

# **Новый метод измерения двумерного профиля морской поверхности и параметров капиллярных волн в натуральных условиях**

Стерлядкин В.В.<sup>1,2</sup>, Куликовский К.В.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> МИРЭА-Российский технологический университет, РТУ МИРЭА

<sup>2</sup> Институт космических исследований ИКИ РАН

# Аннотация

1. Сформулирована обратная задача восстановления мгновенной формы морской поверхности по видео изображениям лазерных лучей, падающих сверху вниз и преломленных на морской поверхности.
2. Проведен анализ показал чувствительность метода к уклонам на уровне 0.5 градуса.
3. Предложенный метод регистрации лазерных «хвостов» весьма эффективен для регистрации и определения параметров капиллярных волн. Чувствительность метода позволяет измерять капиллярные волны длиной волны до 4 мм и амплитудой колебаний в 50 мкм.

# Известные методы измерения ветрового волнения

- **Струнные волнографы**, в которых используется изменение сопротивления струн при изменении уровня погружения струн в воду. Недостатками таких волнографов является неконтролируемое изменение сопротивления при охлаждении струны ветровыми пульсациями, нарастание водорослей, взаимное электрическое влияние соседних струн друг на друга.

- **Фотографии солнечных бликов.**

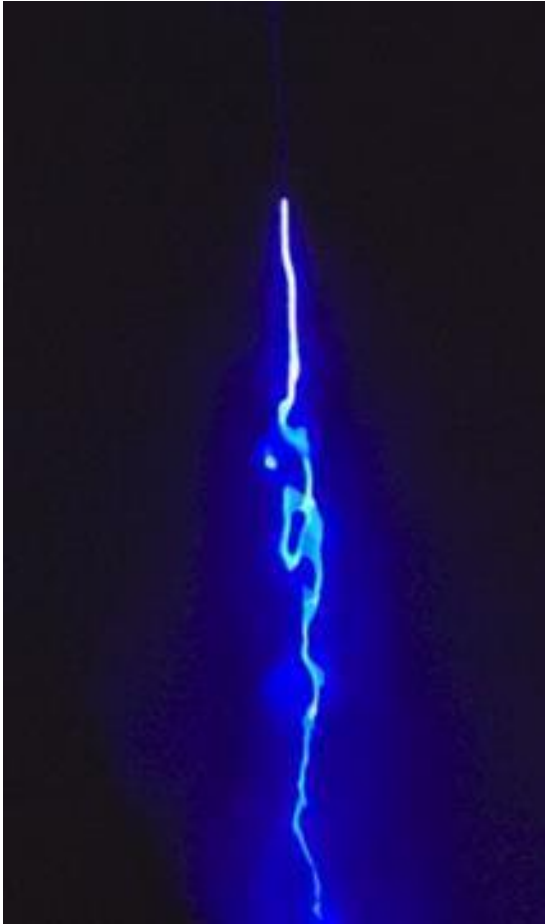
Нужно солнце. Не является прямым методом, зависят от облачной засветки.

- **Лазерное сканирование с самолета** (Hwang et al. 2000).

**Лазерные альтиметры** (Grare 2018). Не регистрируют профиль волнения.

- **Регистрация преломленного лазерного луча**, выходящего из воды. Недостаток - наличие громоздкой приемной оптической системы, которую необходимо фиксировать на расстоянии 30-60 см над поверхностью.
- **Ножевой лазерный луч**, рассеянный поверхностью. Регистрация на фото или видео камеру. Недостаток- размывание границы раздела.
- **Стерефотография** (Banner., Jones, 1989). Нужен внешний источник засветки. Не регистрирует капиллярные волны.

# Описание методики и принципов измерений «мгновенной» формы морской поверхности



- *Видеокадр лазерного луча рассеянного на морской поверхности в ночное время. Верхний край луча соответствует границе раздела воздух-вода.*
- *В воде луч распространяется по прямой, но его изображение искажается морской поверхностью.*

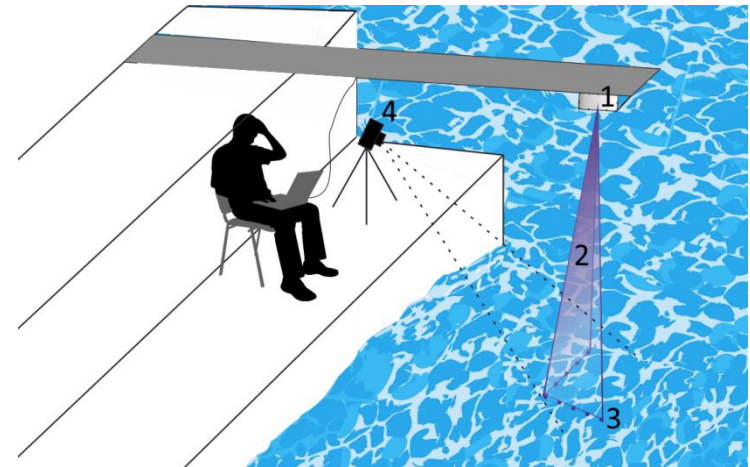
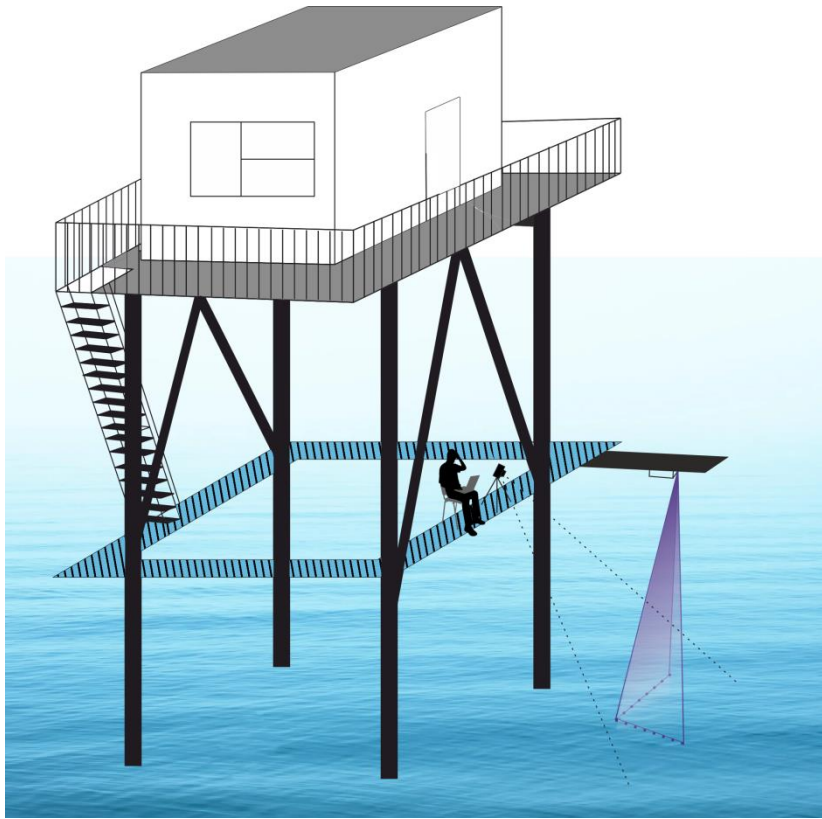


Схема измерений волнения на океанографической платформе и на пирсе. Сканатор направляет игольчатый лазерный луч по заданной траектории. Рассеянное поверхностью излучение регистрируется на цифровую видеокамеру.

### 3. Описание аппаратуры и алгоритма получения «мгновенного» профиля морского волнения

- Проверка метода проводилась в натуральных условиях с края морского пирса, выдвинутого в море на 60 метров.

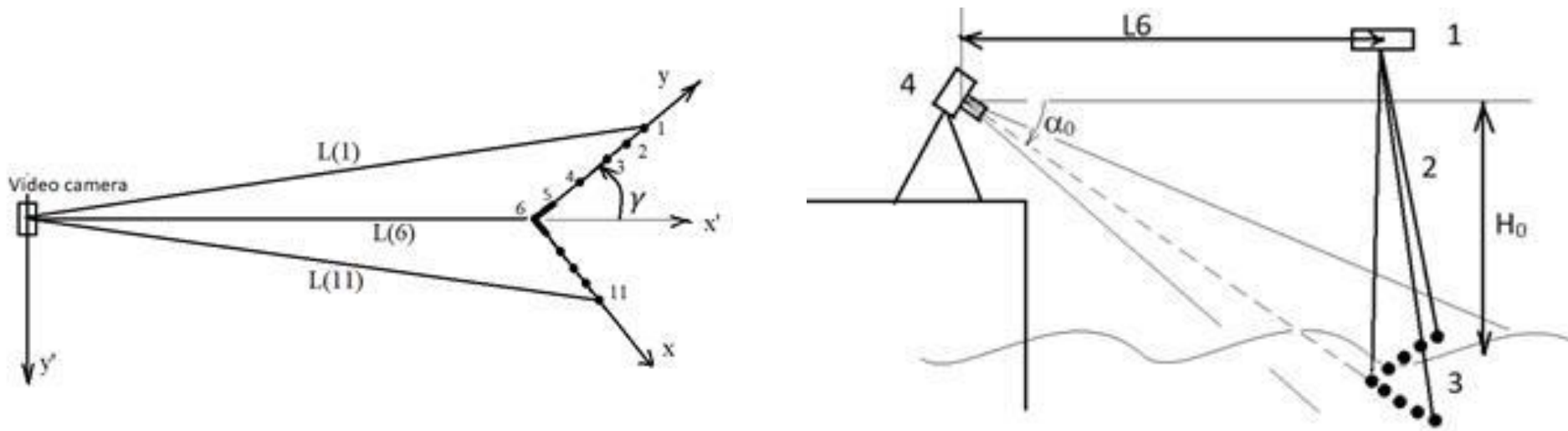
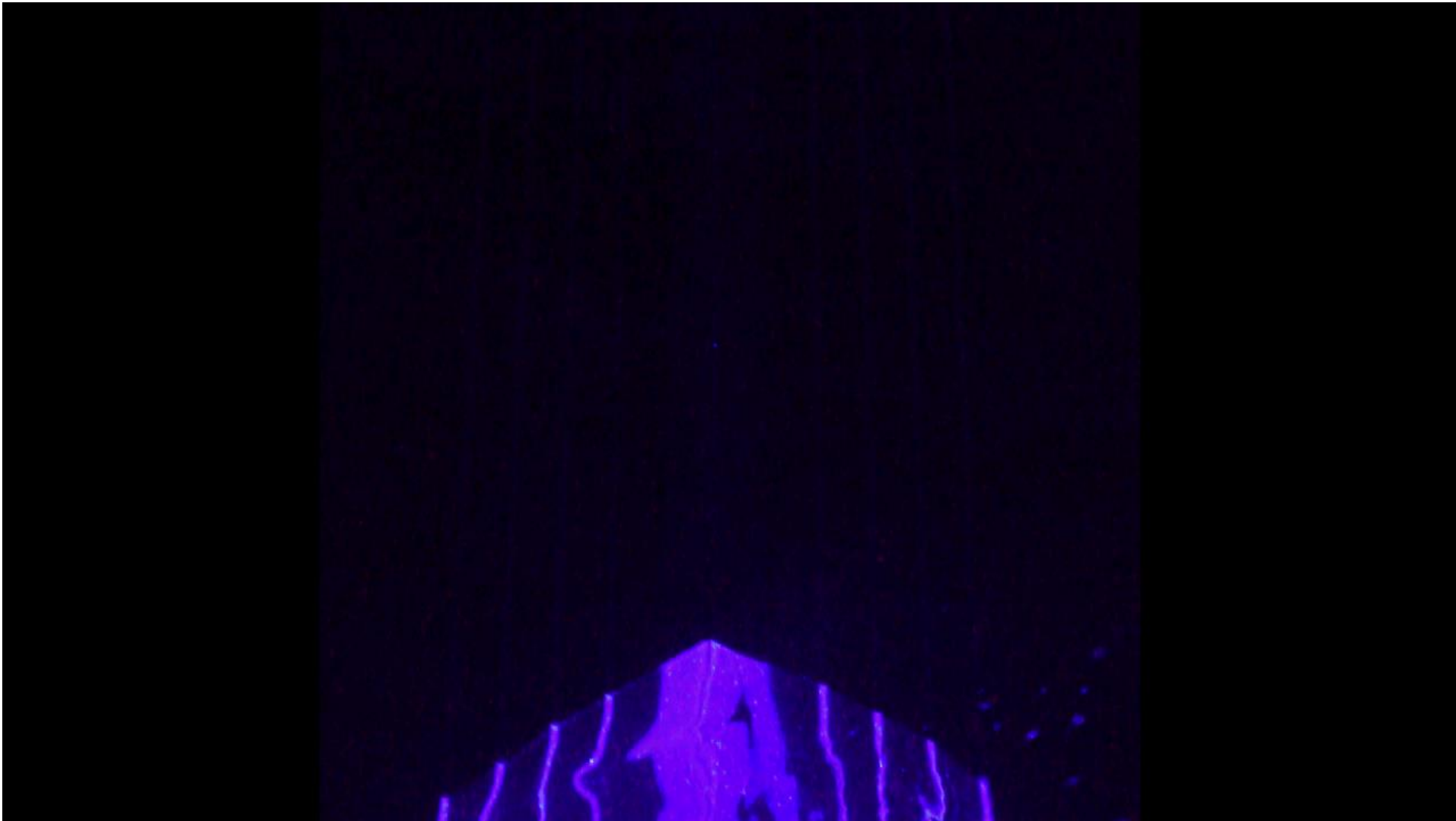


Рис.4. а) Вид сверху на морскую поверхность и расположение видеокамеры. б) вид сбоку.

