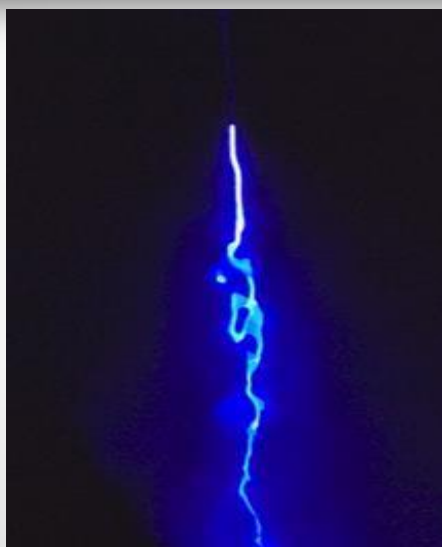
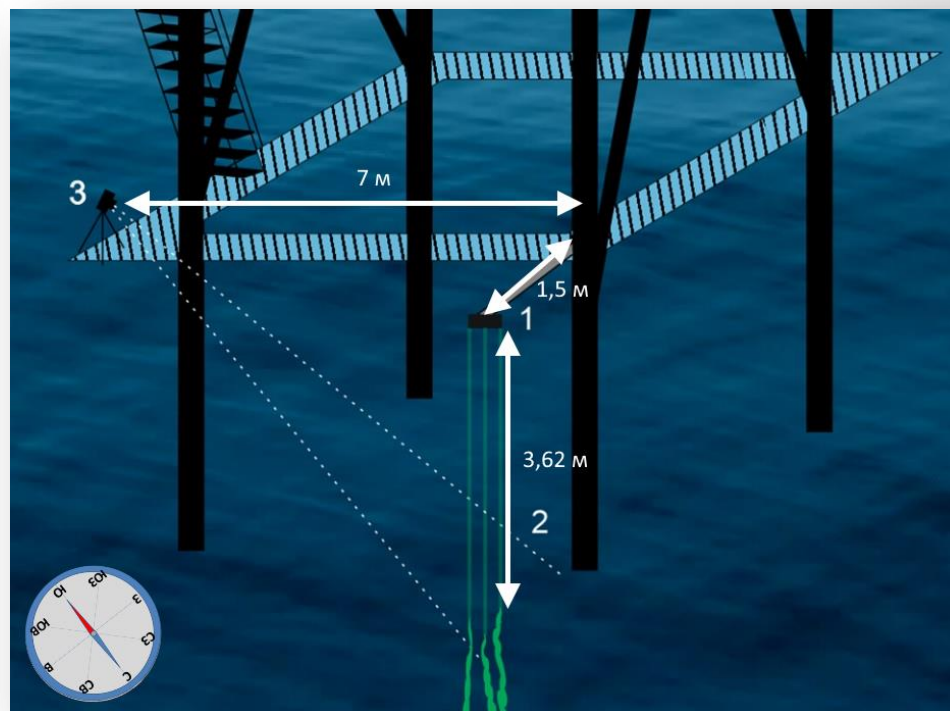


# Морская океанографическая платформа в поселке Кацивели, Крым





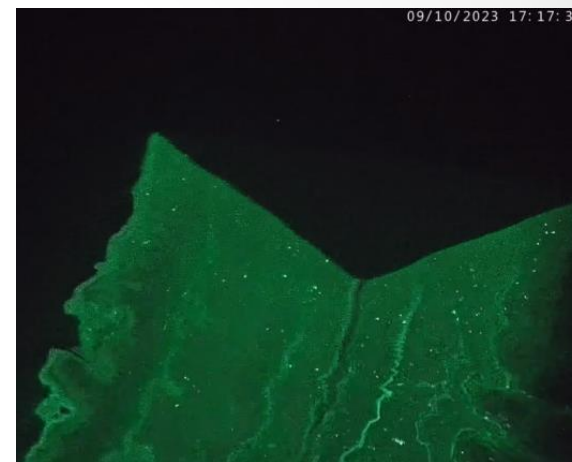
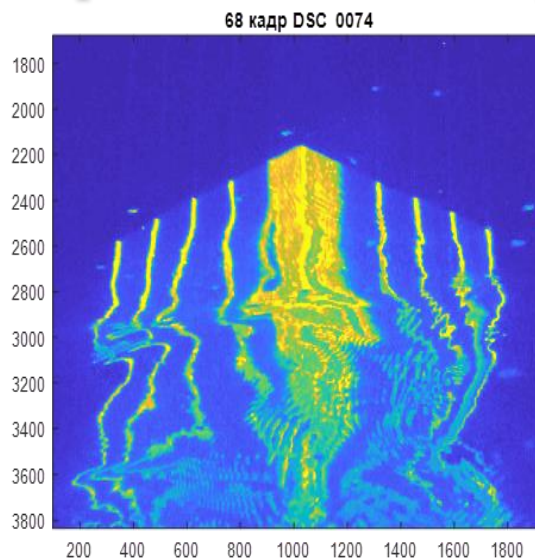
# Лазерный волнограф



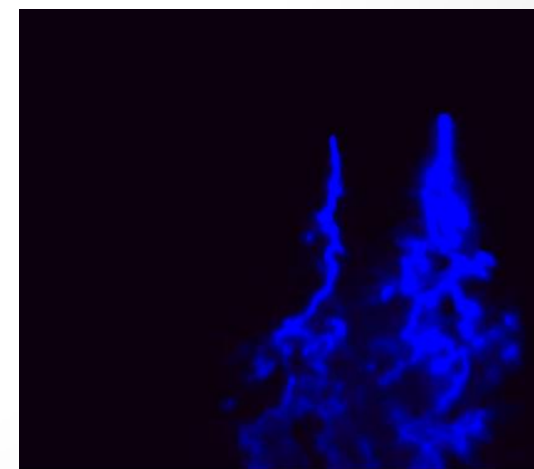
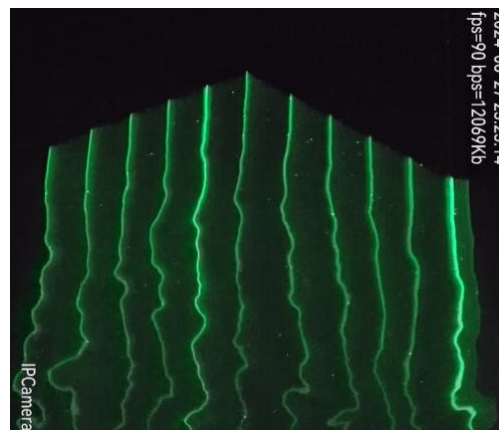
Лазерные лучи в воздухе почти не рассеиваются, а в морской воде рассеяние формирует на видеокадрах извилистые изображения преломленных лучей. Верхняя граница каждого луча соответствует границе раздела вода-воздух.



