



МИРЭА-Российский технологический университет

Определение уклонов морской поверхности методом лазерных «юбок»

Стерлядкин В.В^{1,2}., Лихачева М.В¹., Рубан О.А¹., Алиев Г.М¹.

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.

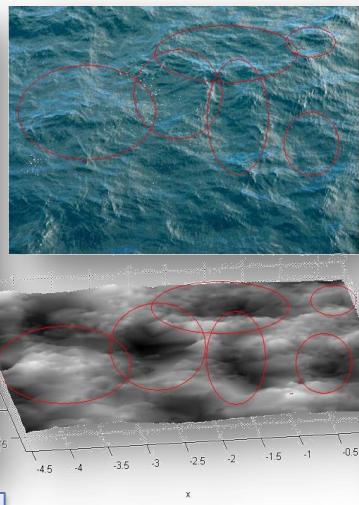
Методы измерения ветрового волнения



Волномерные рейки



Струнный волнограф



Стереосъёмка



Волнографические буи



Акустический волнограф

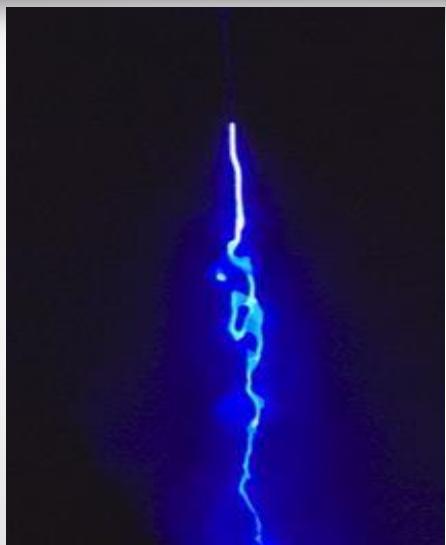
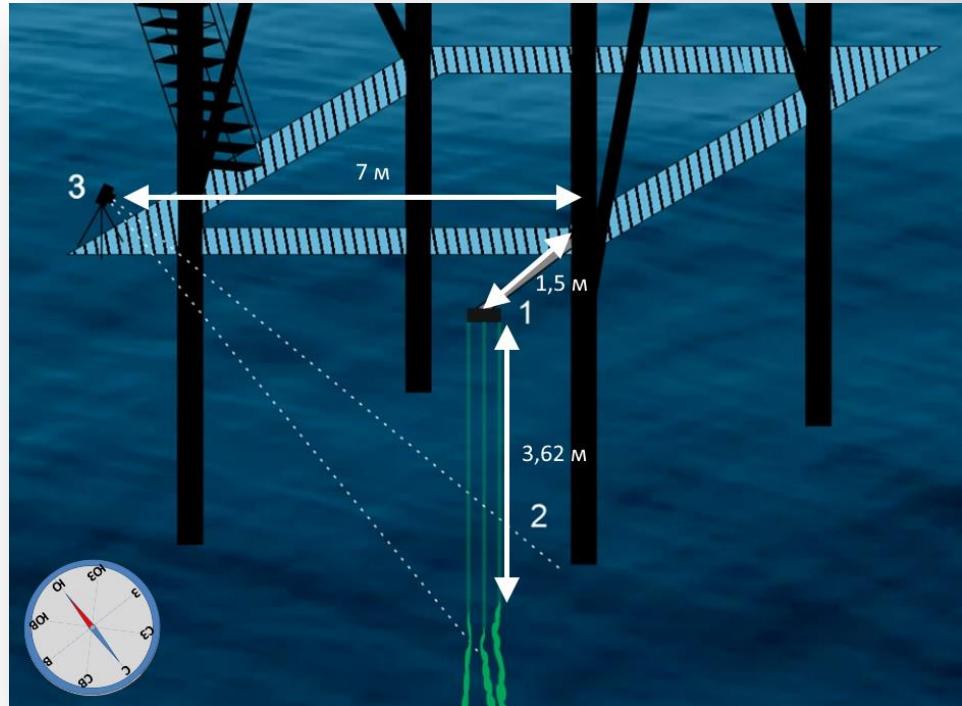


Морская океанографическая платформа в поселке Кацивели, Крым





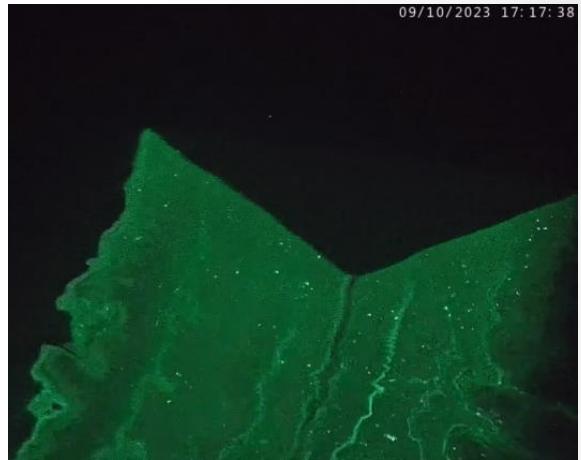
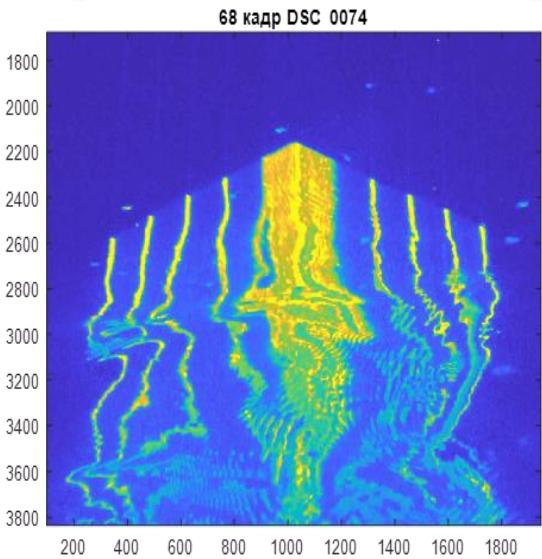
Лазерный волнограф