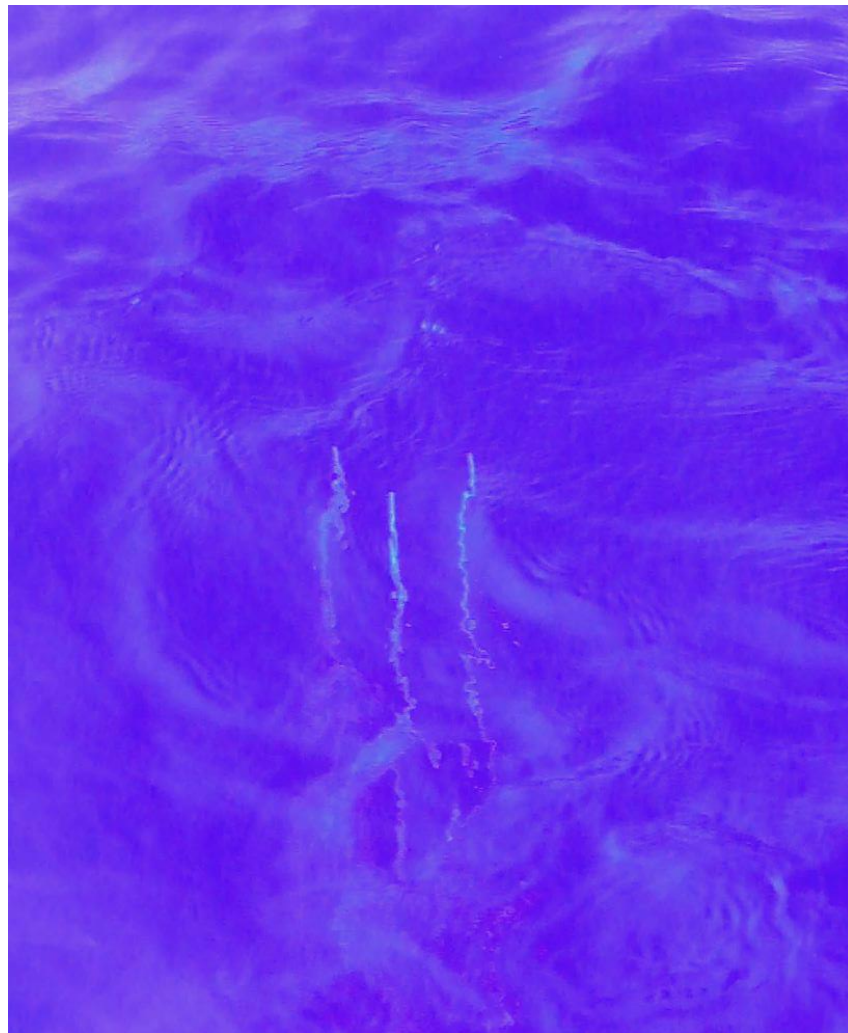
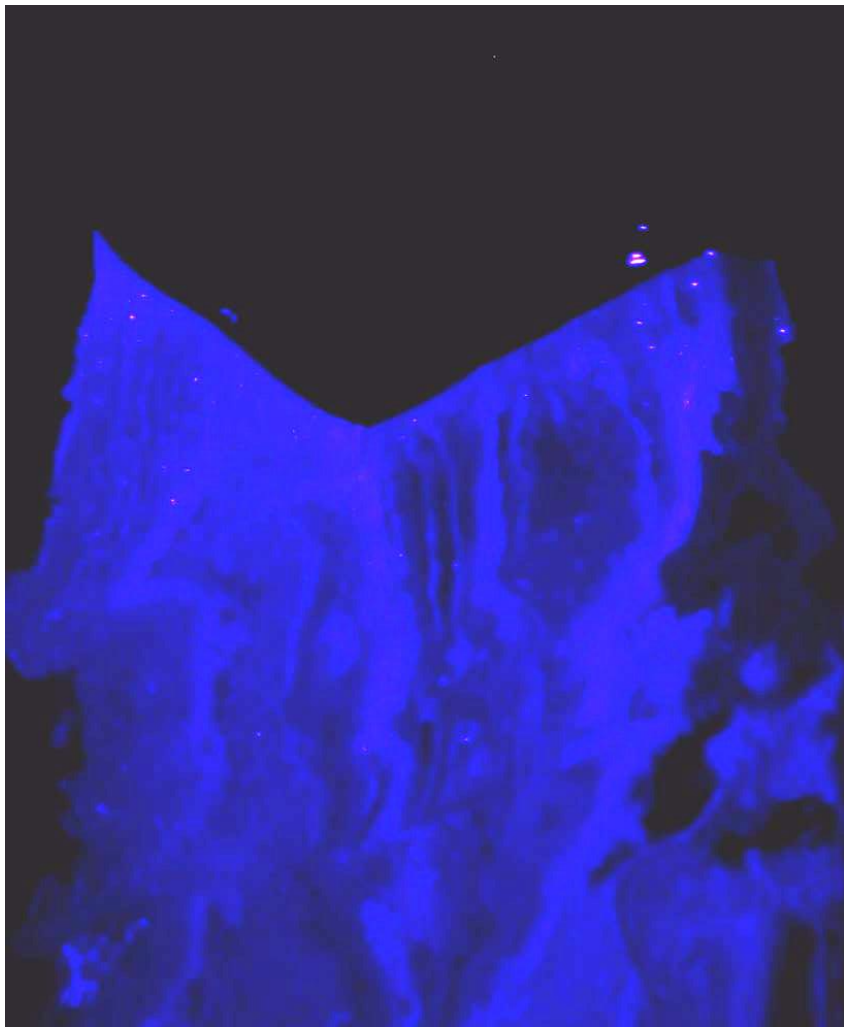
# Морская платформа в Кацивели, Крым



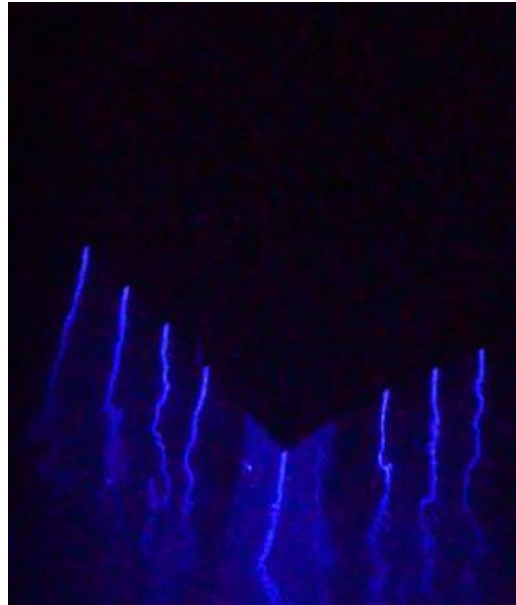




# Видео



# Принцип измерения «мгновенный» профилей волнения



Сканатор разворачивает узкий луч лазера вдоль некоторой траектории по известному пространственно временному закону с частотой повторения, синхронизованной с цифровой видеокамерой. Синхронизация дает время задержки каждой точки по отношению к началу развертки. По анализу последовательности кадров для каждой точки траектории определяют скорость ее вертикального перемещения на данном кадре. Затем вводится поправка аппликата поверхности, которая учитывает смещение каждой точки траектории по вертикали за время задержки.

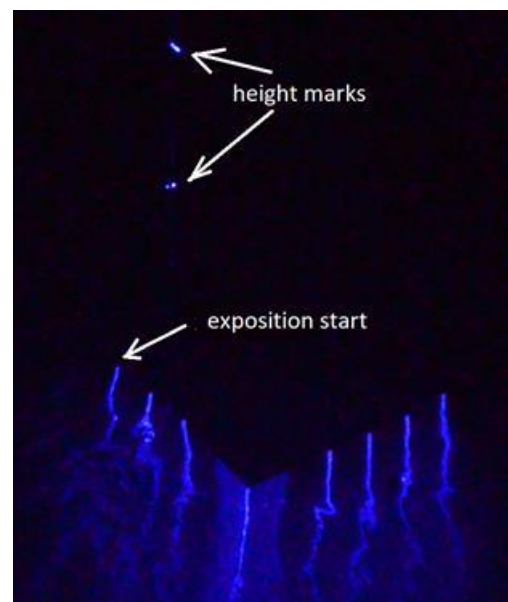
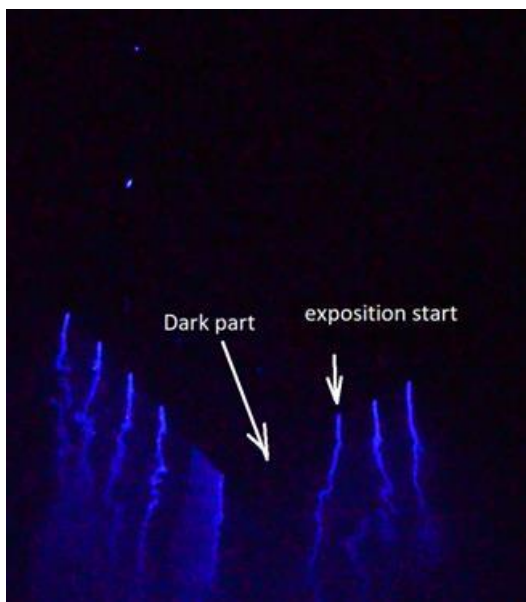
# Точностные характеристики метода

- В результате на каждом кадре получаем профиль волнения, приведенный к единому моменту времени, например, к началу развертки. Если время развертки, (равное времени выдержки) составляет  $\tau=30$  мс, а число разрешаемых точек на траектории развертки  $N=300$ , то время экспозиции каждой точки поверхности будет иметь масштаб  $10^{-4}$ с.
- Точность синхронизации по времени для всех точек кадра будет иметь такой же масштаб  $10^{-4}$ с.
- За это время даже при скорости вертикального смещения волновой поверхности  $V=1$  м/с освещаемая точка успеет сместиться всего на 0.1 мм, засветив не более 1 пиксела на видеоматрице.
- Горизонтальное разрешение при измерении профиля поверхности составляет 1-3мм и определяется размерами лазерного луча на волновой поверхности и разрешением видеокамеры.