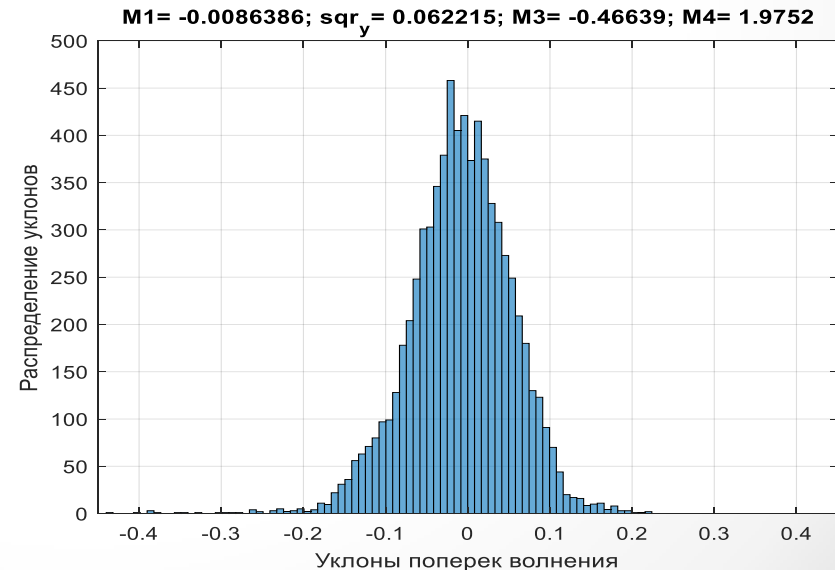
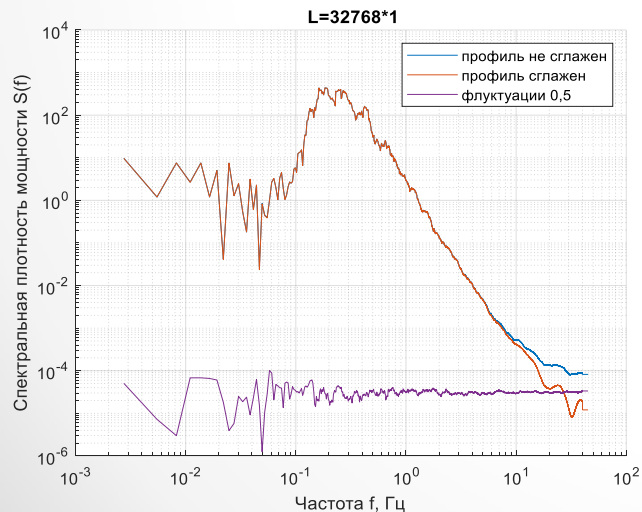
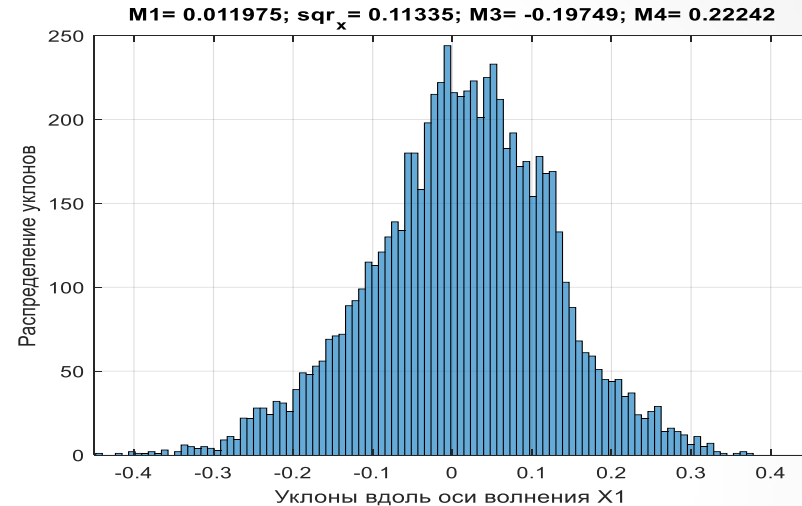
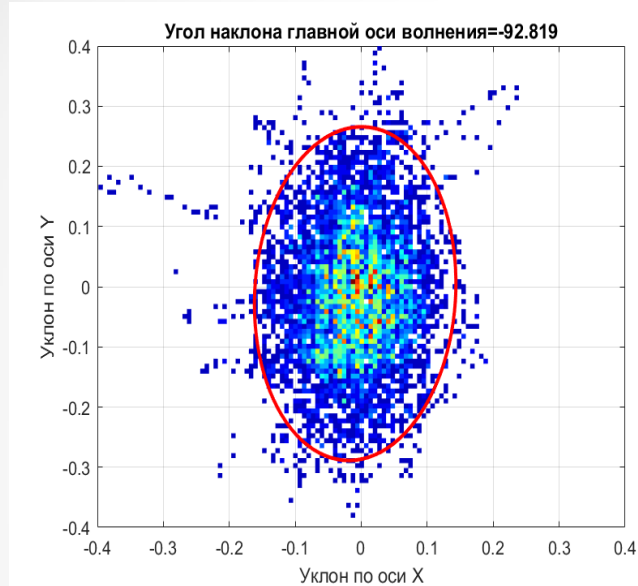
# Типичные видеокадры, которые регистрируются при разных режимах сканирования



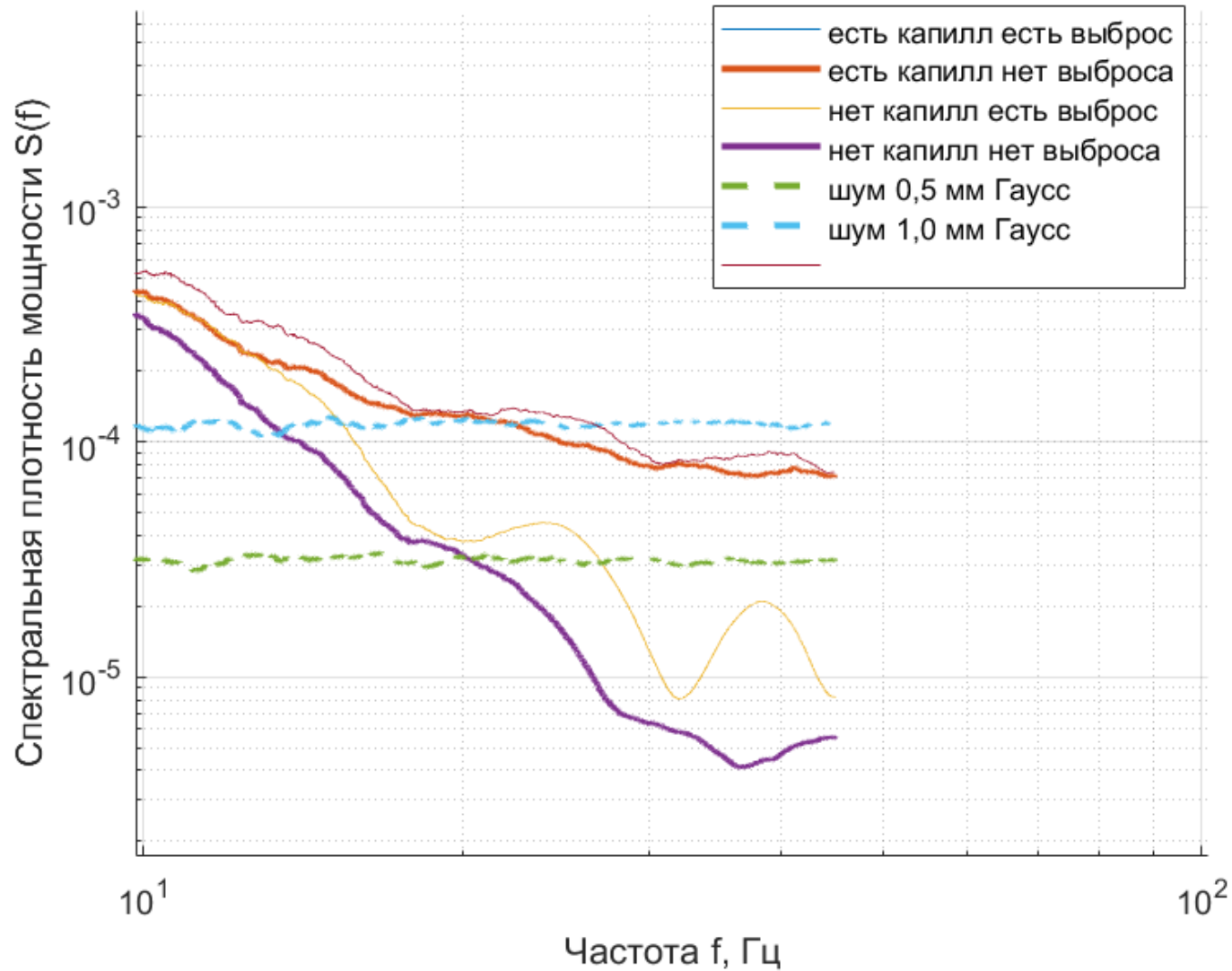
Первоначально измерялись либо возвышение морской поверхности в отдельных точках, либо профиль поверхности вдоль заданной траектории сканирования.