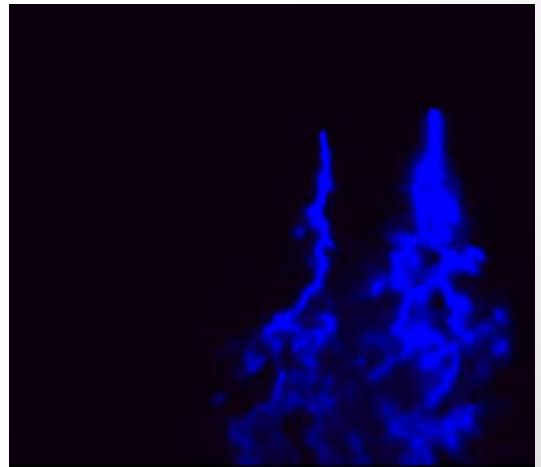
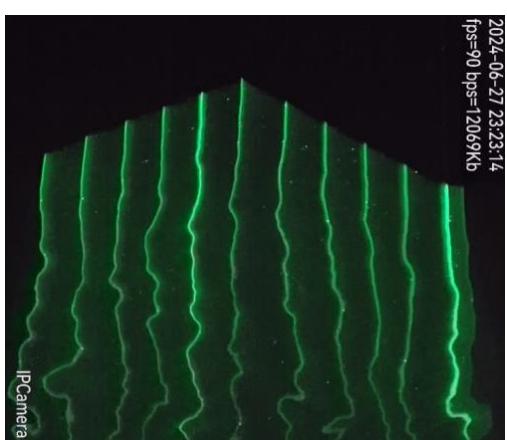
Лазерные лучи в воздухе почти не рассеиваются, а в морской воде рассеяние формирует на видеокадрах извилистые изображения преломленных лучей. Верхняя граница каждого луча соответствует границе раздела вода-воздух.



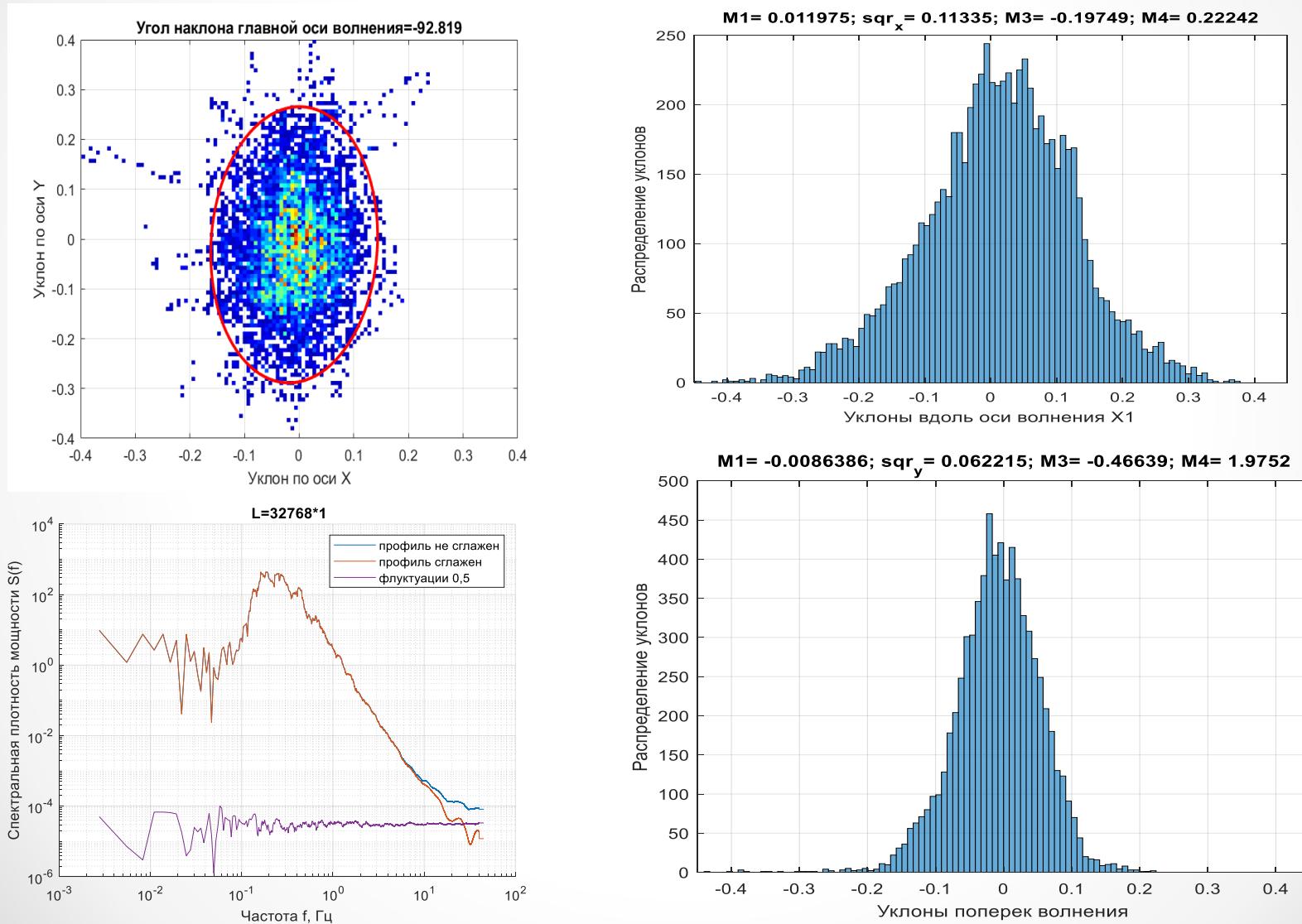
Типичные видеокадры, которые регистрируются при разных режимах сканирования