# Возрастает отношение сигнал шум

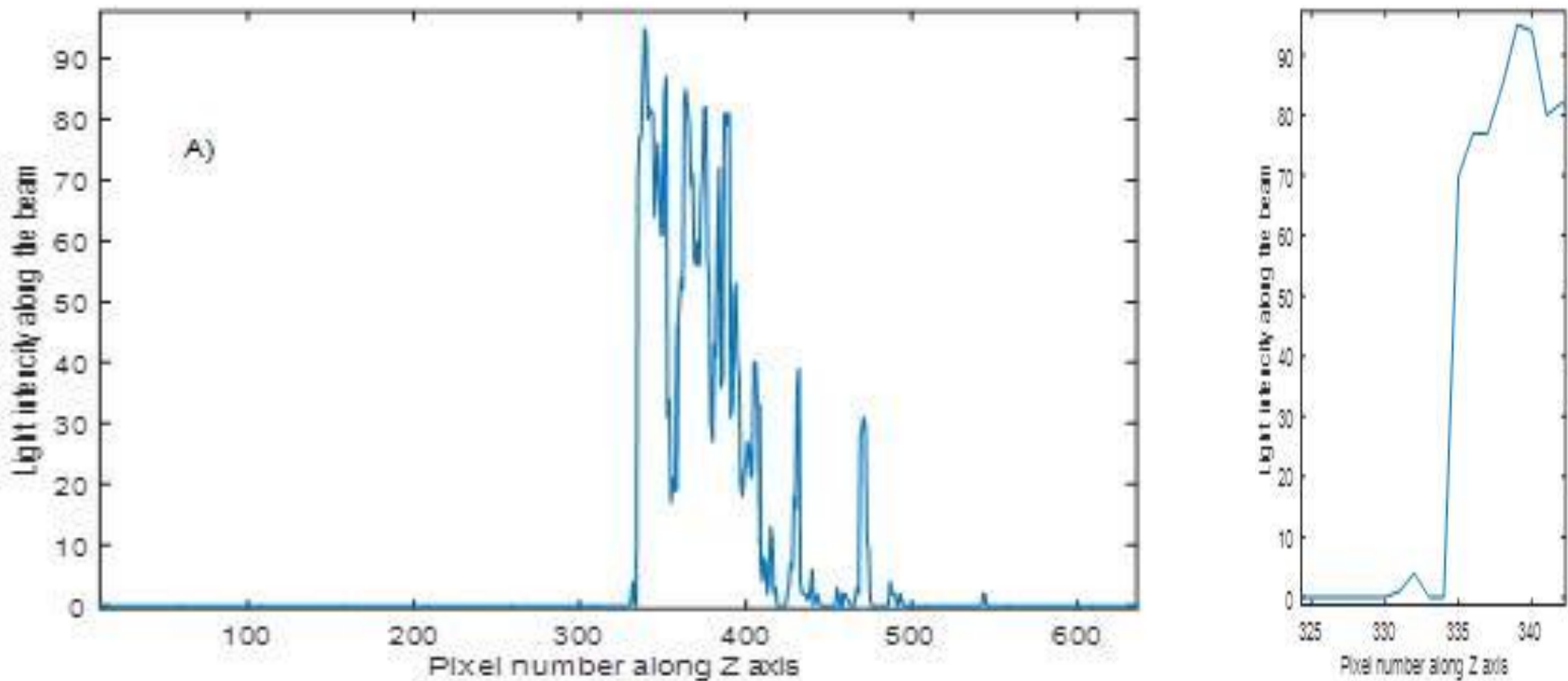
- В случае с ножевым лучом волновая поверхность за время экспозиции  $\tau=30$  мс будет размыта по высоте на  $\Delta Z= V*\tau$ , где  $V=0,5$  м/с - скорость вертикального перемещения поверхности, то есть на 15 мм, поэтому энергия, падающая на поверхность, будет размыта по вертикали не на один, а на десятки пикселей.
- В предлагаемом методе со сканированием эта энергия будет освещать не более 0,1 мм (один пиксел по высоте).
- Отношение сигнал шум в предложенном методе возрастает в десятки раз.

- Использовалась видео камера Nikon D7000, лазер ( $\lambda=445$  нм) с непрерывной мощностью  $P=2.5$  Вт, сканирующее устройство управлялось блоком питания, программируемым от ноутбука. В данной работе описана первая версия волнографа, в которой не было возможности синхронизовать видео камеру со сканатором.



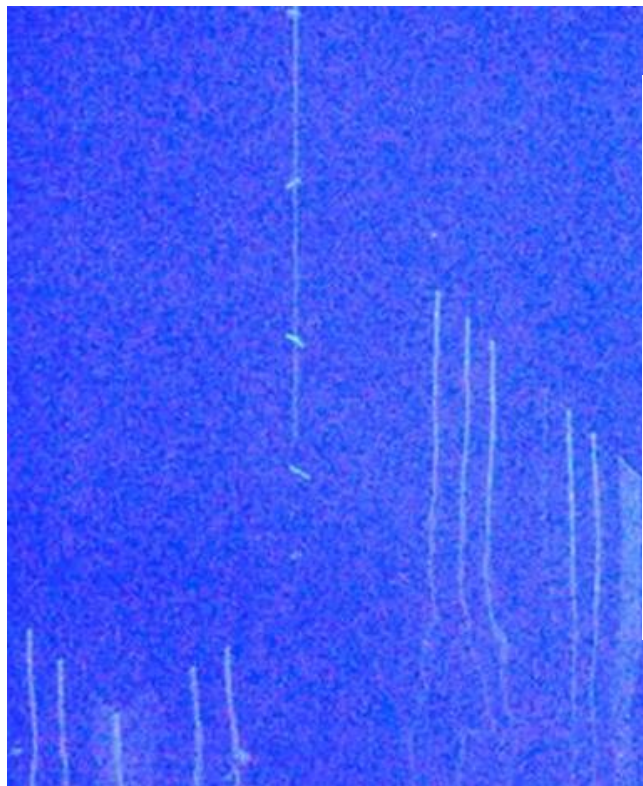
Время экспозиции) составляло  $\tau_{\text{exp}}=30$  мс, а период развертки был выбран 36 мс. Поэтому на каждом кадре лазерный луч освещал не все точки траектории, а 83% от всей развертки, формируя на кадре темную область в том или ином месте траектории. Это позволило провести поправку на смещение и привести все высоты к единому моменту времени - началу записи на видеоматрицу.

## Методика определения аппликат волновой поверхности во всех точках траектории

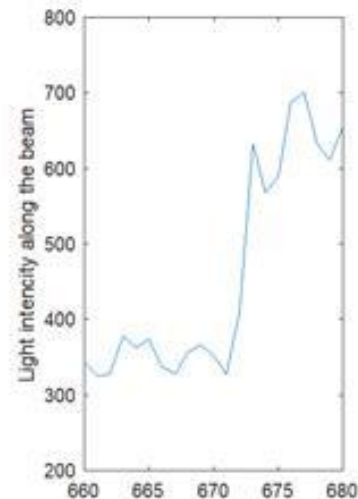
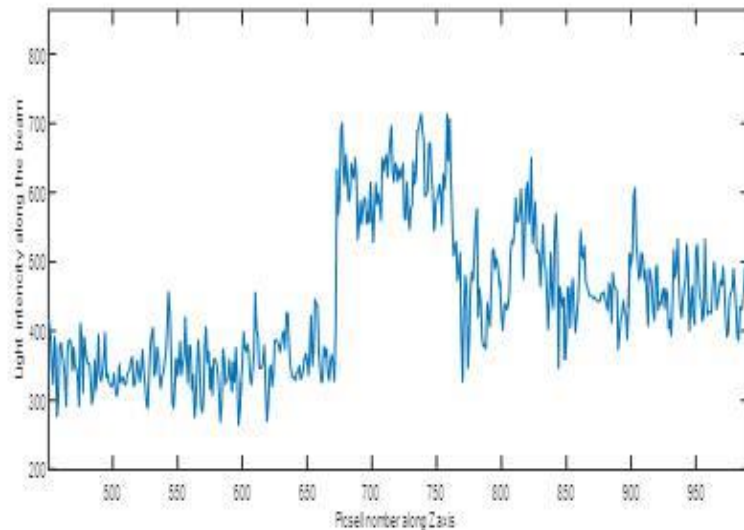


*Зависимость интенсивности засветки видео кадра вдоль одного луча при ночных измерениях. Четко регистрируется начало засветки, которое соответствует поверхности раздела.*

# Дневные измерения 12:37 мск



Применялся поляризатор, который позволял существенно уменьшать вклад фонового излучения неба. Использовались два сканатора, которые можно разнести на любое расстояние и калибровочная нить.



Днем также удается регистрировать границу раздела. Для увеличения отношения сигнал/шум лазерный луч за время экспозиции останавливался в выделенных точках траектории.

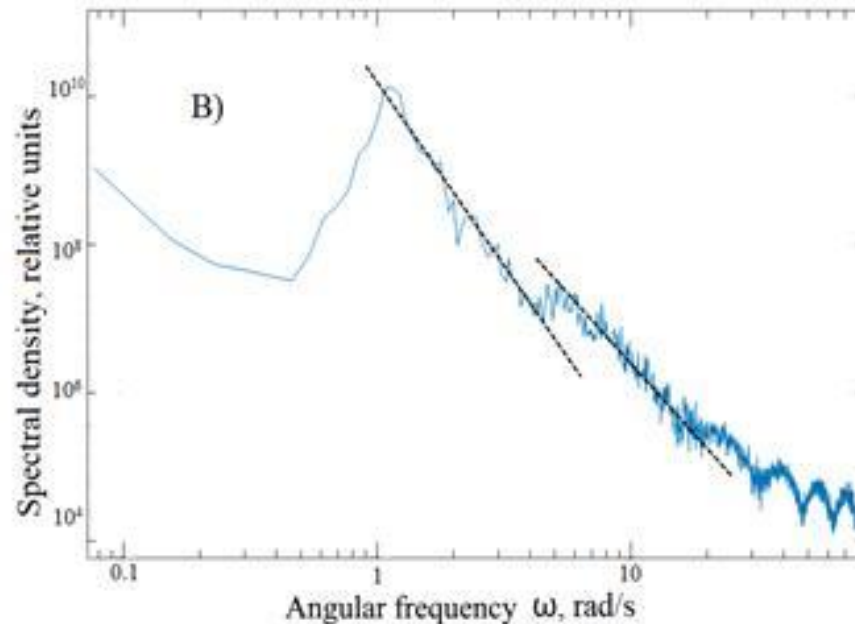
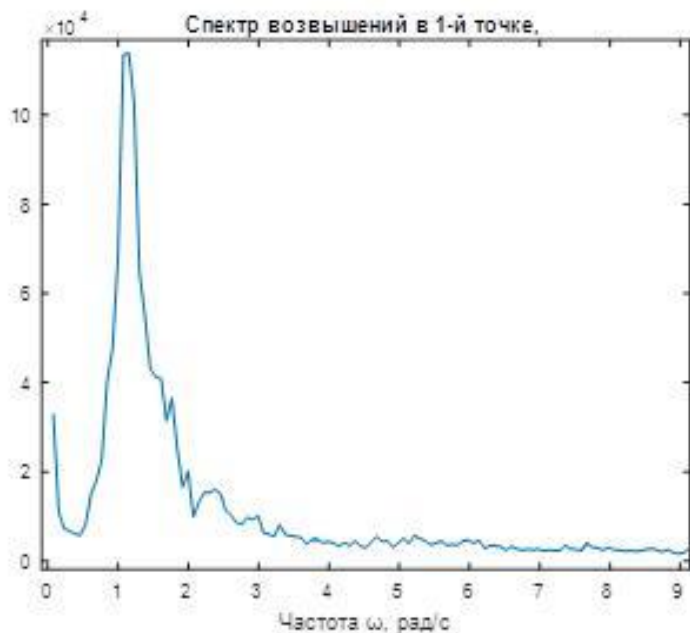
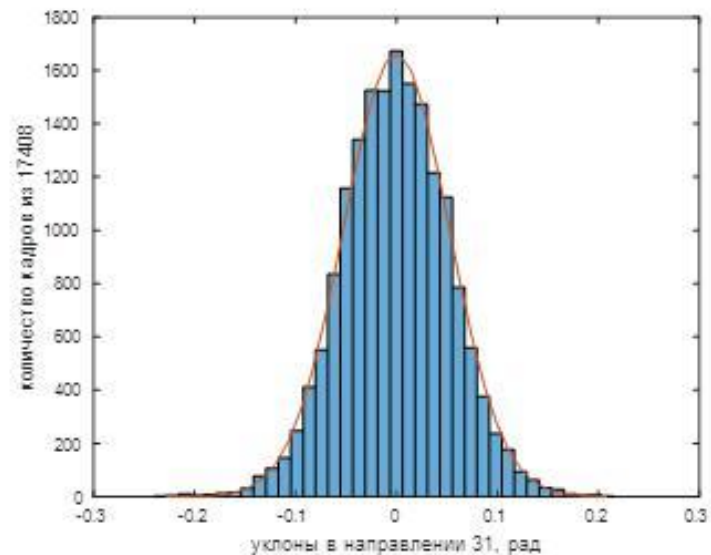
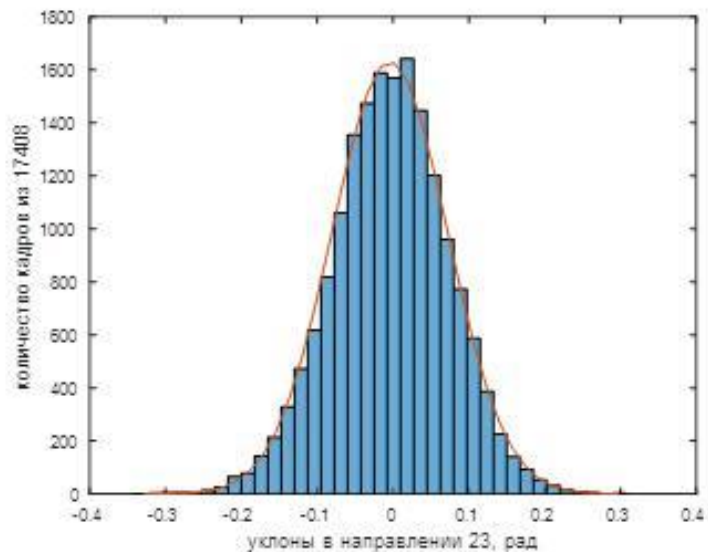


Рис.8. Спектры возвышений для одного луча: а) в линейном масштабе, б) в логарифмическом масштабе.