# Ряды возвышений позволяют измерять двумерные уклоны на различных масштабах



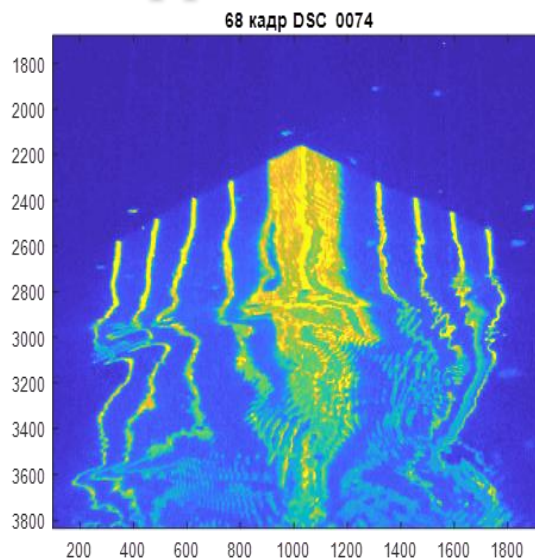
$L=32768 \times 1$



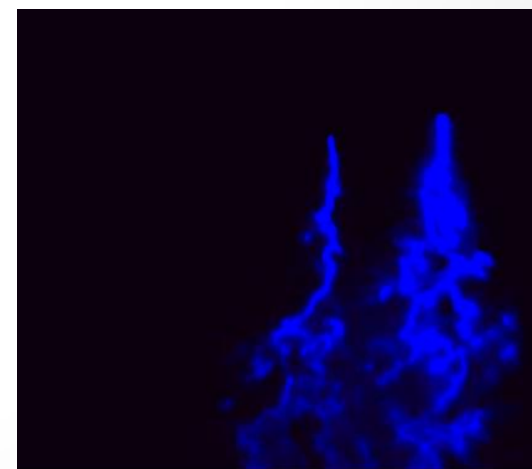
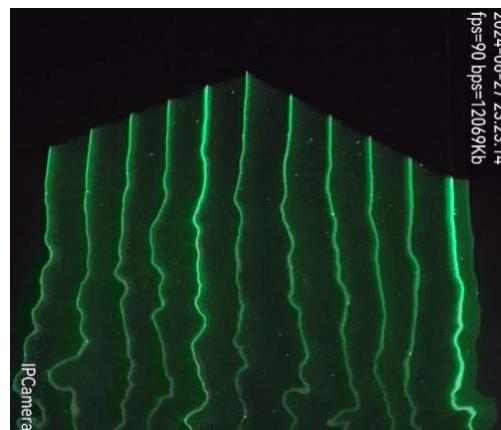




## Возникла идея расшифровать искажения формы лучей



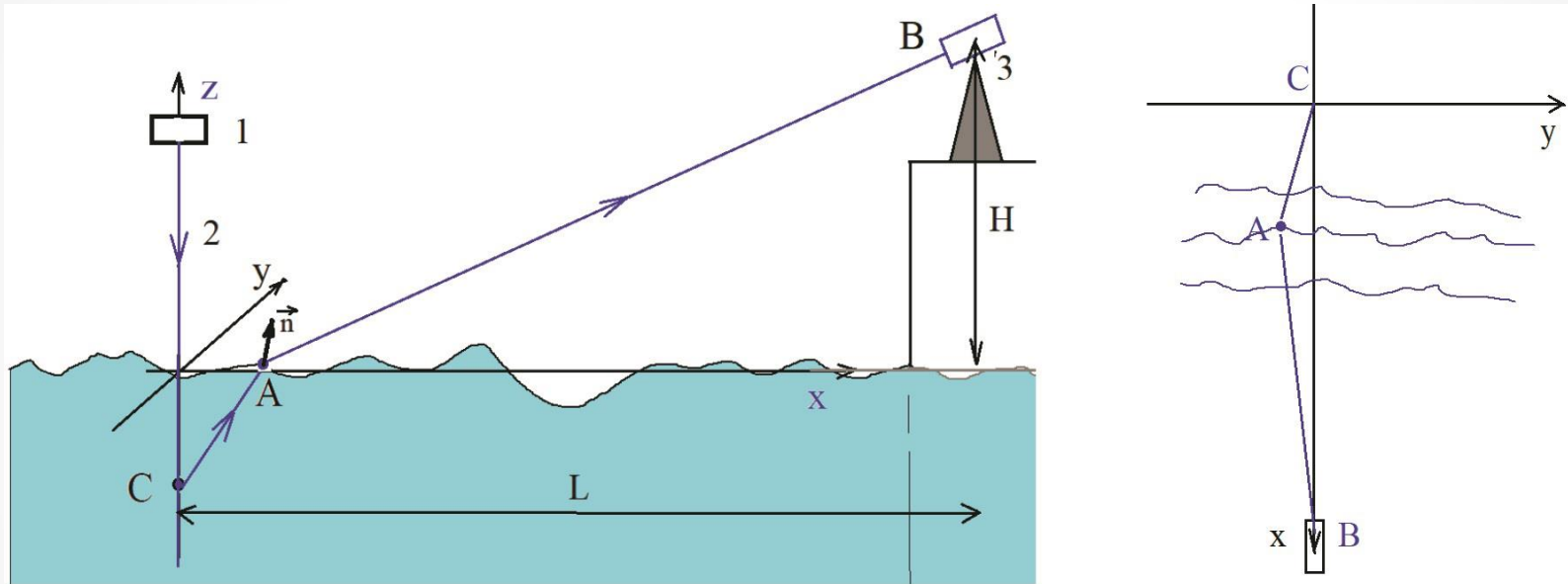
Искажения обусловлены преломлением изображения прямого луча на взволнованной поверхности.