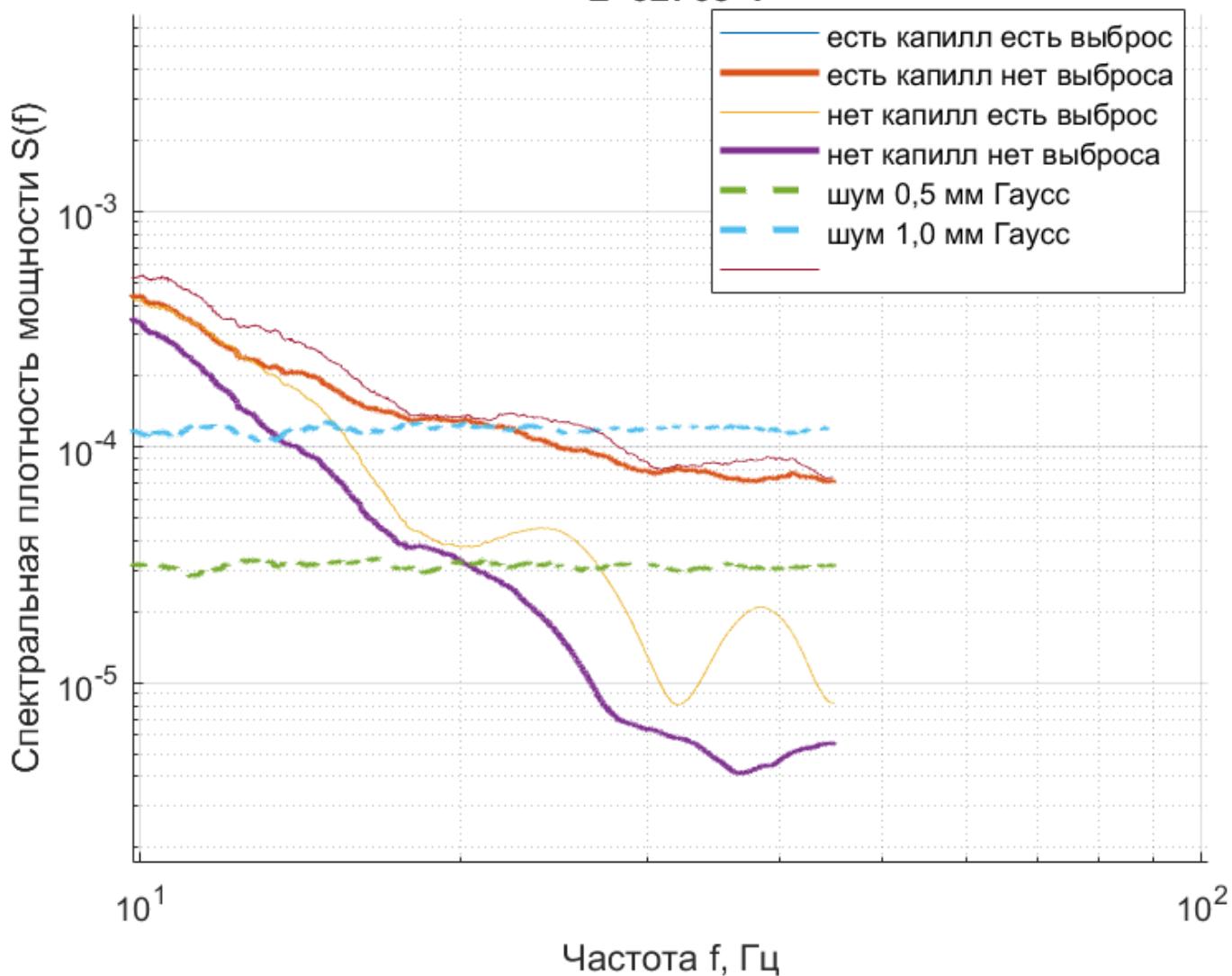
Первоначально измерялись либо возвышение морской поверхности в отдельных точках, либо профиль поверхности вдоль заданной траектории сканирования.



Ряды возвышений позволяют измерять двумерные уклоны на различных масштабах

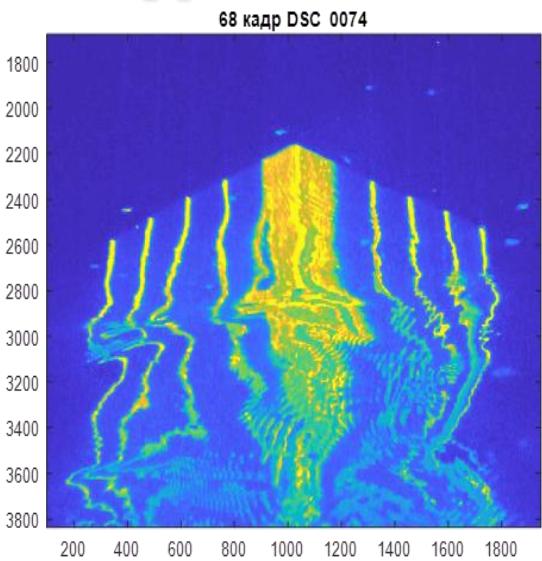


L=32768*1

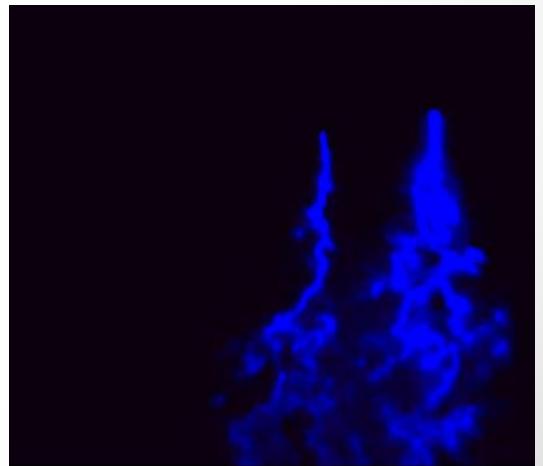
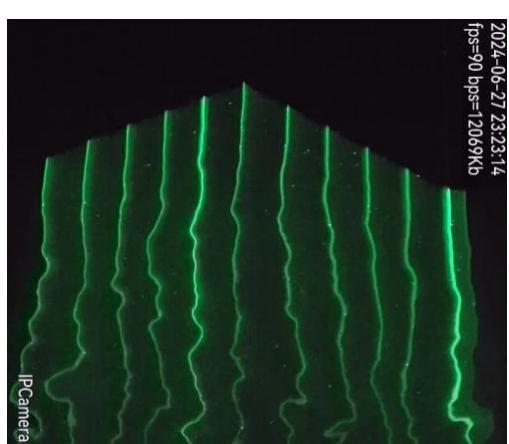