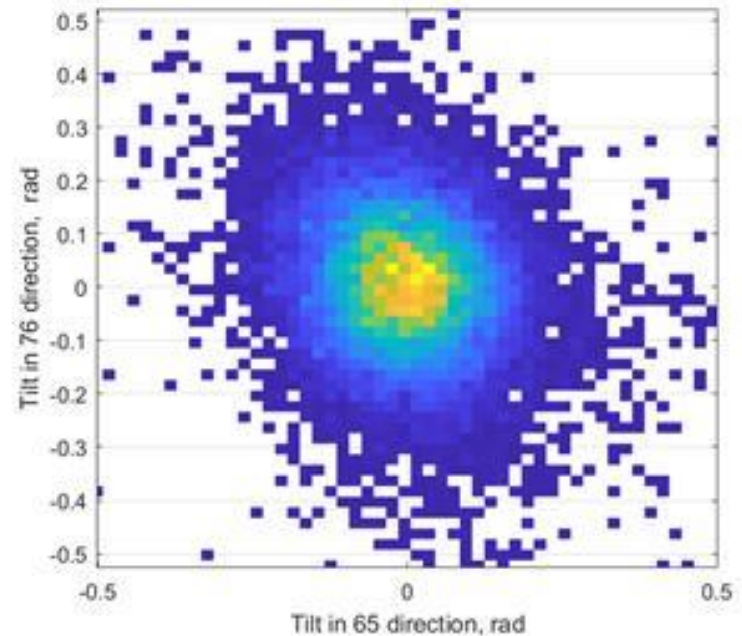
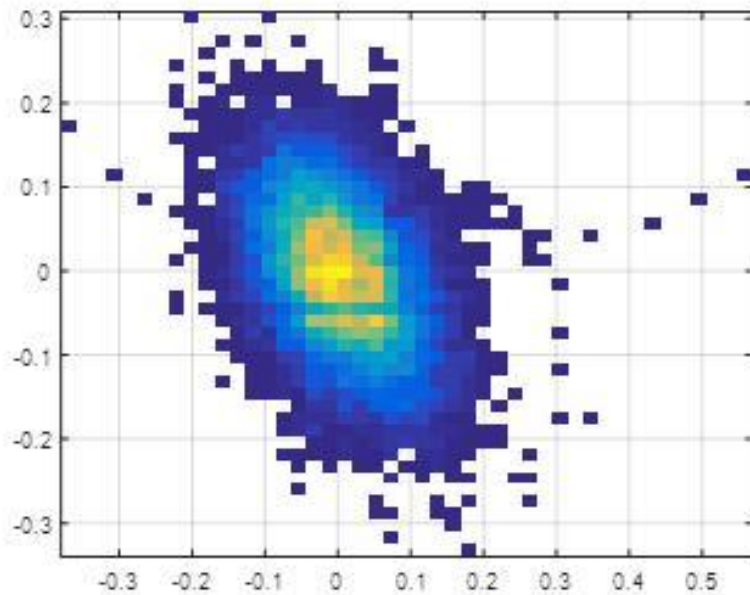
Из графика следует, что на участке частот  $1 < \omega < 4$  рад/с степенная зависимость имеет показатель  $-5.0 \pm 0.2$ , а на участке частот  $5 < \omega < 20$  рад/с наклон спектра составляет  $-4.0 \pm 0.2$ . Соответствующая степенная аппроксимация показана на графиках пунктирными отрезками. Следует отметить, что показатель степени  $-5$  соответствует известной модели спектра Филлипса (Phillips, 1958), а показатель  $-4$  согласуется с моделью Захарова (Badulin Zakharov, 2020).





*Рис.9. Распределение уклонов между парами точек: а) уклоны между точками 1 и 6, (расстояние 283 мм) б) уклоны между точками 11 и 1, (расстояние 253мм).*

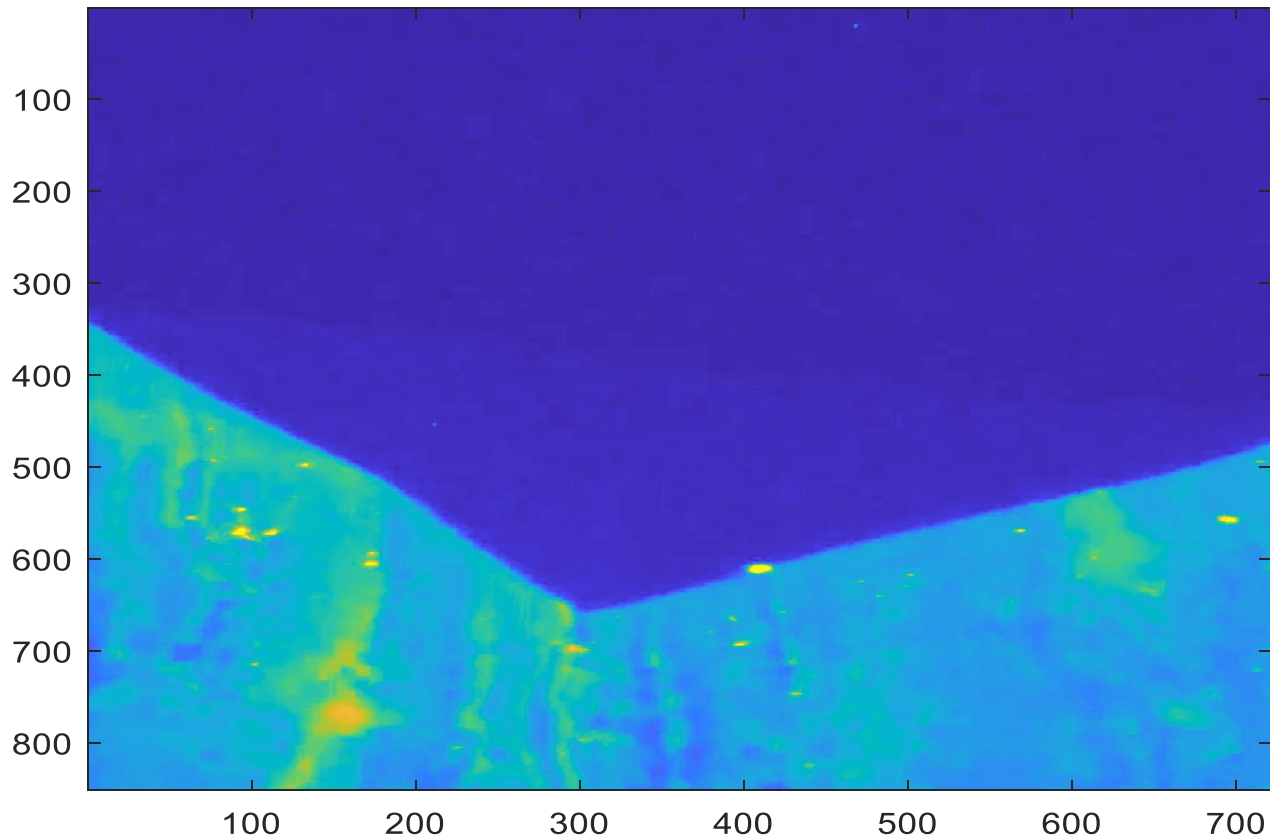
Так, уклоны между точками 1 и 6, (рис.9а) имеют дисперсию  $\sigma_{1,6} = 0.0763$ , а дисперсия уклонов между точками 11 и 1 (рис.9б), составляет  $\sigma_{11,1} = 0.0524$ . Различие дисперсии уклонов обусловлено различием направлений измерений по отношению к направлению основных ветровых волн. Это согласуется с результатами измерений Кокса-Манка.



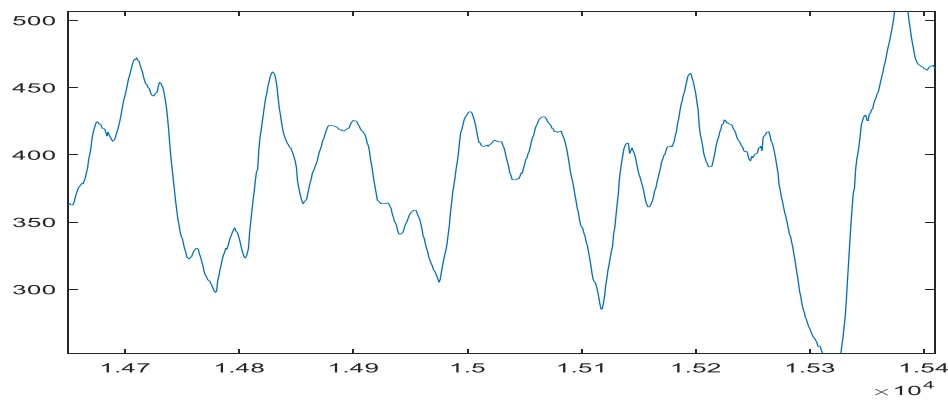
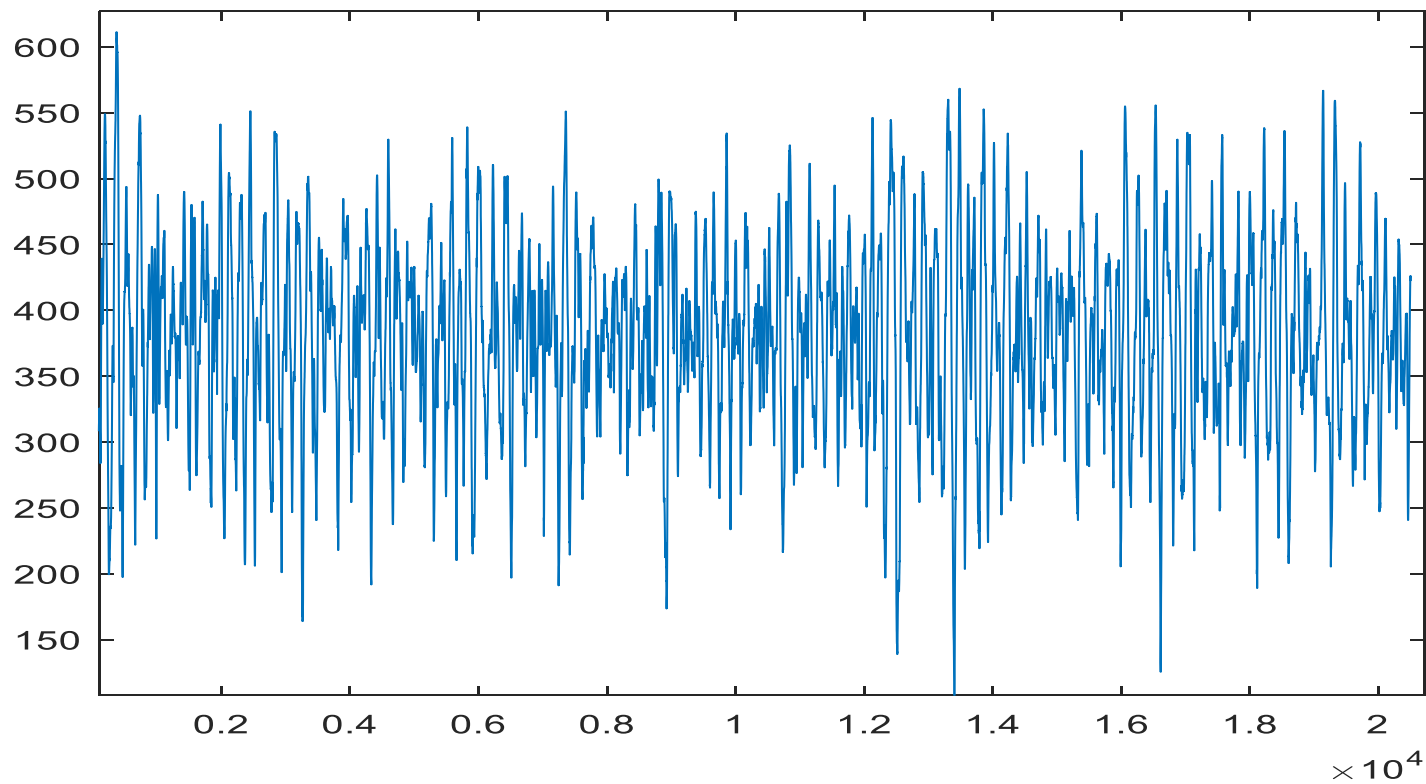
*Рис.10. Двумерное распределение уклонов на треугольниках различного масштаба: а) стороны прямоугольника 283\*253мм, б) прямоугольник 54\*56 мм*

Из приведенных распределений видны известные закономерности уменьшения анизотропии и увеличения дисперсии с уменьшением масштаба выбранных треугольников на морской поверхности.