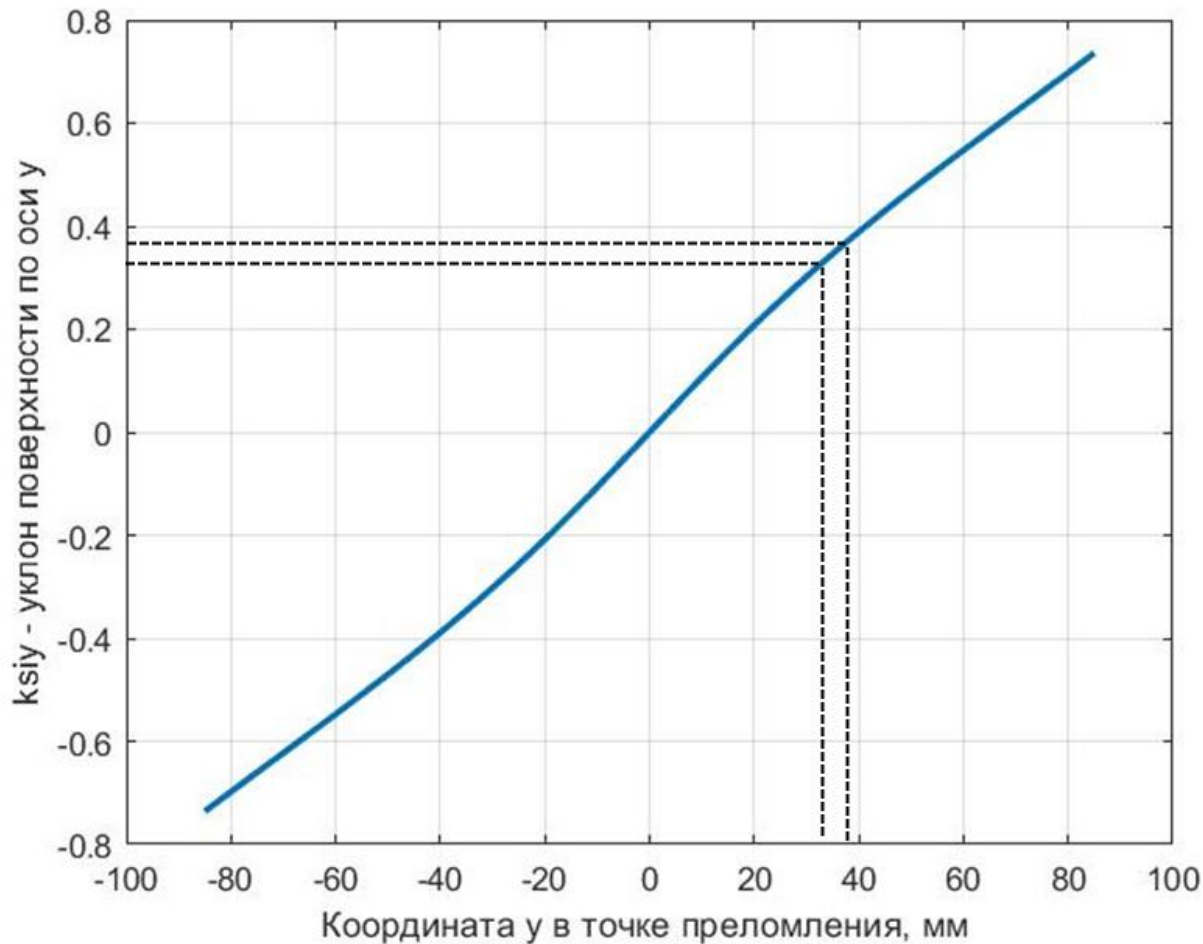
# Была решена обратная задача поиска уклонов по отклонению луча



Геометрия измерений: 1 — лазер, 2 — луч, падающий на поверхность, 3 — видеокамера,  $\mathbf{n}_1$  — нормаль к плоскости падения ABC,  $\mathbf{n}_2$  — нормаль к морской поверхности в точке A, вид сверху. Геометрическая оптика.

$$(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = 0 ; \quad n \sin \alpha = \sin \beta$$

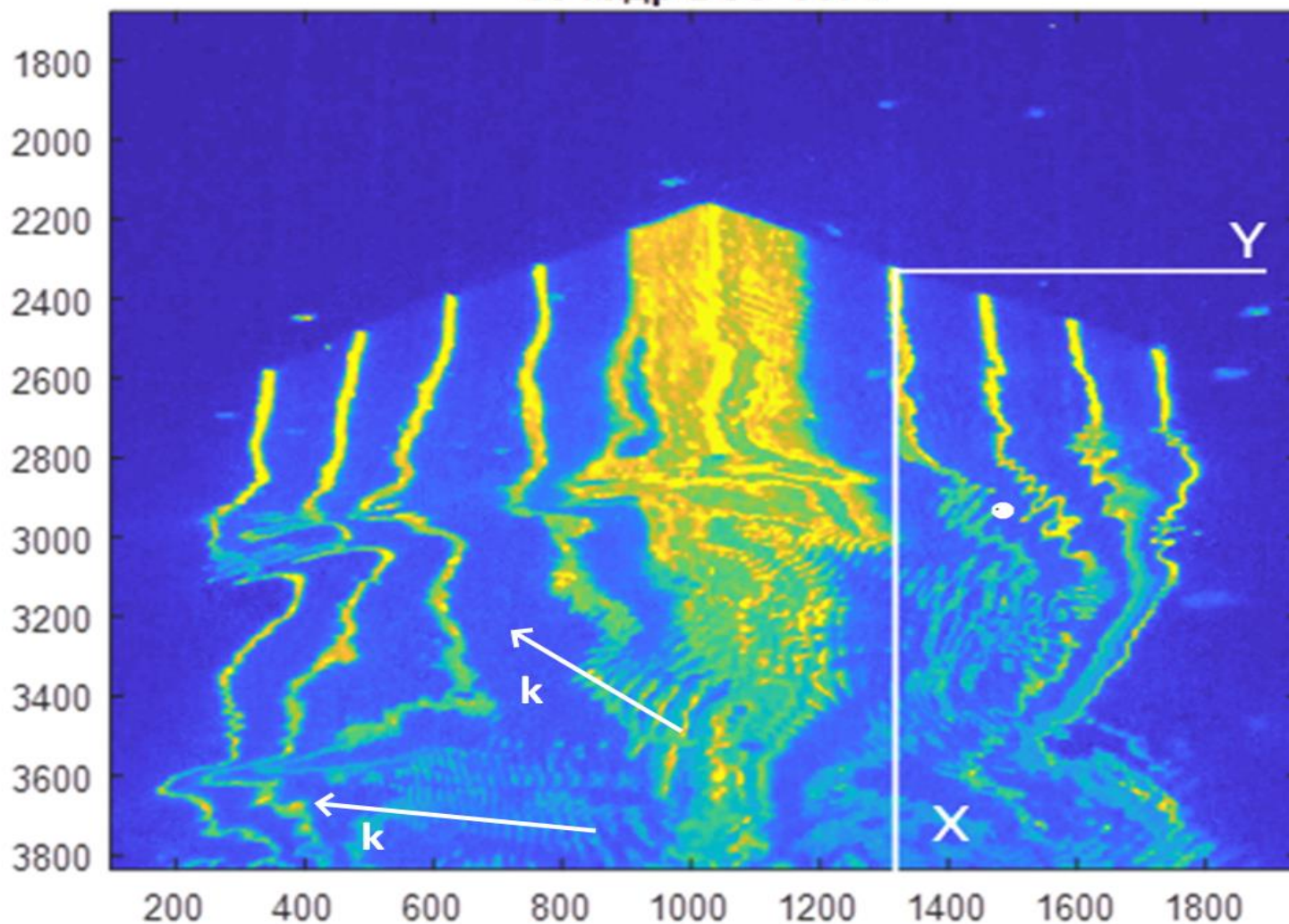
Справа показан вид сверху. Чем больше отклонение светящейся точки по координате Y, тем больше уклон поверхности в этой точке.