Возникла идея расшифровать искажения формы лучей

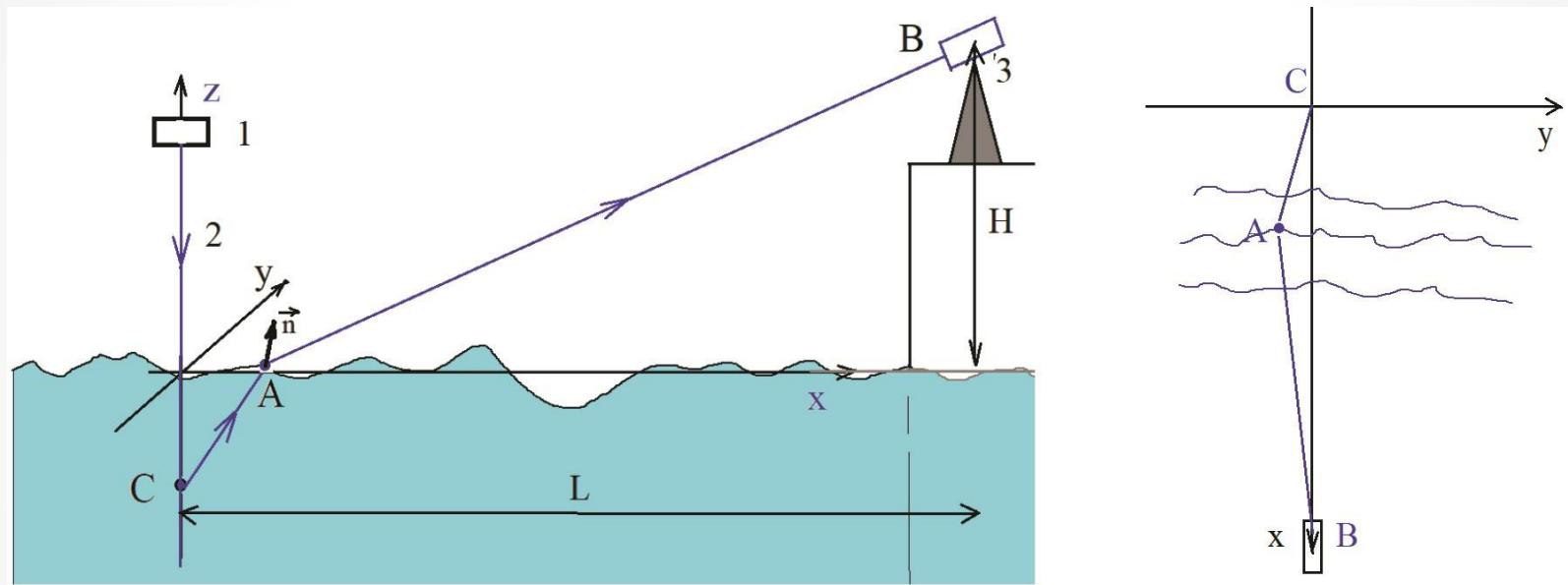


Искажения обусловлены
преломлением
изображения прямого
луча на взволнованной
поверхности.





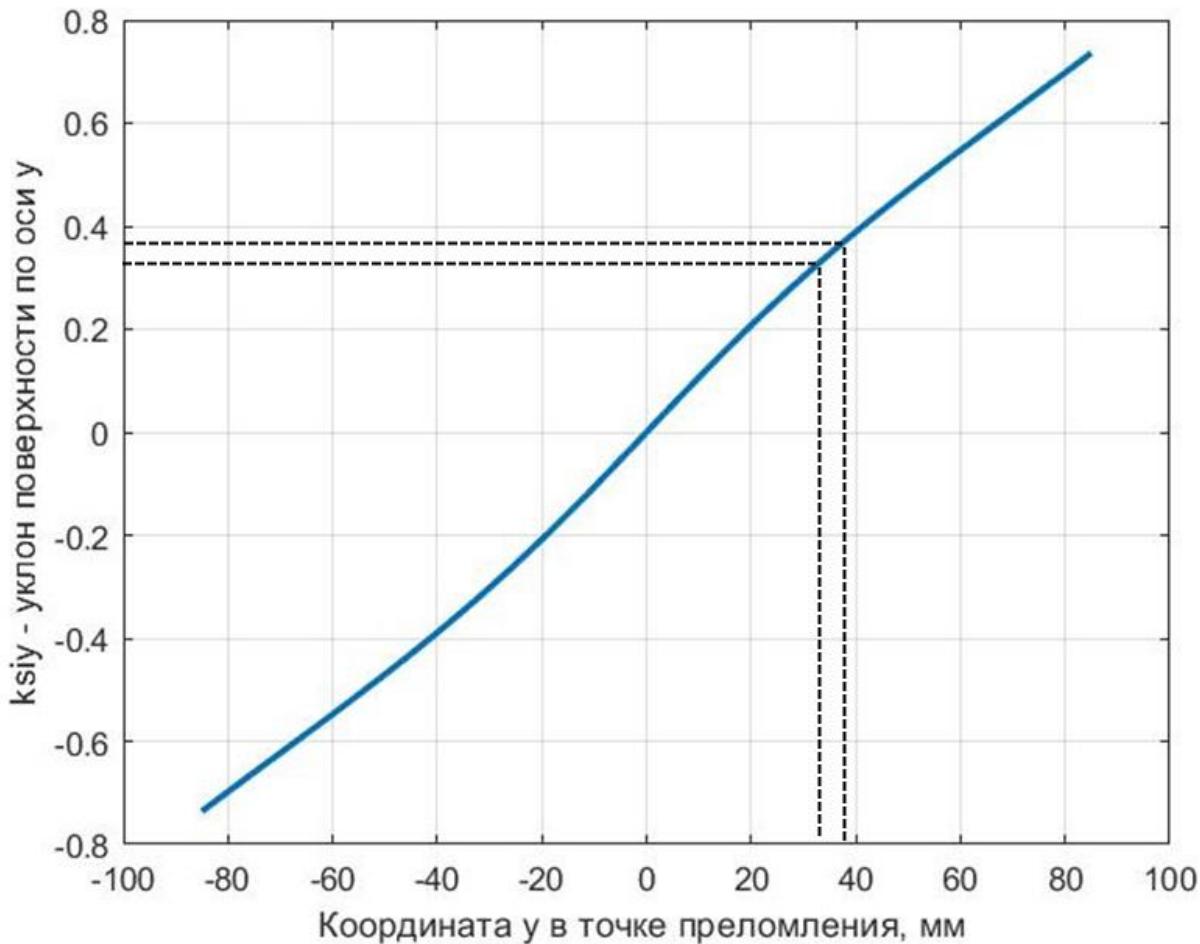
Была решена обратная задача поиска уклонов по отклонению луча



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 , вид сверху. Геометрическая оптика.