# Измерение капиллярных волн на морской платформе, пгт. Кацивели 2021

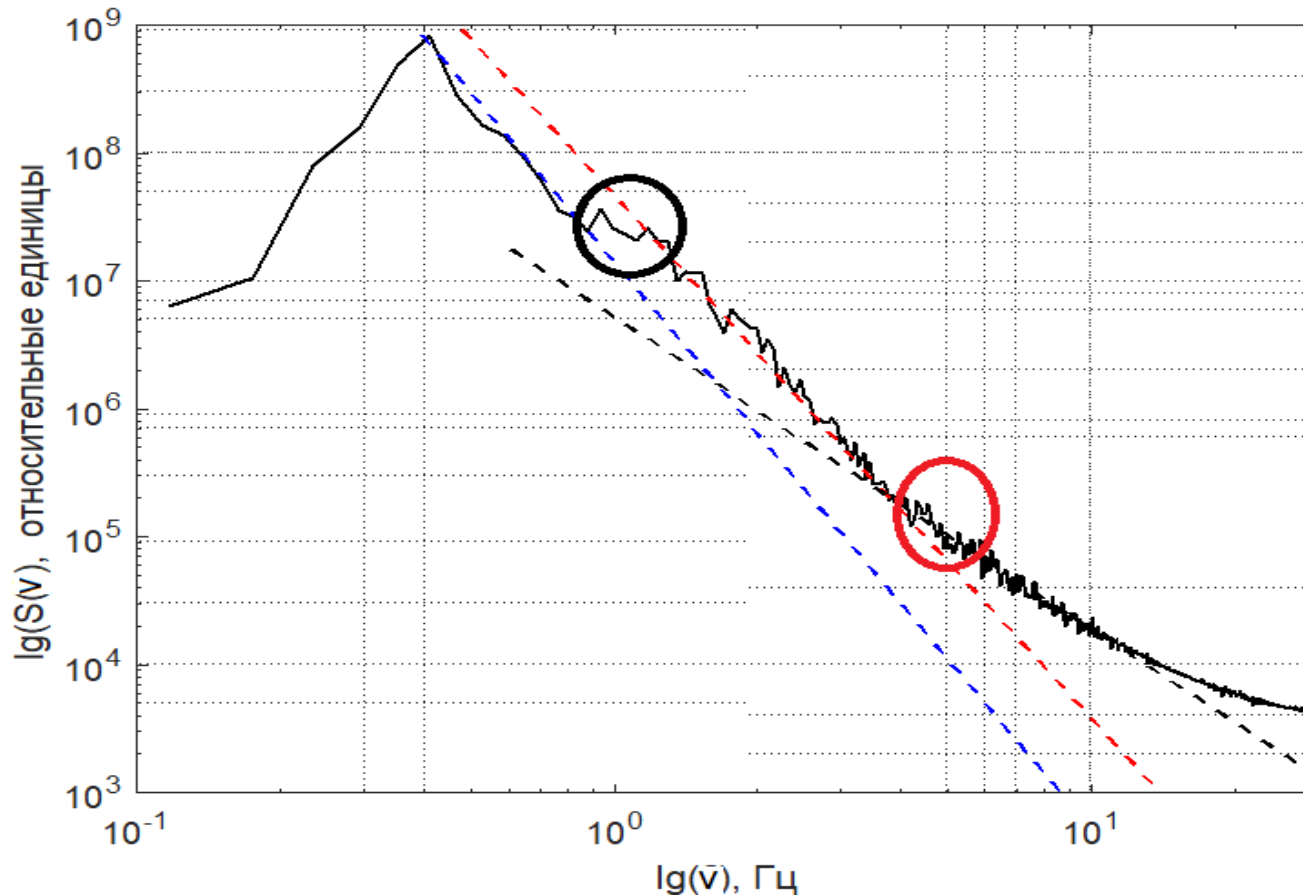


Измерения волнения 26 августа 2021 20:47 мск на платформе. Частота оцифровки-60 Гц. Возможны измерения как временных, так и пространственных спектров. Ряды данных для одной реализации состоят из 21 600 «мгновенных» спектров.



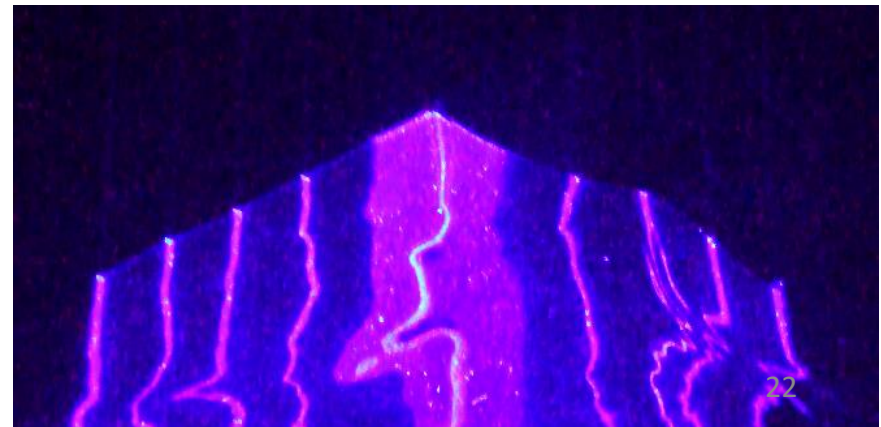
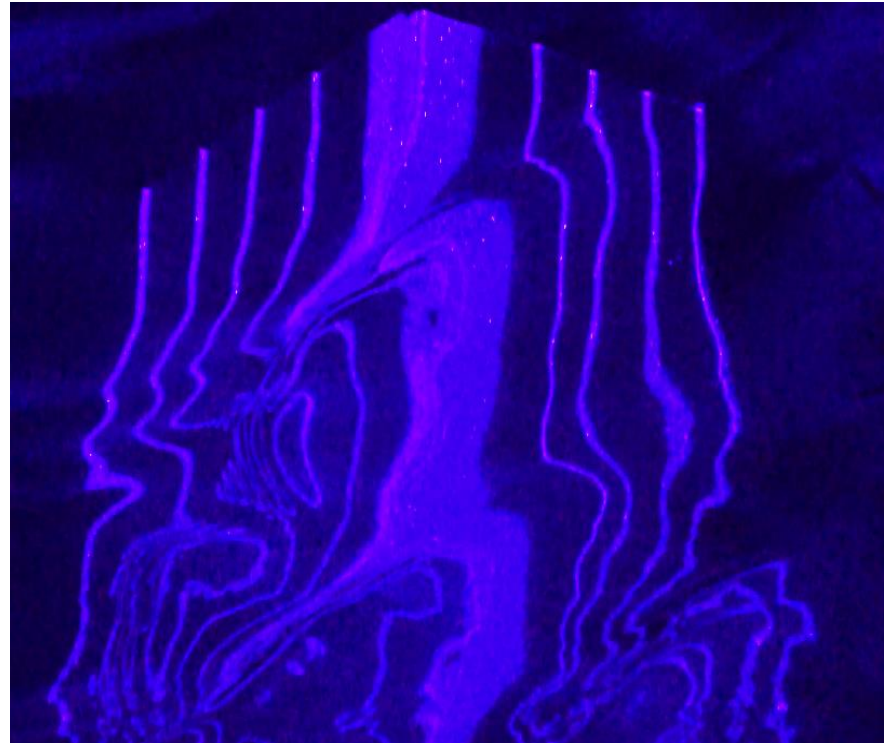
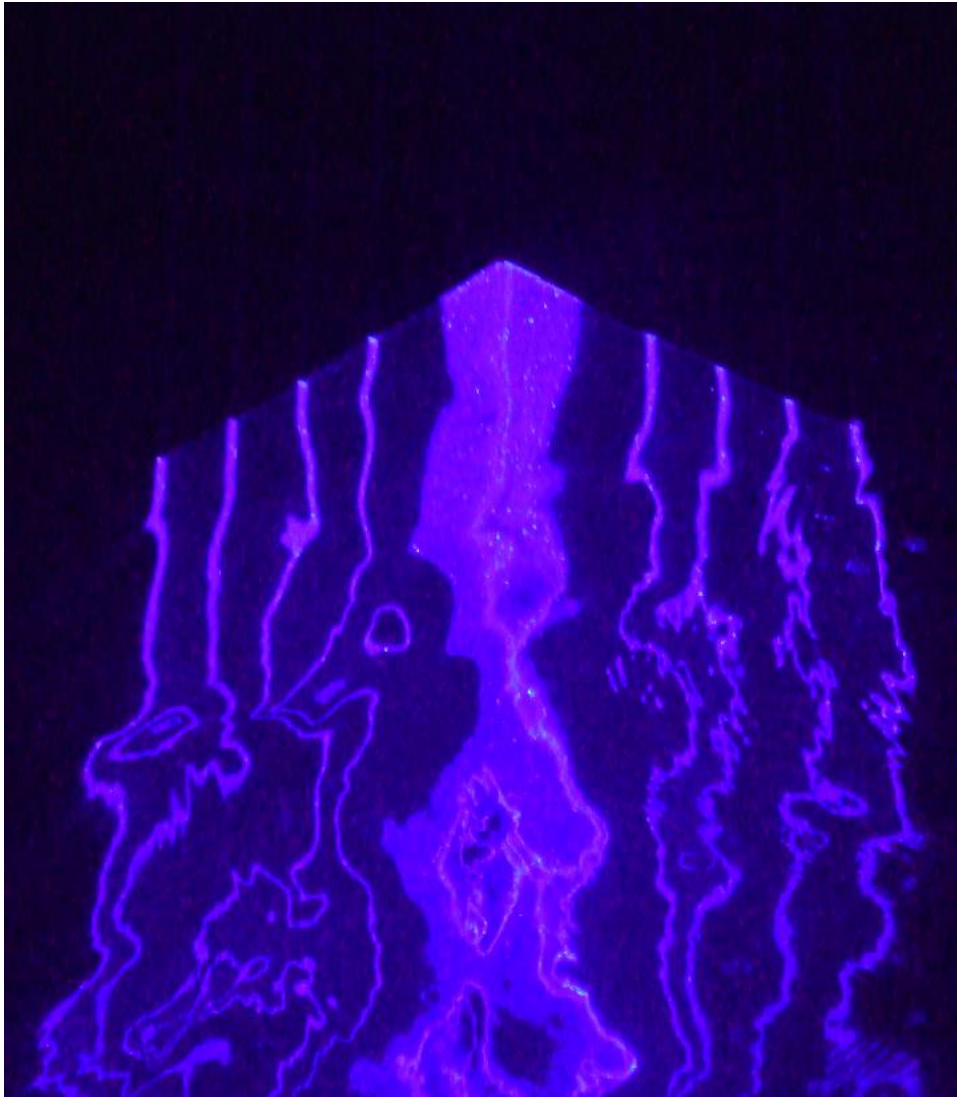
Зависимость положения границы раздела для одной точки траектории.  
Длина выборки - 21600 точек

# Спектр возвышений



Спектр возвышений в отдельной точке профиля в логарифмическом масштабе для развивающегося волнения 26.08.2021. Кацивели. Показатели степени на первом, втором и третьем (капиллярном) участках составляют:  $4,5 \pm 0,3$ ;  $4,0 \pm 0,2$ ;  $2,6 \pm 0,2$ .