Зависимость уклона морской поверхности  $\xi_y(u)$  от координаты  $u$  светящейся точки для описанной ранее геометрии наблюдений на расстоянии  $x=160$  мм от точки падения луча на поверхность. Уклон  $\xi_x$  принят равным нулю.

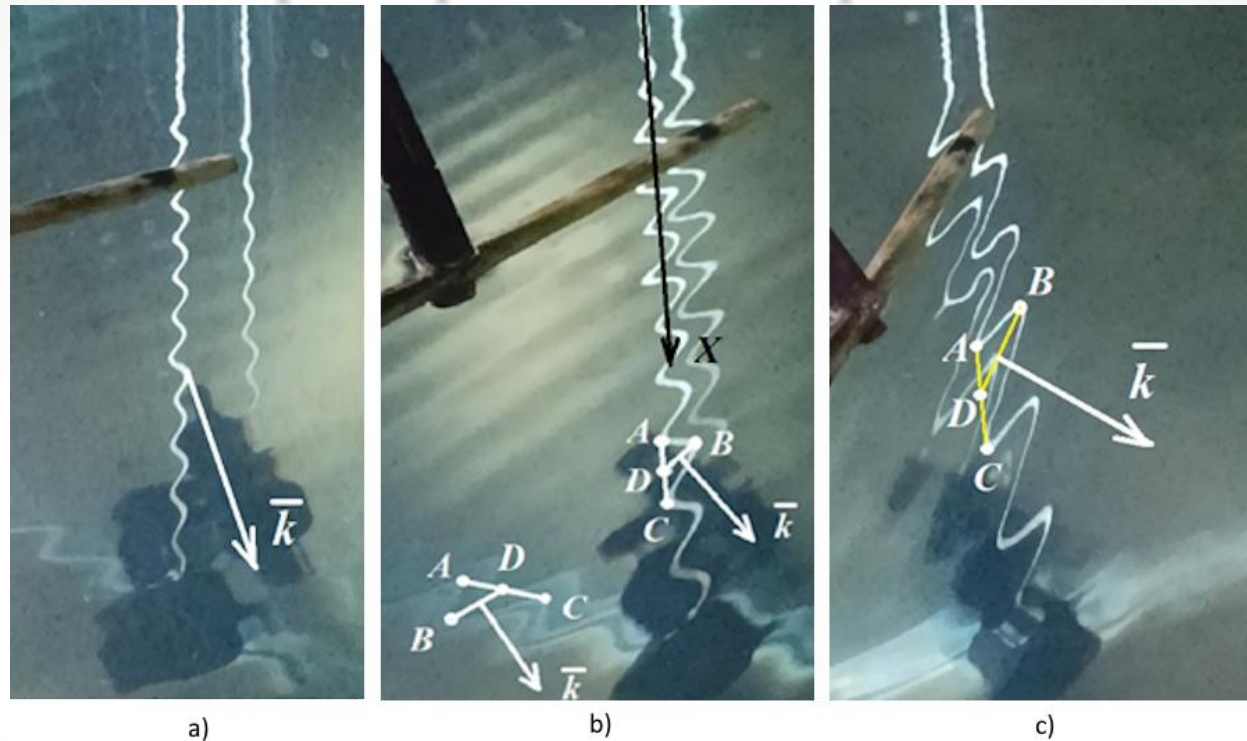


68 кадр DSC 0074



Расчеты показали, что чем больше  $Y$ -отклонение изображения луча от оси  $X$ , тем больше уклон  $\xi_y$ . Уклоны вдоль оси  $X$  слабо влияют на отклонение по оси  $Y$ .

# Лабораторный эксперимент

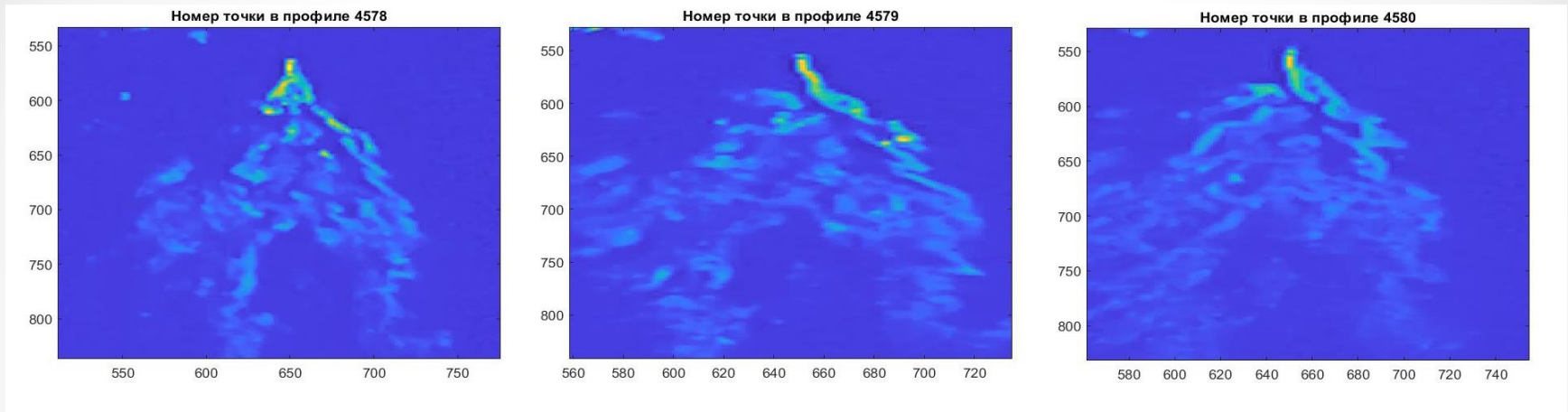


Изображение прямой белой нити (и ее отражения от стенки аквариума) прошедшее через капиллярную волну на поверхности зависит от угла  $\theta$  между волновым вектором  $\vec{k}$  и осью видеокамеры X: а)  $\theta = 20^\circ$ ; б)  $\theta = 40^\circ$ ; в)  $\theta = 55^\circ$ . Внизу видно изображение светлой нижней горизонтальной грани аквариума





## Метод лазерных «юбок»



На рисунке представлены три последовательных видеокadra, полученных при частоте съемки 90 кадров в секунду. Выдержка составляла 1/100 с, скорость ветра  $V_{\text{в}} = 8$  м/с, при этом морская поверхность была частично покрыта капиллярной рябью.

$$2\pi\nu\tau > 1 \text{ рад}$$

где  $\nu = 16 \text{ Гц}$ ,  $\tau = 0,01 \text{ с}$



## Связь между распределением яркости «юбки» и уклонами поверхности.

Чем выше яркость свечения «юбки» в некоторой точке с заданной координатой, тем большую долю времени в этой точке был уклон, который соответствует условию свечения.