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

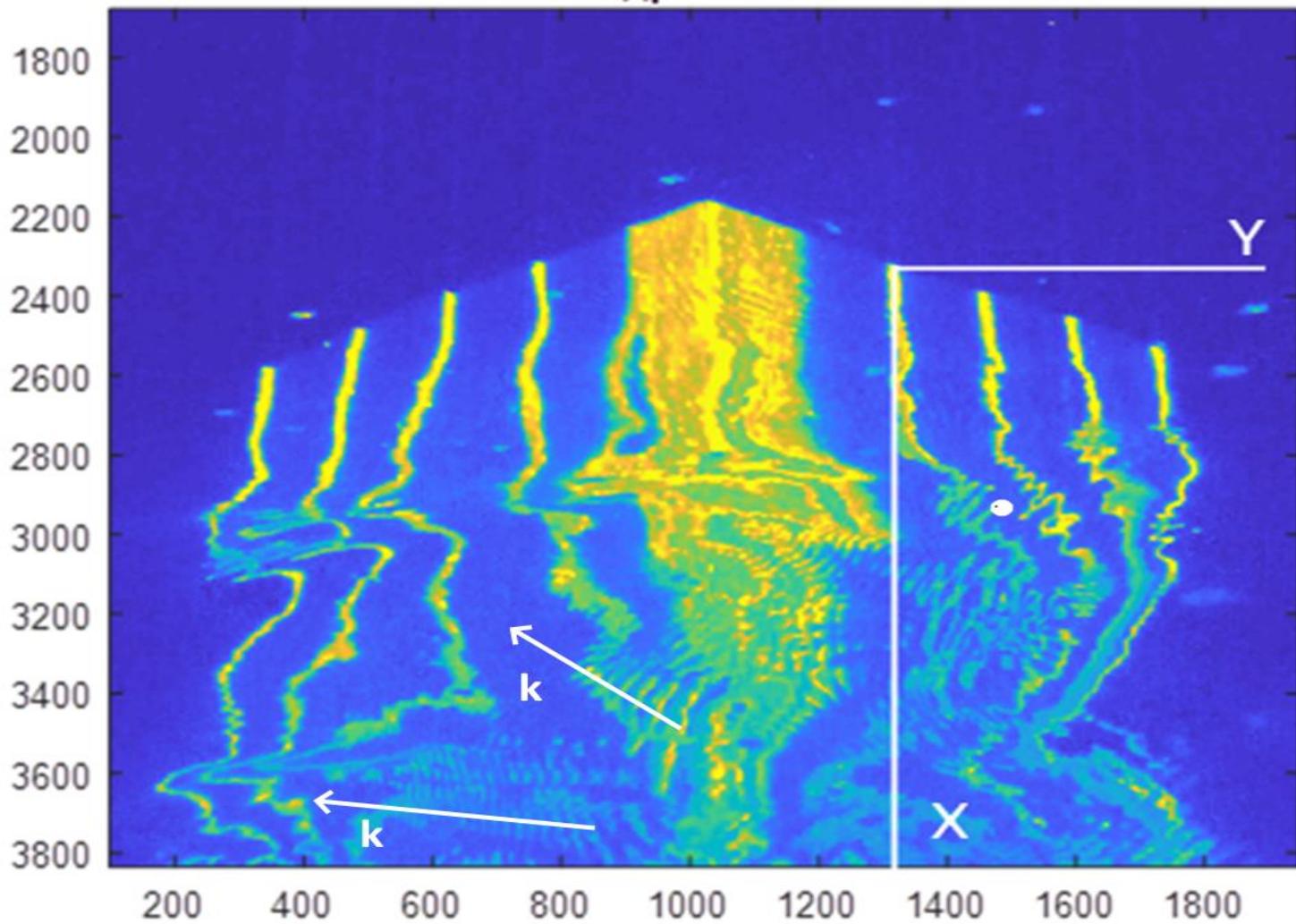
Справа показан вид сверху. Чем больше отклонение светящейся точки по координате Y, тем больше уклон поверхности в этой точке.



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

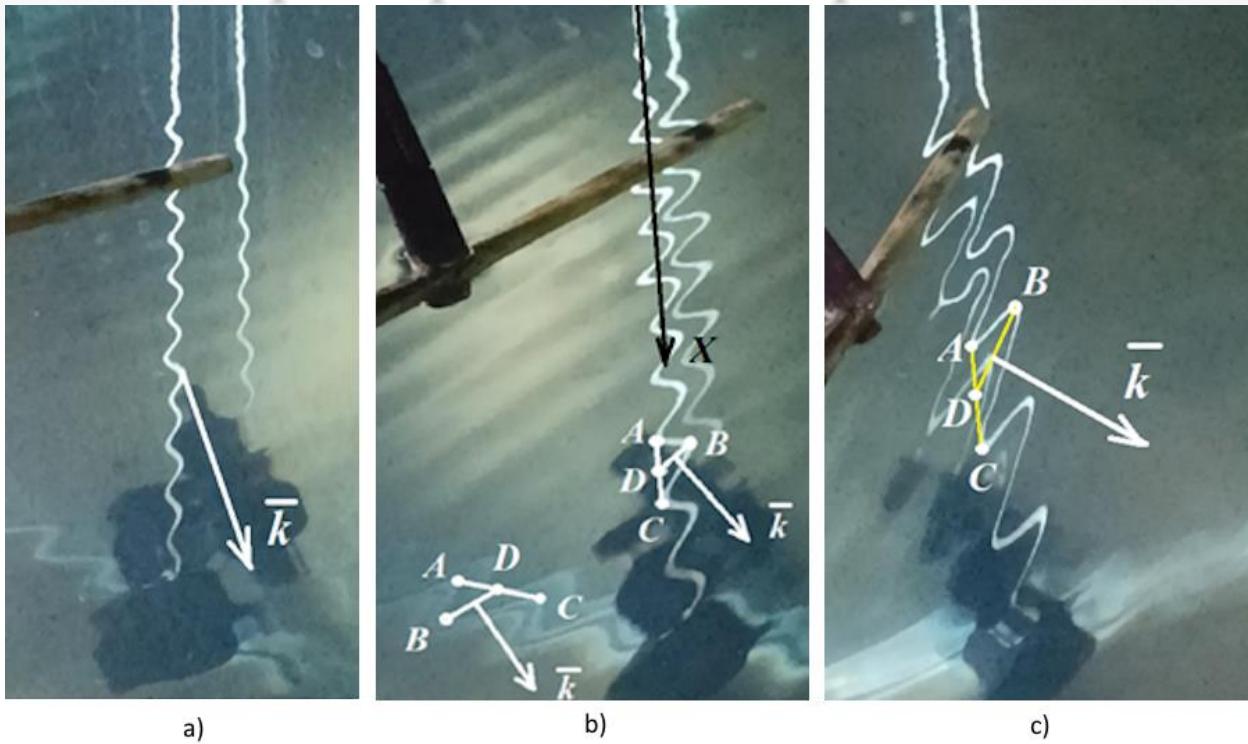


68 кадр DSC 0074



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

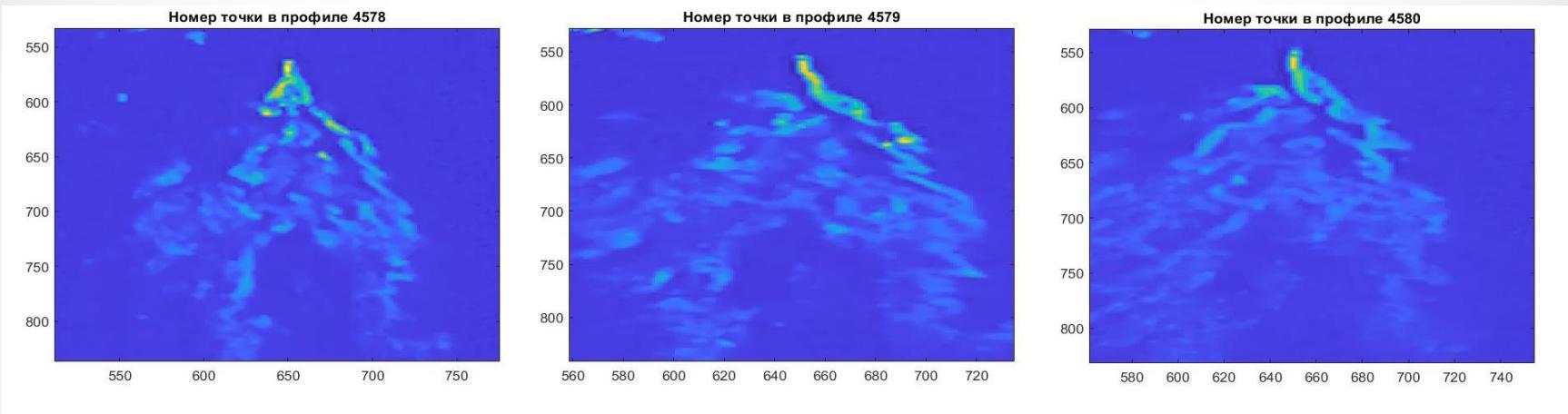
Лабораторный эксперимент



Изображение прямой белой нити (и ее отражения от стенки аквариума) прошедшее через капиллярную волну на поверхности зависит от угла θ 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 видеокадра, полученных при частоте съемки 90 кадров в секунду. Выдержка составляла $1/100$ с, скорость ветра $V_w = 8$ м/с, при этом морская поверхность была частично покрыта капиллярной рябью.

$$2\pi v \tau > 1 \text{ рад}$$

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



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.