# Новый метод



По степени смещения относительно невозмущенного изображения, по-видимому, можно восстановить уклон поверхности в точке, через которую луч идет в видеокамеру. Если таких лучей будет несколько, как на рис.2, то можно будет восстановить форму участка морской поверхности, который находится напротив лучей. В этом заключается идея метода

# Постановка обратной задачи восстановления профиля морской поверхности $Z(x,y,t)$ по видео изображению лазерных лучей

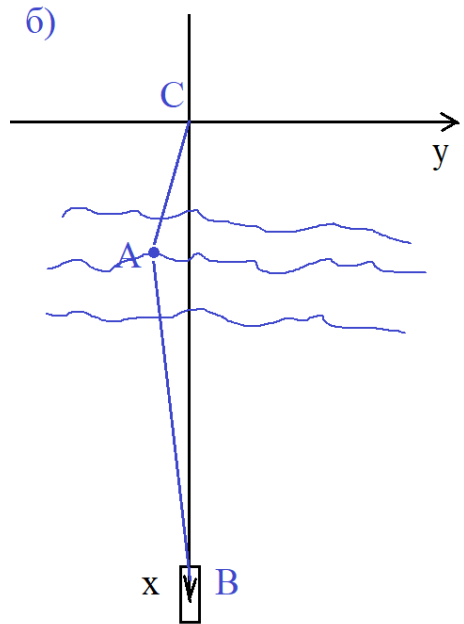
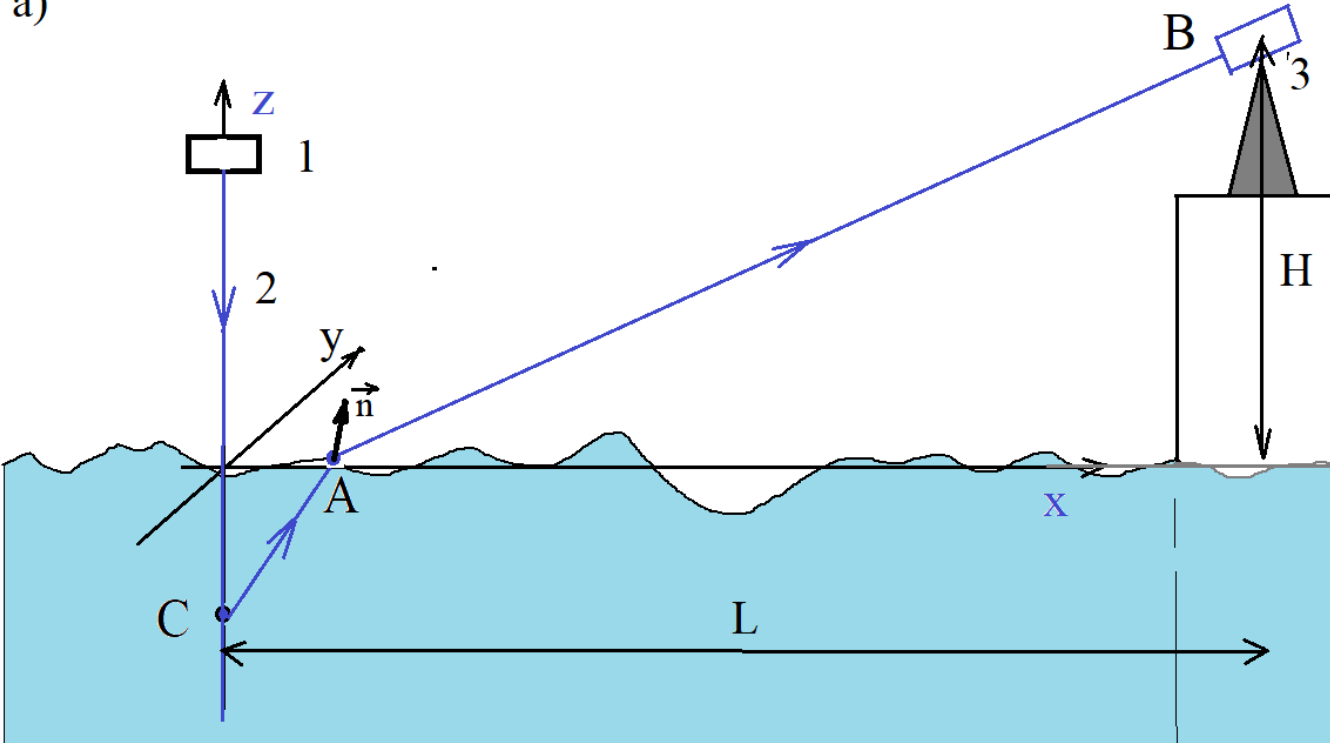
**Дано.** Пусть имеется один луч, который упав на поверхность раздела в воде распространяется вертикально вниз. Известна калибровка видео изображения, что позволяет однозначно определить координаты  $x$  и  $y$  любой точки изображения. Известен профиль морской поверхности вдоль верхнего края изображения (по траектории сканирования или в точках сканирования), т.е. имеются граничные условия на краю изображения.

**Требуется:** по видео изображению луча получить максимальное количество информации о форме морской поверхности, через которую изображение луча регистрируется видеокамерой. Частной задачей является определение формы и параметров капиллярных цугов.



*Ход лучей через взволнованную морскую поверхность. а) разрез в плоскости  $xz$ , б) разрез  $yz$ .*

а)



Сканатор 1 направляет лазерный луч 2 на морскую поверхность. Светящаяся точка С формирует рассеянный луч СА, который после преломления попадает в точку В на объектив видеокамеры.

**Сложность поставленной задачи в том, что лазерный луч формирует линию. Уклоны морской поверхности вдоль линии наблюдения, (вдоль оси  $x$ ) приводят к смещению изображения по вертикали, (вдоль оси  $x$ ). То есть изображение линии смещается вдоль этой же линии, что невозможно зарегистрировать. По этой причине по лазерным хвостам сложно регистрировать уклоны по оси  $x$ .**

**Если вместо луча в воде будет находиться набор светящихся точек, например, светодиодов, опущенных в воду, то мы сможем регистрировать углы смещения по обеим осям  $x$  и  $y$ . Однако при этом возникают все сложности контактных измерений из-за необходимости погружения светодиодов в морскую воду, влияния конструкции на форму морской поверхности, влияние ветра, течения и др.**

# Решение прямой задачи основывается на простой геометрической оптике и законе преломления Снелля.

1. Ортогональность векторов  $\mathbf{n}_1$  – нормали к плоскости падения ABC и  $\mathbf{n}_2$  – нормали к морской поверхности, которая лежит в плоскости падения. (равенство нулю их скалярного произведения:

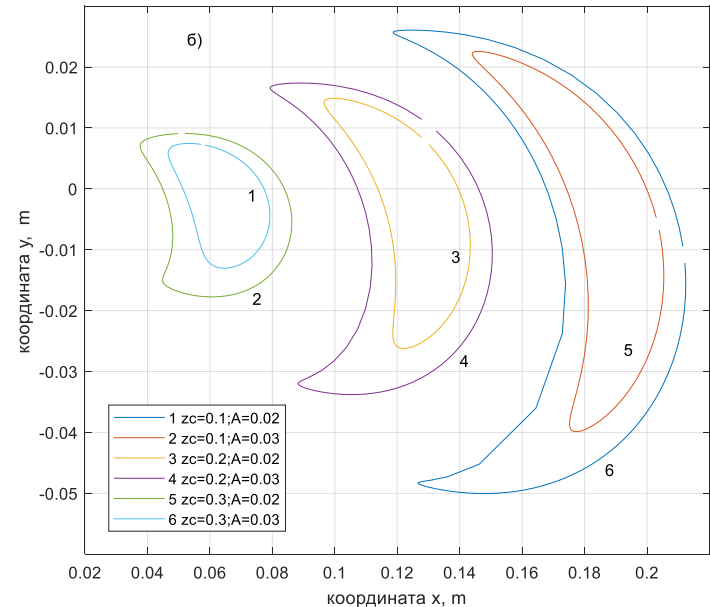
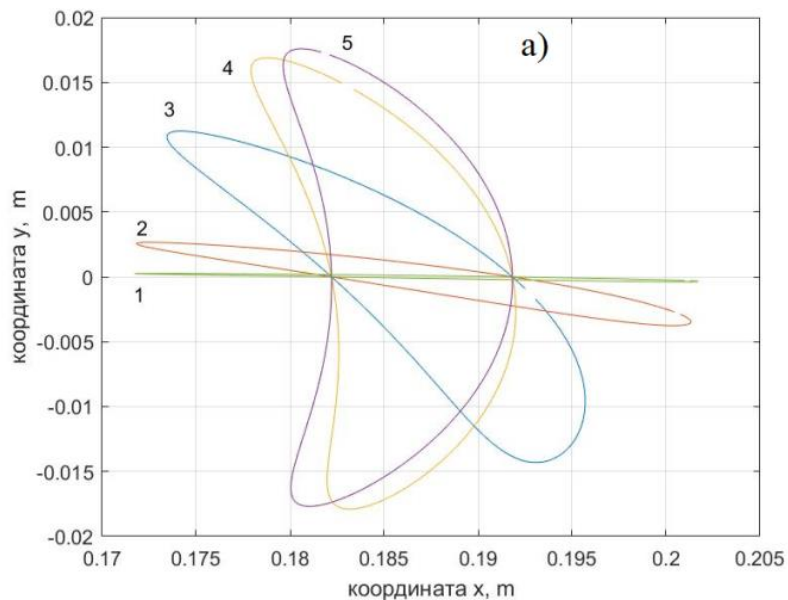
$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = 0 \quad (1)$$

2. Закон Снелля дает второе уравнение:

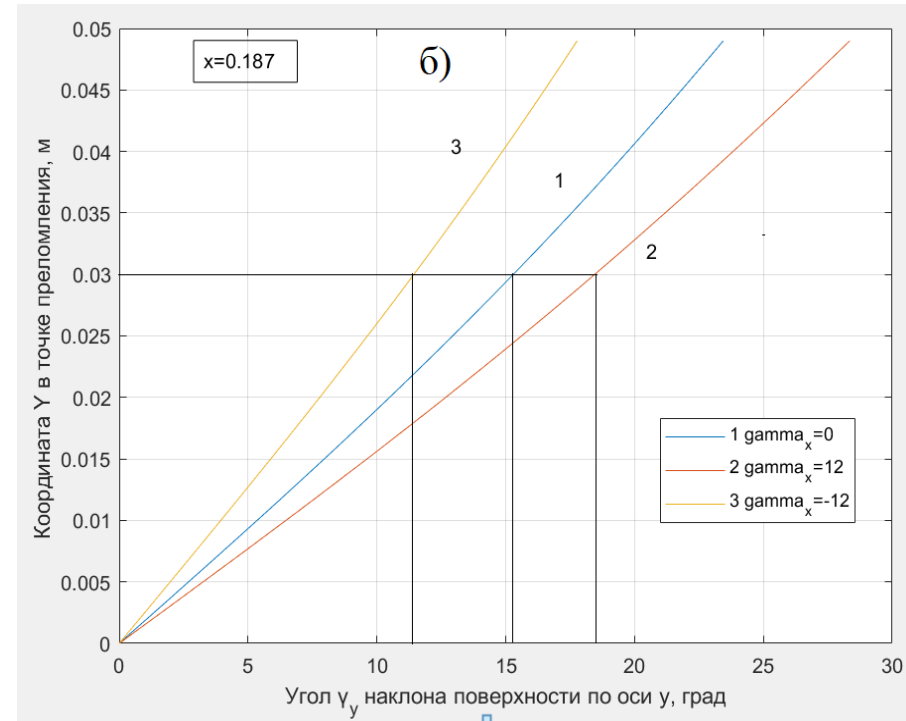
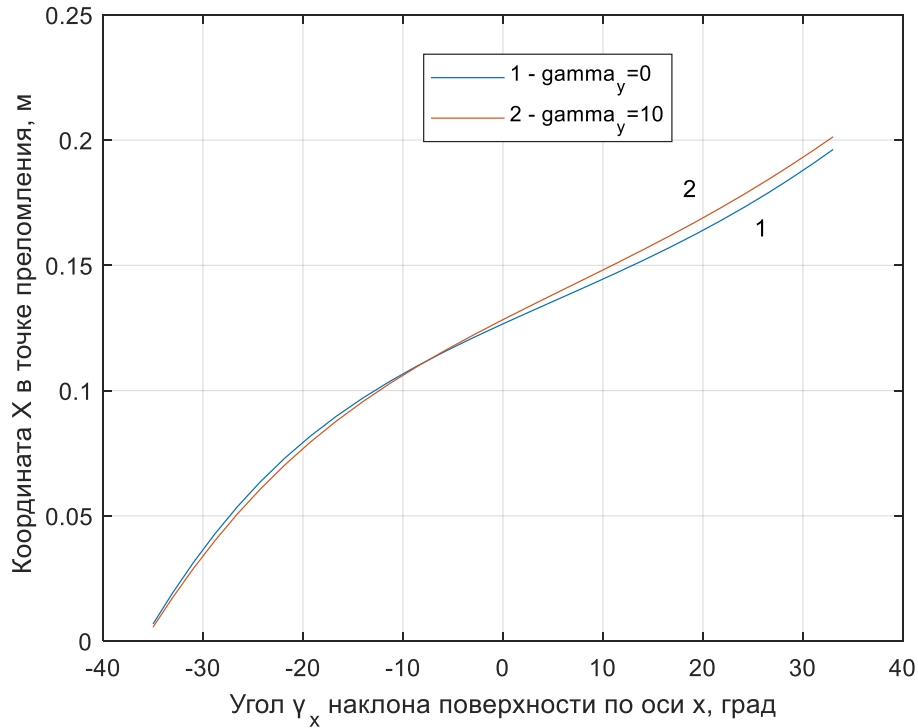
$$n \cdot \sin(\alpha_{\text{пад}}) = \sin(\alpha_{\text{пр}}) \quad (2)$$

Итого переменными являются пять величин:  $-z_s$ ,  $x$ ,  $y$ , углы  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$ . Из двух уравнений (1) и (2) мы можем вычислять две переменные, если заданы три остальные переменные.