$$I(x_0, y) \cdot dy \sim P(\xi_y) d\xi_y$$

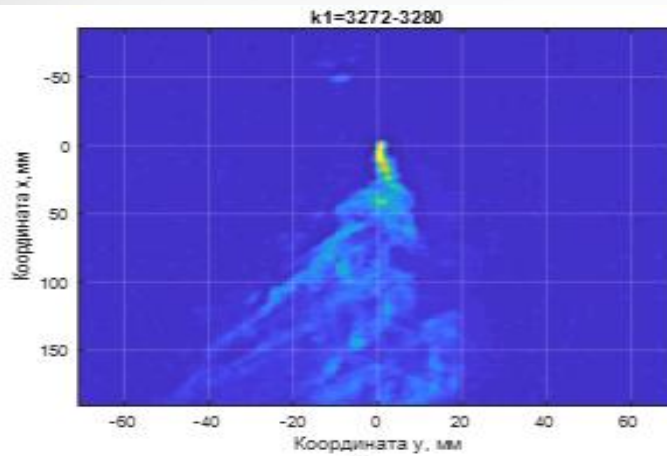
Световая энергия  $I(x_0, y) \cdot dy$ , приходящаяся на интервал  $dy$  пропорциональна вероятности появления соответствующих уклонов  $P(\xi_y) d\xi_y$ , где  $P(\xi_y)$  – плотность вероятности уклонов

$$P(\xi_y) = A \cdot I(x_0, y) \cdot \frac{dy}{d\xi_y}$$

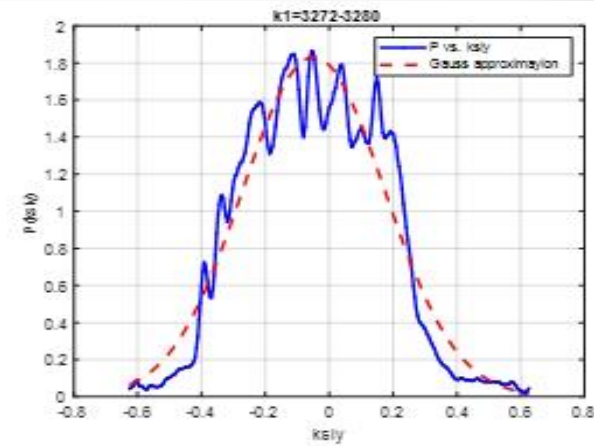
Коэффициент  $A$  определяется из условия равенства единице полной вероятности уклонов.

$$\int P(\xi_y) d\xi_y = 1$$

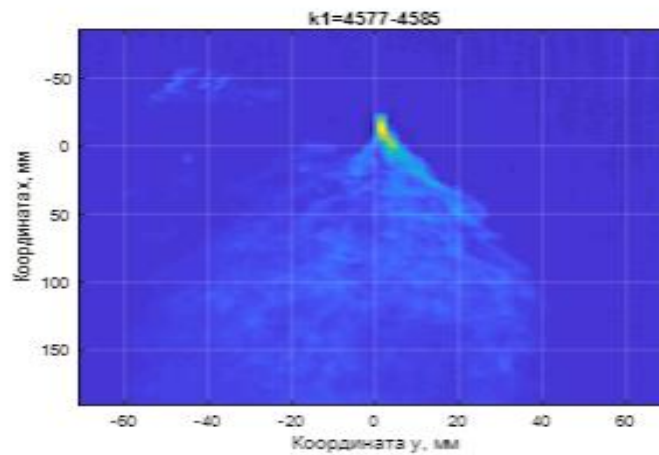
На основе измеренной яркости  $I(x_0, y)$  и предыдущего графика получаем плотность распределения уклонов для каждого изображения



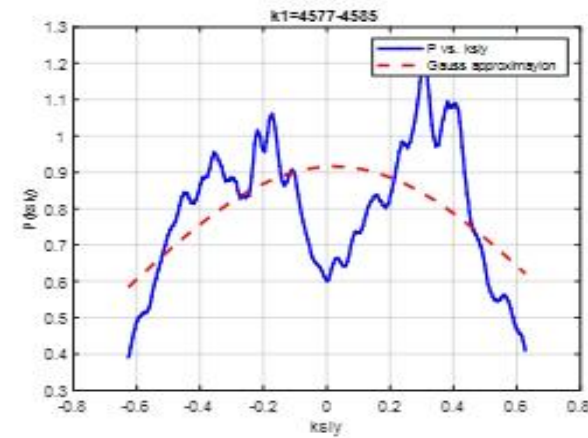
a)



b)



c)

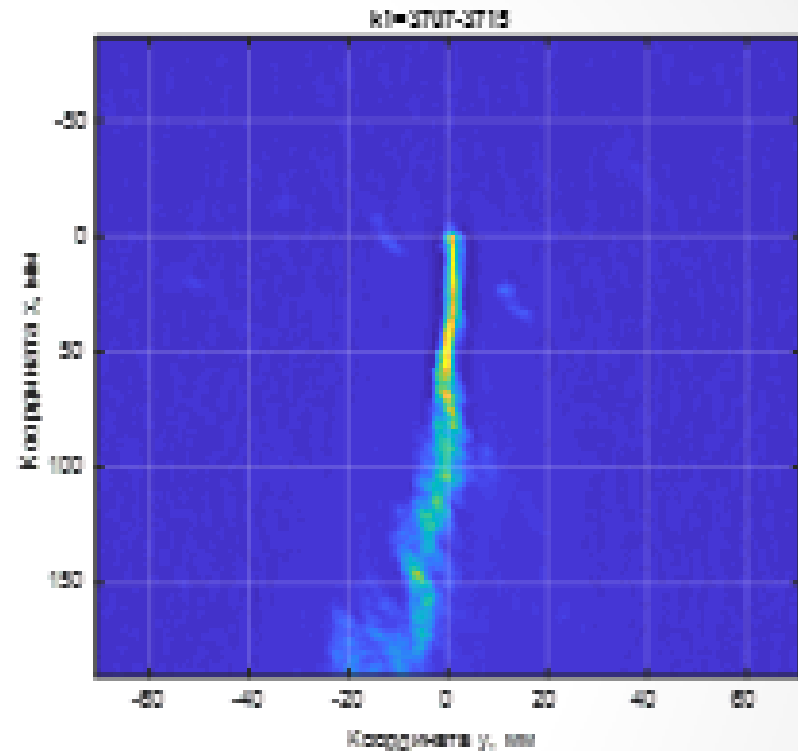
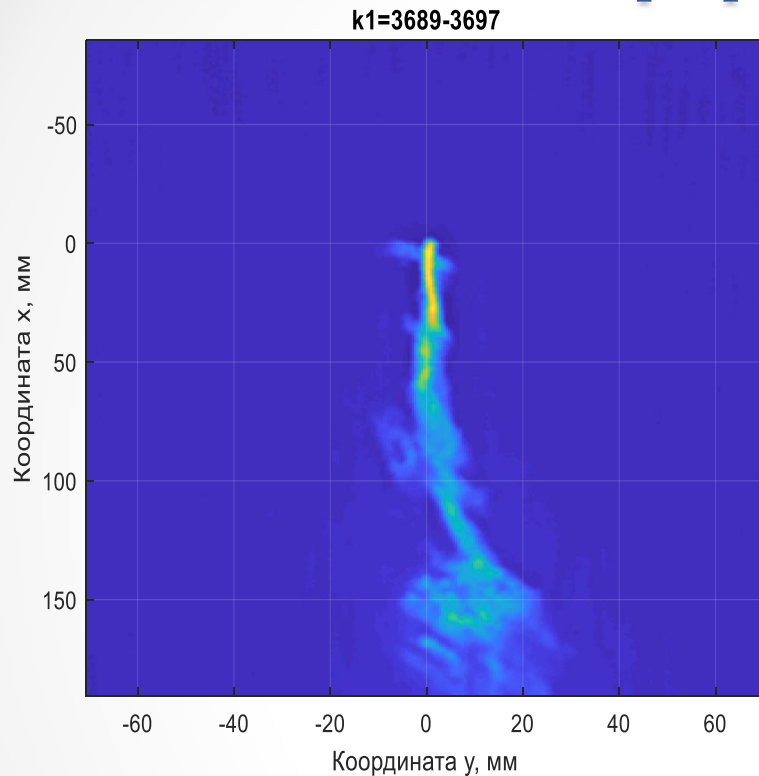


d)

Примеры световых юбок и соответствующие распределения уклонов. При накоплении 6-9 кадров фаза капиллярных волн успевает измениться на  $2\pi$  и они формируют лазерную юбку более равномерной засветкой. Капиллярные уклоны достигают  $\pm 0,6$ , что соответствует  $\pm 31^\circ$ .