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

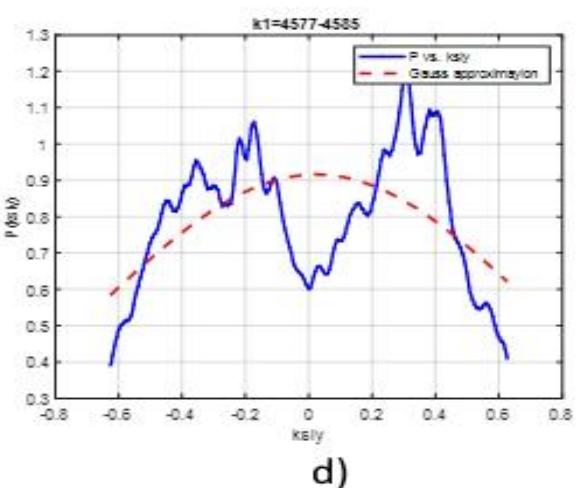
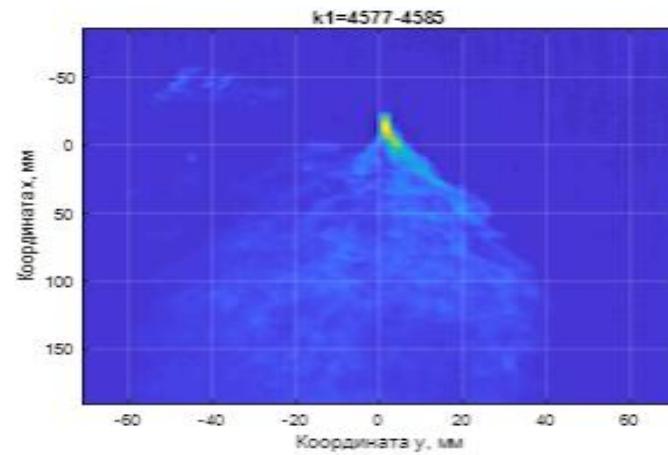
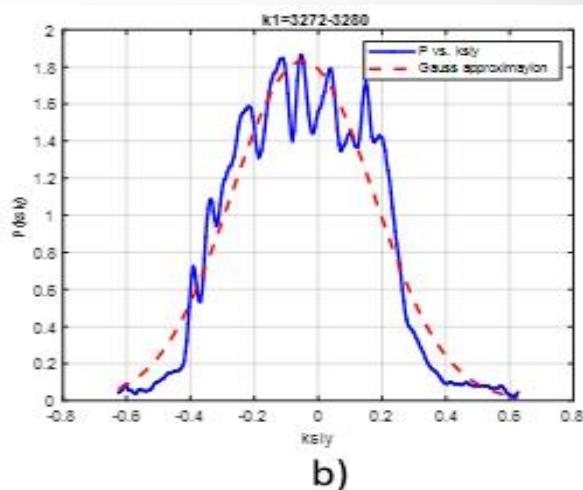
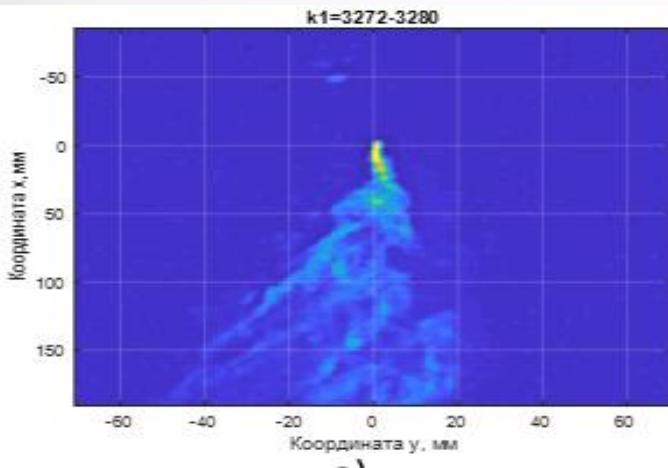
Световая энергия $I(x_0, y) \cdot dy$, приходящаяся на интервал dy пропорциональна вероятности появления соответствующих уклонов $P(\xi_y) d\xi_y$, где $P(\xi_y)$ – плотность вероятности уклонов

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

Коэффициент А определяется из условия равенства единице полной вероятности уклонов.