**Прямая задача 4.** Пусть светодиод находится на заданной глубине  $z_c=0.3$  м, а по поверхности под определенным углом  $\alpha$  по отношению оси  $x$  распространяется гармоническая волна заданной амплитуды  $A_0$  и заданной длины волны  $\lambda$ . Следовательно, форма поверхности в точке  $A=(x,y,z)$  имеет вид:  $z = A_0 \cdot \sin(k_x \cdot x + k_y \cdot y + \varphi_0)$ , где  $k_x = (2 \cdot \pi / \lambda) \cdot \cos(\alpha)$ ;  $k_y = (2 \cdot \pi / \lambda) \cdot \sin(\alpha)$ . Необходимо найти смещение точки  $A=(x,y,z)$  (изображения светодиода) при перемещении волны по поверхности, которое зададим изменением  $0 < \varphi_0 < 2\pi$ .



**Рис.5.а)** Перемещение изображения светящегося диода с глубины 0.3 м при прохождении гармонической волны  $\lambda=50$  см с амплитудой 7,5 мм в различных направлениях  $\alpha$  относительно оси  $x$ : 1  $\alpha=1^\circ$ ; 2  $\alpha=10^\circ$ ; 3  $\alpha=80^\circ$ ; 4  $\alpha=89^\circ$ . **б)**  $\alpha=45^\circ$ ;  $\lambda=50$  см, амплитуда  $A$  волны и глубина светодиода  $z_c$  указаны в легенде.

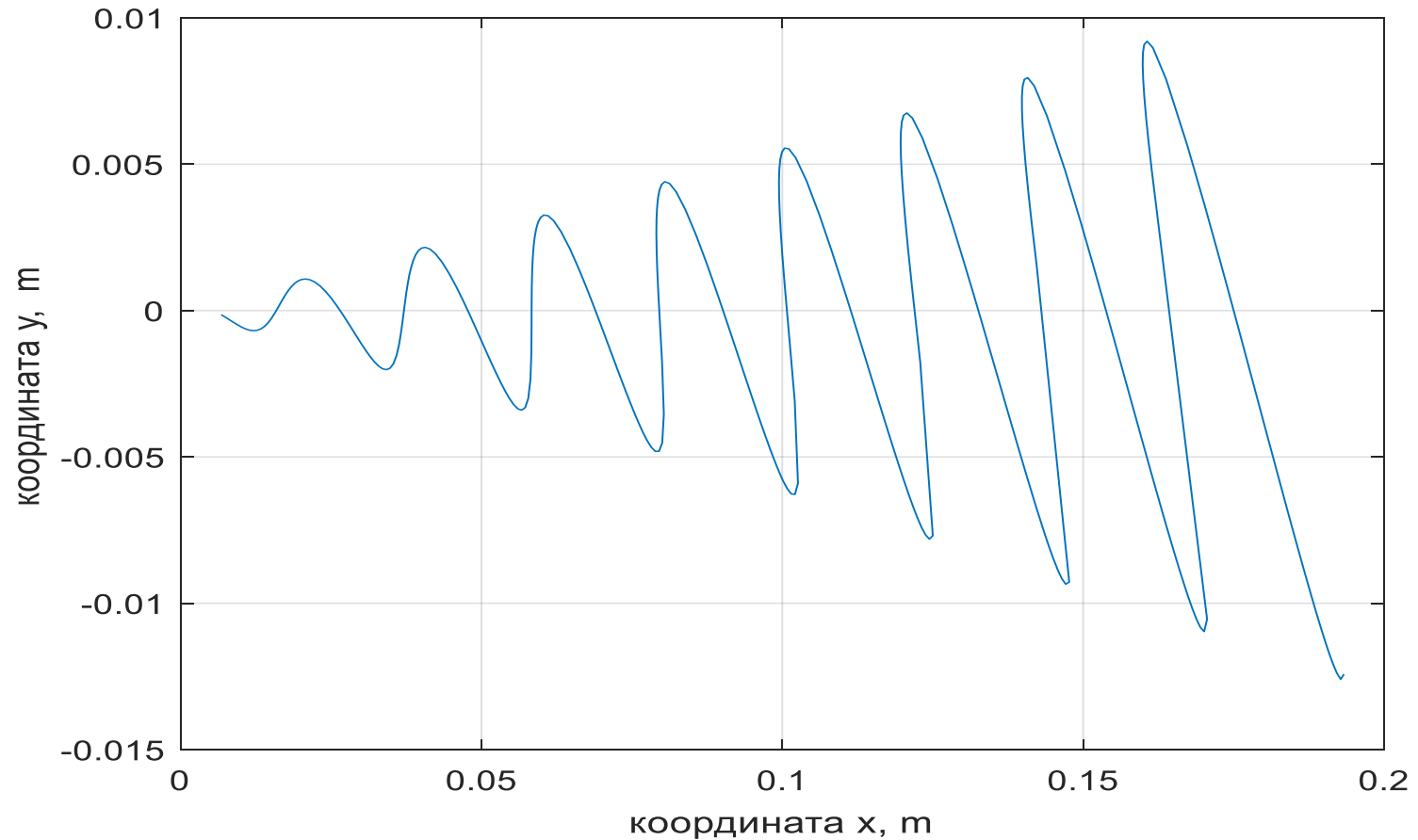


*. а) кривая 1 - зависимость координаты x светящейся точки А от уклона  $\gamma_x$  морской поверхности при глубине светодиода  $z_c=0,2$  м и - отсутствии уклона по оси y; кривая 2 то же при  $\gamma_y = 10^0$ .*

*б) зависимость смещения точки А по оси y от уклона  $\gamma_y$  по оси y. Уклоны по оси x указаны в легенде на графике.*

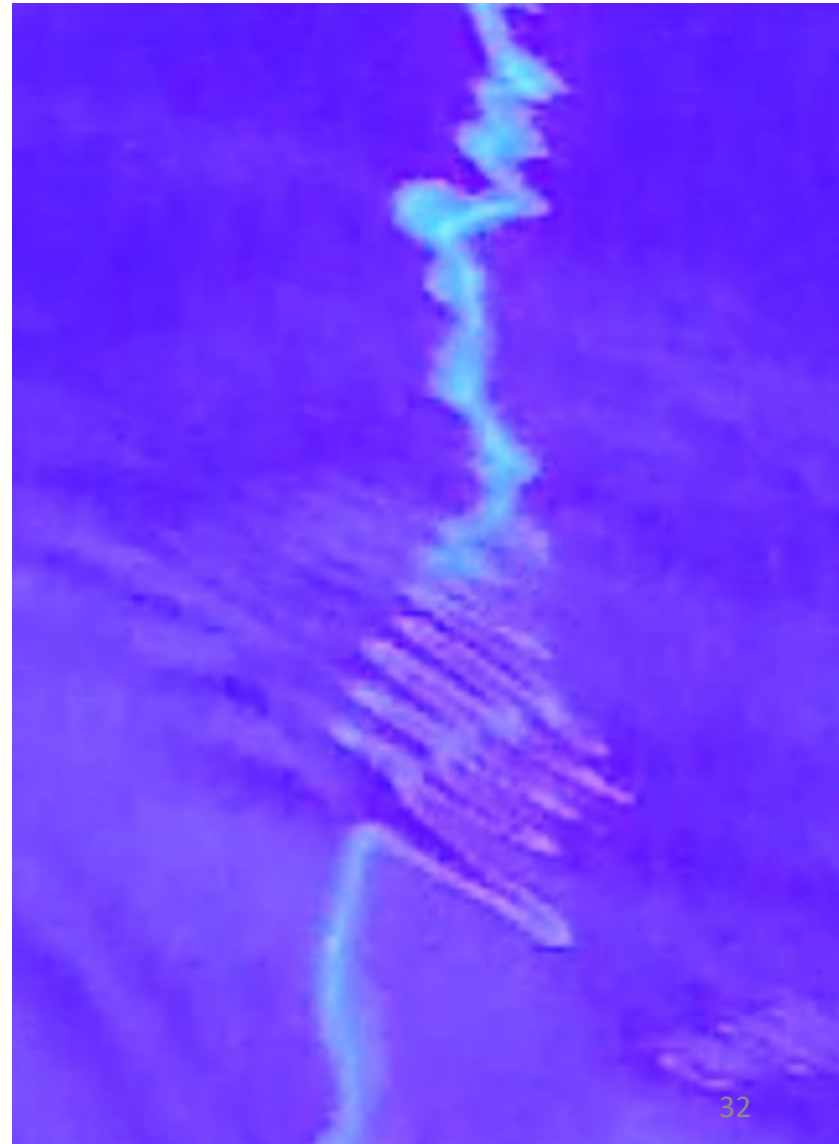
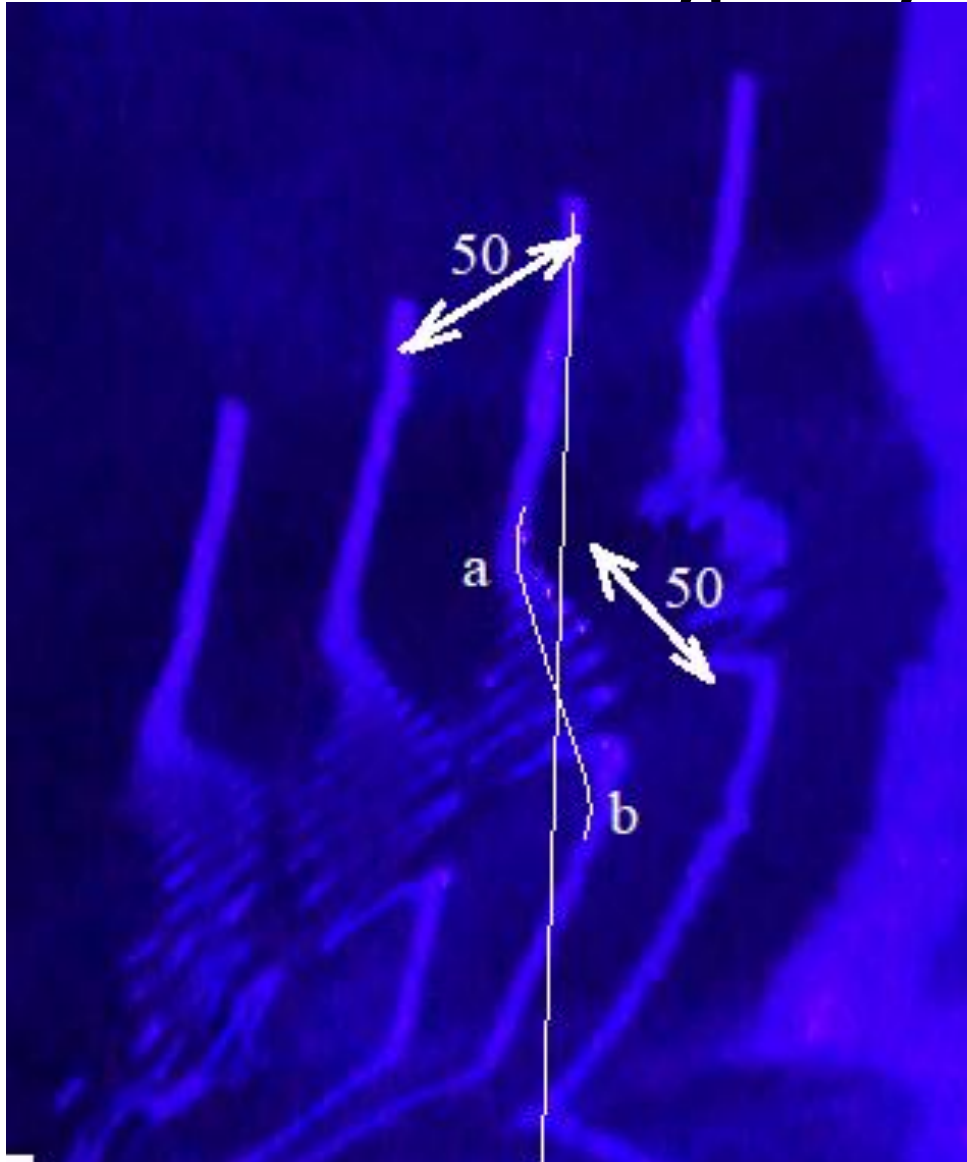
# Чувствительность метода

- Из рис.5 можно оценить чувствительность данного метода и его погрешности. Так зависимость смещения по оси  $y$  от уклона по этой оси для координаты  $x=0.187$  можно оценить соотношением:
- $y = 2.0 * \gamma_y$
- Где смещение луча  $y$  выражено в мм, а уклон  $\gamma_y$  выражен в градусах. Учитывая, что толщина лазерного луча составляет около 2 мм, ( $\sigma_y = 1\text{мм}$ ) получим, что чувствительность и точность определение уклонов составит половину градуса  $\sigma_\gamma=0.5^\circ$ .