# Плавная гравитационная волна приводит к смещению центра распределения

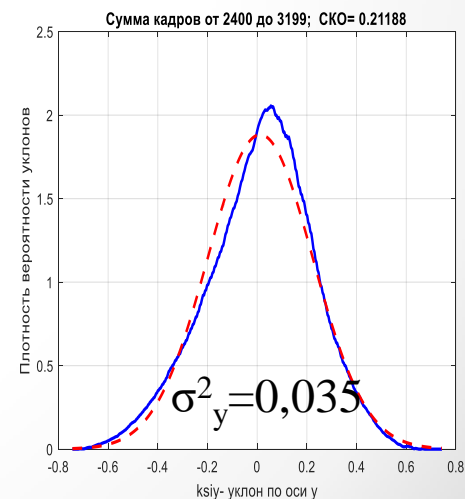
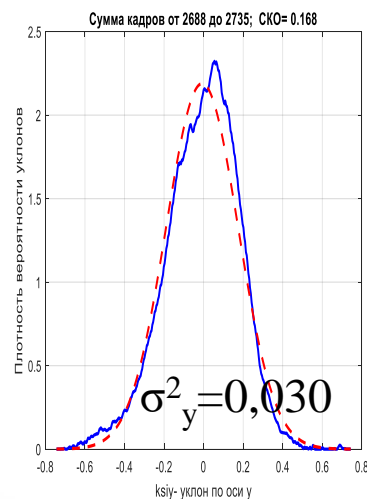
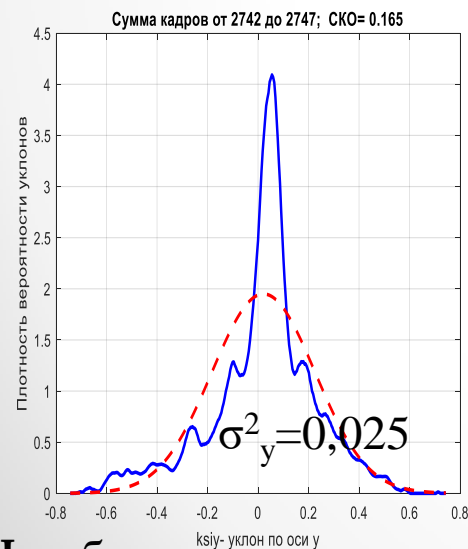
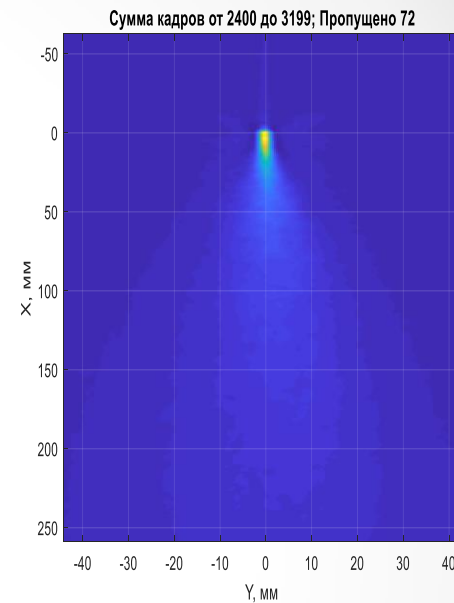
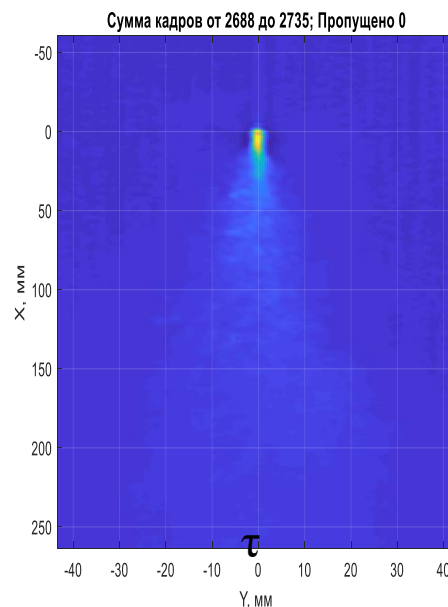
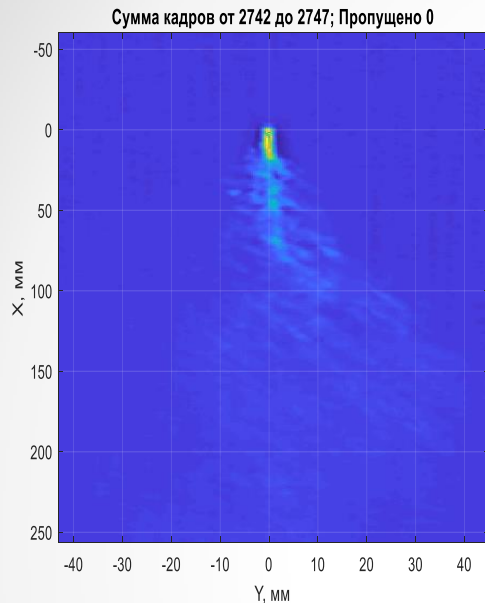


Накопление 9 кадров происходит за 0,1 секунды. За это время уклон гравитационной волны не изменяется, что приводит к смещению центра распределения.