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

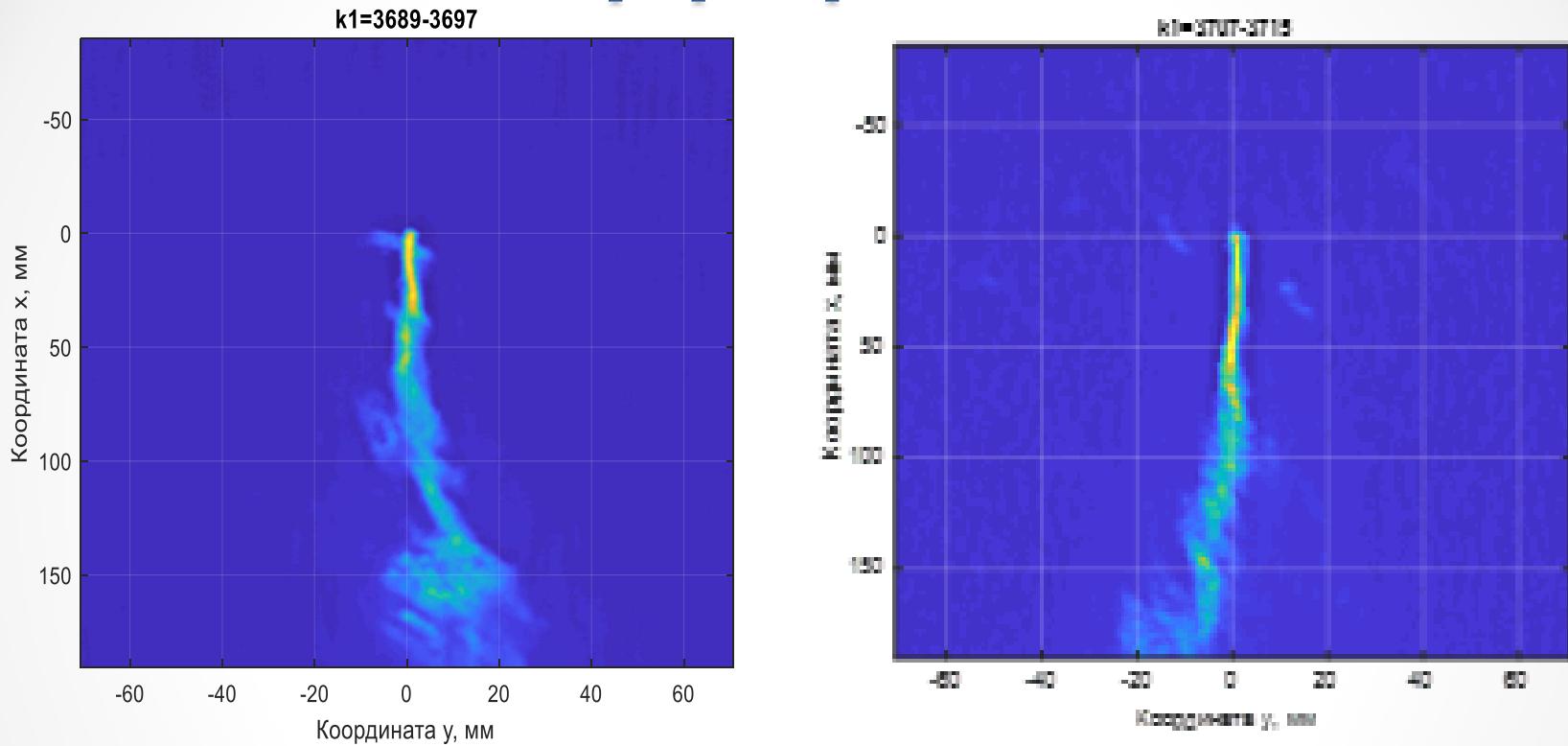
На основе измеренной яркости $I(x_0, y)$ и предыдущего графика получаем плотность распределения уклонов для каждого изображения



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



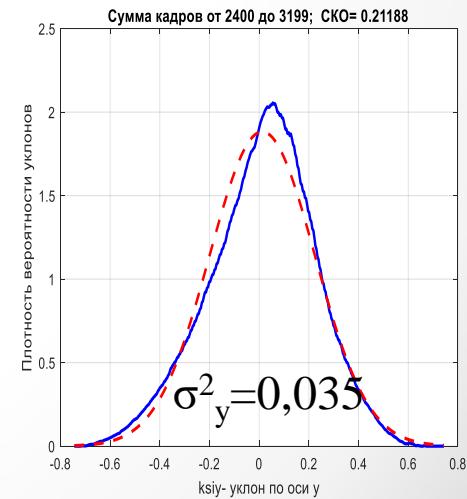
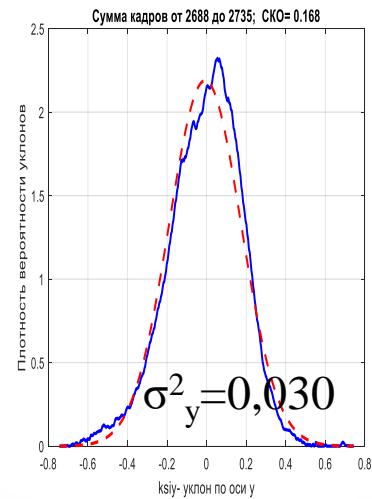
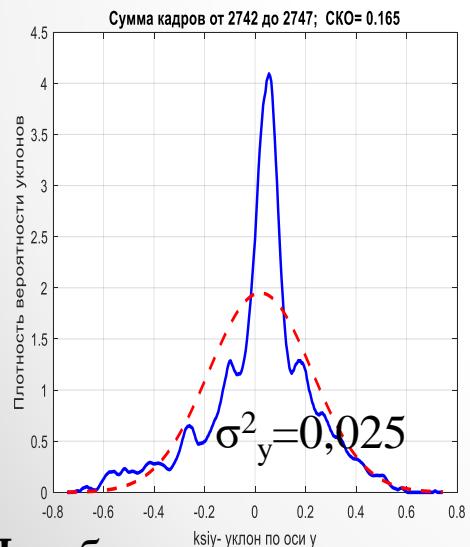
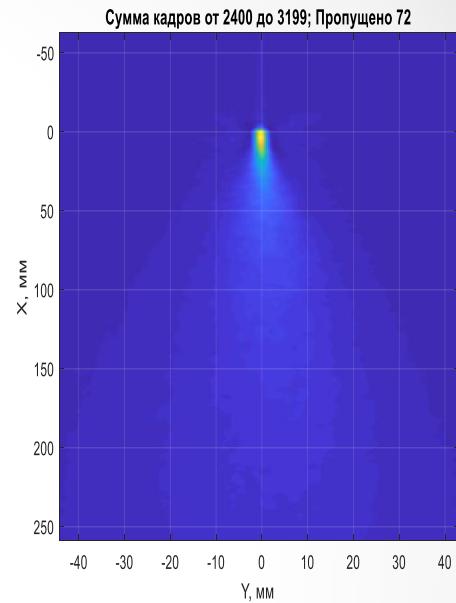
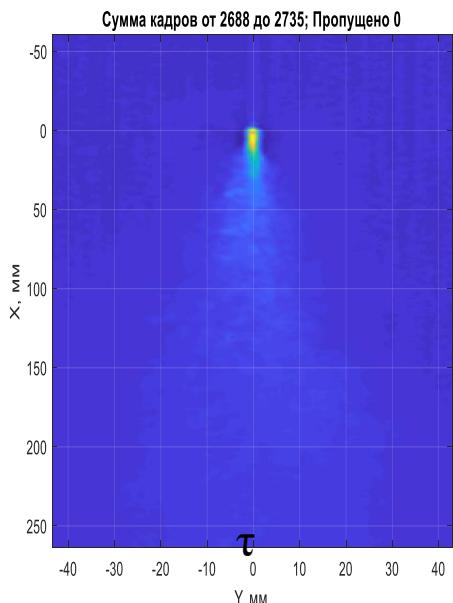
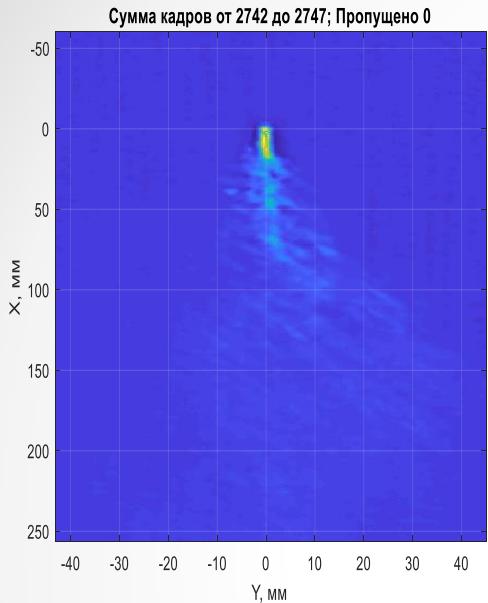
Плавная гравитационная волна приводит к смещению центра распределения