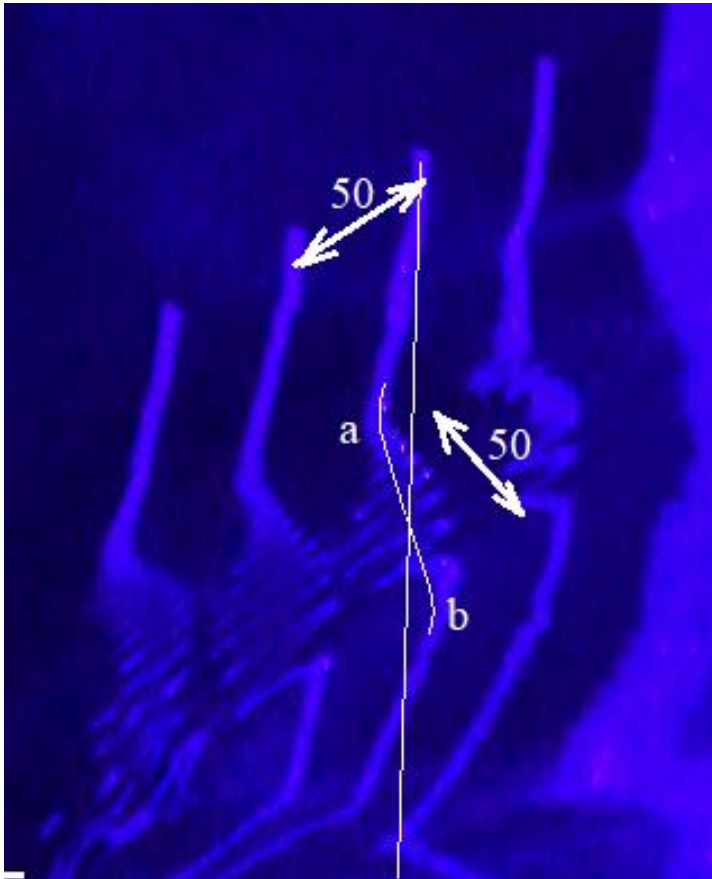


*Форма лазерного луча на морской поверхности при капиллярной волне  $\lambda=15$  мм,  $A=0,2$  мм, которая распространяется под углом  $\alpha=45^0$  по отношению к оси x.*

# Анализ капиллярных волн, полученных в натурных условиях

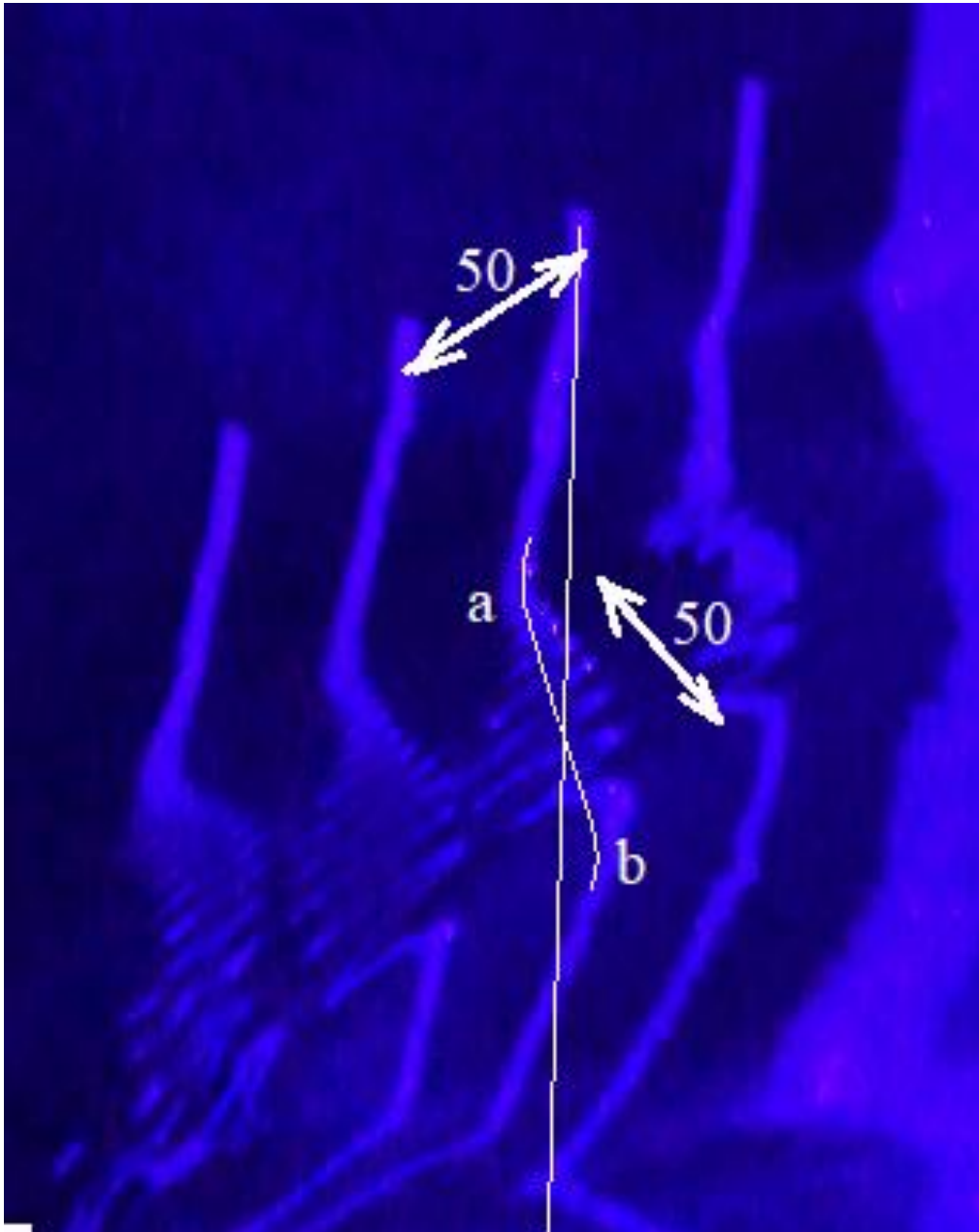






Длина капиллярной волны вблизи точки **b** составляет 14 мм, вблизи точки **a** она составляет 4 мм. Амплитуду капиллярной волны  $A$  можно оценить аппроксимируя ее синусоидой, (что не совсем верно) исходя из длины волны  $\lambda$  и максимальных уклонов по формуле  $\xi_{max} = A \cdot 2\pi/\lambda$ . Уклоны  $\xi_{max}$  поверхности по оси  $y$  мы можем оценить исходя из смещений лазерного хвоста от средней линии **ab**. Для точки **b** длина капиллярной волны  $\lambda=14$  мм, координата  $x=130$  мм, смещение  $y=25$  мм, уклон  $\xi_y = 18^\circ \pm 5^\circ$ .

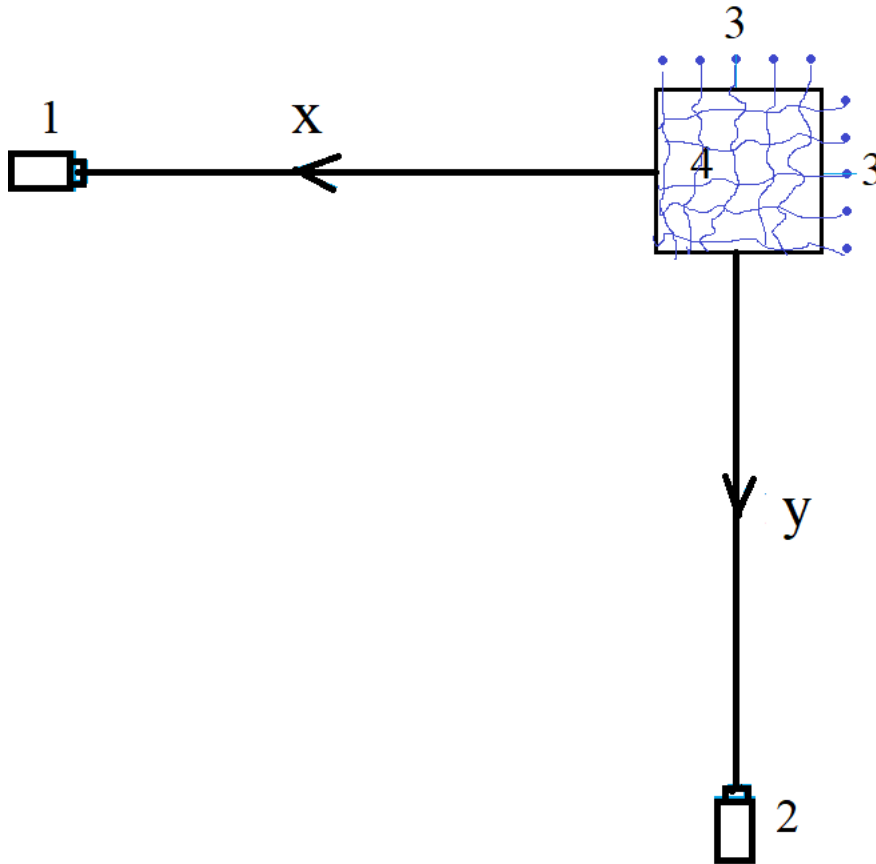
Без учета уклонов по оси  $x$  мы получаем амплитуду капиллярной волны  $A = \xi_y \cdot \frac{\lambda}{2\pi} = 0.6$  мм. Даже если уклон по оси  $x$  имеет аналогичное значение, то максимальный уклон и амплитуда волны будут в  $\sqrt{2}$  раз больше и составит  $A_b = 0.85$  мм. Это и есть оценка амплитуды волны в точке **b**. Аналогичные оценки амплитуды в конце капиллярного цуга, в точке **a**, дают значение амплитуды  $A_a = 0.08$  мм = 80 мкм.



Отметим, что смещения и уклоны по оси  $x$  на данном этапе мы определять не можем.

Даже частичное решение поставленной задачи уже позволяет исследовать динамику развития волнения, включая физику капиллярных волн. Например, на фотографии 8а видно, что данные капиллярные цуги формируются перед относительно длинной гравитационной волной с крутым верхним гребнем. Это следует из формы лазерной линии ниже капиллярного цуга *ab*.

# Модернизация метода, упрощение обратной задачи и повышение точности ее решения



Модернизация метода измерений заключается в использовании двух видеокамер 1 и 2, расположенных ортогонально друг к другу.

# Заключение

1. Сформулирована обратная задача восстановления мгновенной формы морской поверхности по видео изображениям лазерных лучей, падающих сверху вниз и преломленных на морской поверхности.
2. Проведен анализ показал чувствительность метода к уклонам на уровне 0.5 градуса.
3. Предложенный метод регистрации лазерных «хвостов» весьма эффективен для регистрации и определения параметров капиллярных волн. Чувствительность метода позволяет измерять капиллярные волны длиной волны до 4 мм и амплитудой колебаний в 50 мкм.
- 4. На взгляд авторов метод в определенной степени изящен: он позволяет регистрировать полную мгновенную форму капиллярного цуга в нескольких сечениях. Нам не известны другие методы, позволяющие проводить такой анализ.**
5. Задача в общем случае не решена.

Спасибо за внимание