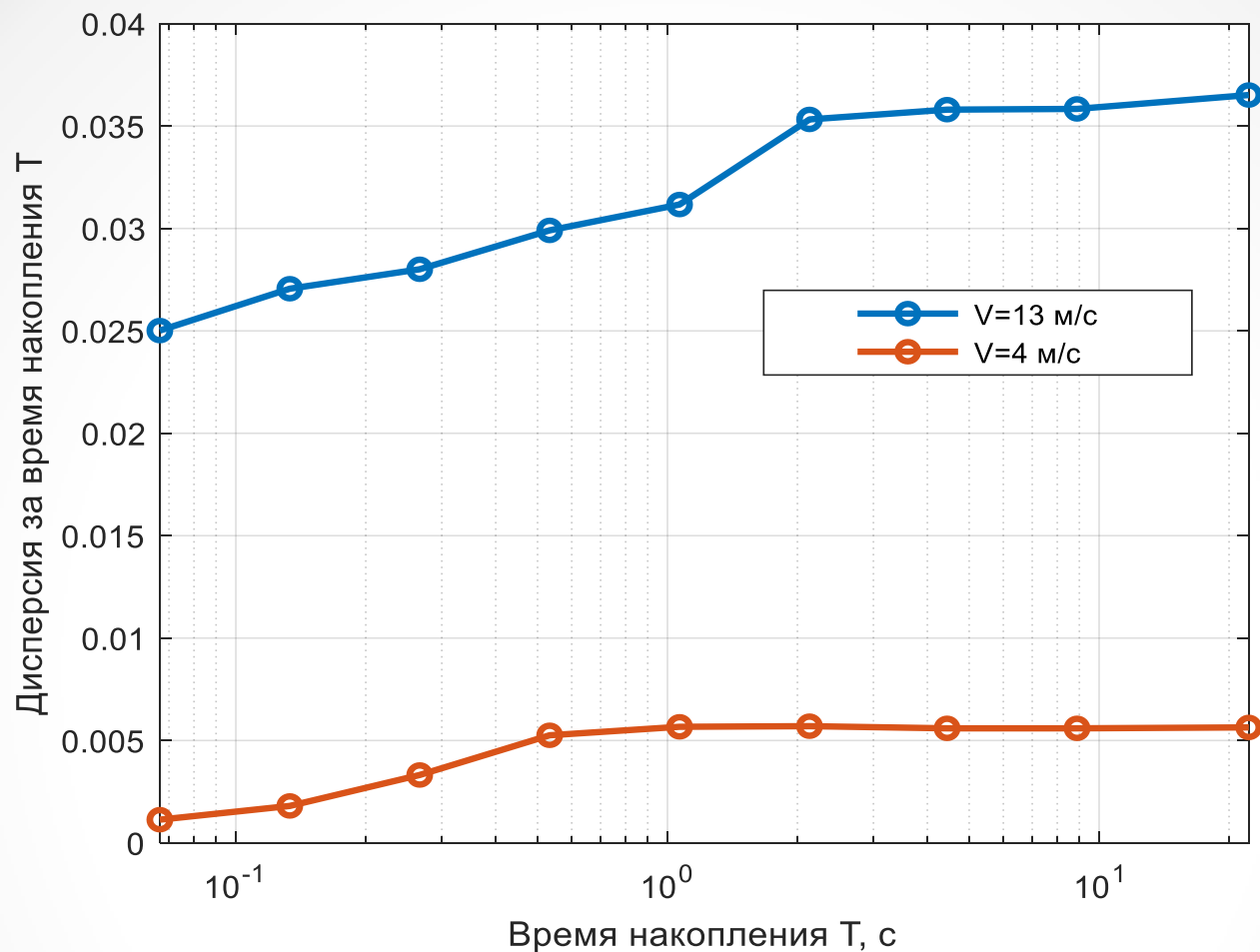
Чем больше время накопления, тем более длинные волны формируют ширину юбки.



# Измерение дисперсии уклонов различных частотных КОМПОНЕНТ



Чем больше время накопления, тем более длинные волны добавляются к лазерной «юбке» и дисперсия растет.



Рост  $\sigma_y^2$  - дисперсии уклонов вдоль оси Y по мере увеличения времени T накопления кадров в лазерной «юбке».

04.10.2025 в 00:07 мск

04.10.2025 в 23:37 мск



## Сравнение полученных данных с моделью Кокса-Манка

Метеорологическая ситуация во время измерений была такова, что азимут ветра составлял  $60^0 \pm 5^0$ , что с учетом ориентации видеокамеры соответствовало направлению по оси Y.

Скорость ветра 13 м/с измерялась анемометром на высоте 21 м.  
На высоте 10 м она оценивается в 12 м/с.

По формуле Кокса-Манка:

$$\sigma_u^2 = 0,000 + 3,16 \cdot 10^{-3} U \pm 0,004$$

где  $\sigma_u^2$  – дисперсия уклонов вдоль направления ветра, U – скорость ветра на высоте 10 м.

*По формуле Кокса-Манка дисперсия составляет*

$$\sigma_u^2 = 0,038 \pm 0,004$$

По данным эксперимента получено

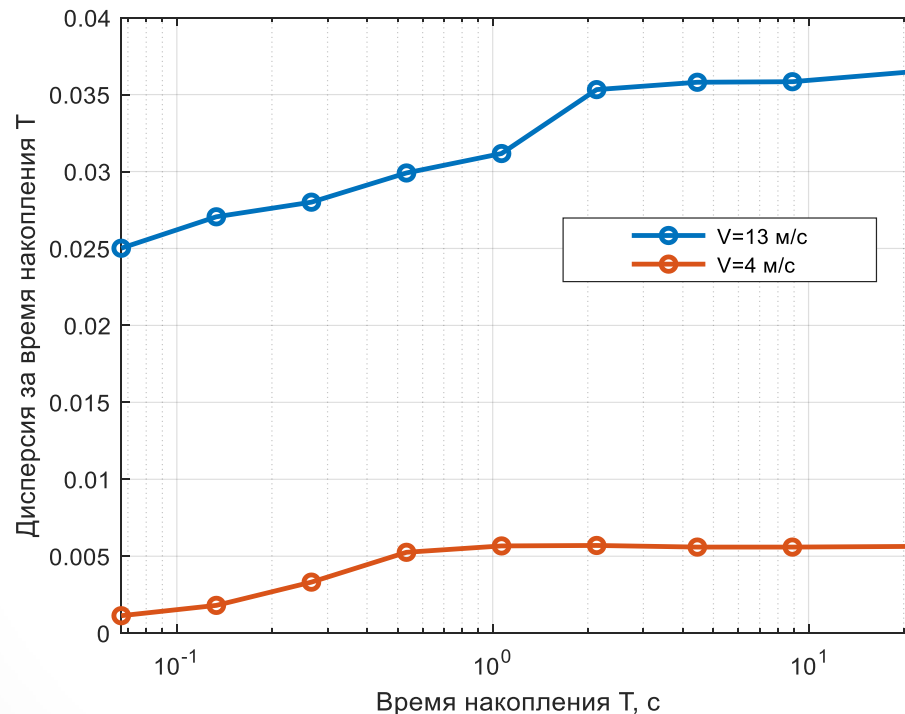
$$\sigma_u^2 = 0.036 \pm 0,004$$

Что согласуется с учетом погрешности измерений



Общая дисперсия волнения является суммой дисперсий различных частотных компонент спектра.

Поэтому, разность дисперсий на соседних точках графика отвечает за вклад каждого участка частот в общую дисперсию.



Это уникальное свойство метода лазерных «юбок».



## Погрешности метода

- Уклоны в точке падения луча на поверхность приводят к завышению дисперсии  $\sigma^2_{\xi y}$  на 22%. Этот вклад можно учесть.
  - Влияние неконтролируемых уклонов  $\xi_x$  по оси X не превышает 12%.
- 
- **Итоговая погрешность метода оценивается в 12 %.**



## Достоинства метода

- 1. В отличие от других методов измерений, таких как струнные волнографы или буи, в предложенном методе происходит обрезание не высокочастотных компонент волнения, а наоборот, низкочастотной фракции.**
- 2. Метод позволяет разделить вклады различных частотных компонент спектра в общую дисперсию уклонов**
- 3. Самым важным достоинством метода является возможность регистрации распределения уклонов капиллярных волн.**
- 4. Метод лазерных «юбок» может стать важным инструментом при исследовании физики формирования излучения рассеянного взволнованной морской поверхностью.**



# Выводы

- Предложен новый метод оперативного определения распределения уклонов капиллярных волн на морской поверхности
- Метод позволяет регистрировать капиллярные волны амплитудой до 30 мкм с расстояния 5-8 метров
- Достоинством метода является проведение измерений как ночью так и днем
- Метод позволяет определять распределение капиллярных уклонов всего по одному видеокадру за 0,01 с. Это позволит применять квадрокоптер.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-17-00189



Спасибо за внимание!