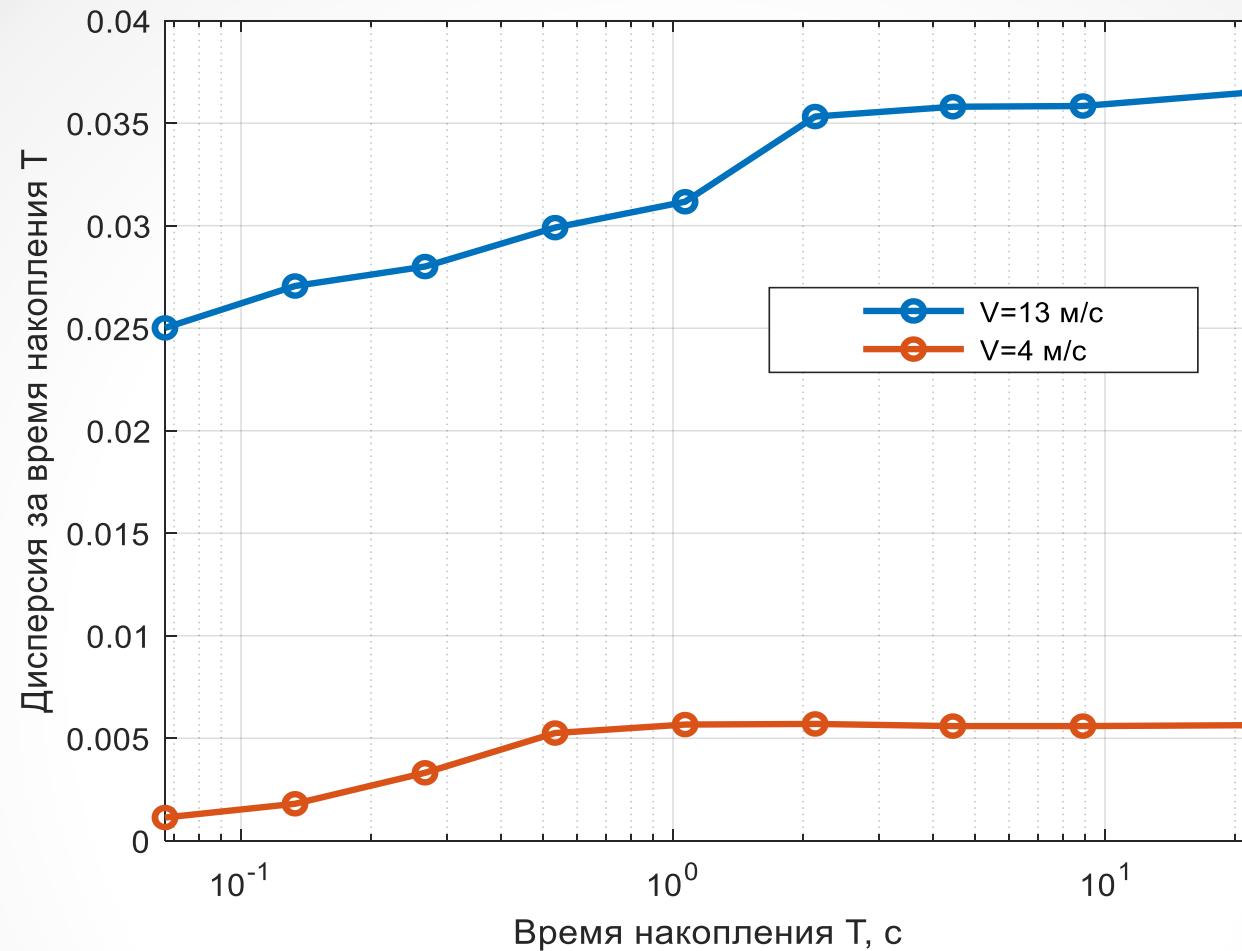
Накопление 9 кадров происходит за 0,1 секунды. За это время
уклон гравитационной волны не изменяется, что приводит к
смещению центра распределения.

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 σ_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 σ_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

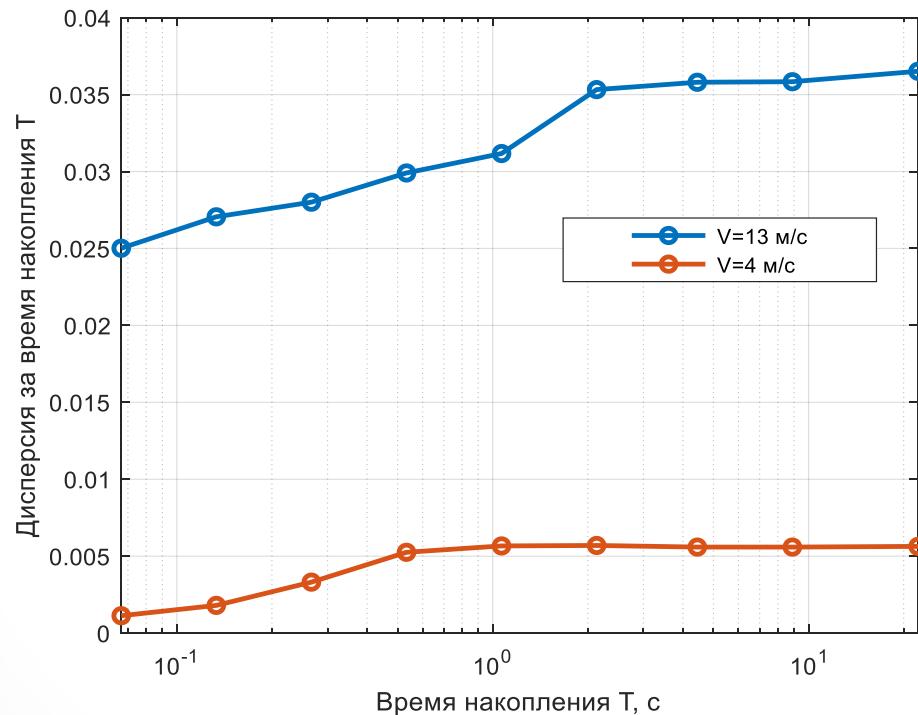
$$\sigma_u^2 = 0,036 \pm 0,004$$

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 падении луча на поверхность приводят к завышению дисперсии $\sigma_{\xi_y}^2$ на 22%. Этот вклад можно учесть.
 - Влияние неконтролируемых уклонов ξ_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!