



Натурные измерения капиллярных волн на морской платформе

Стерлядкин В. В. , Алиев Г.М., Рубан О.А.

*МИРЭА — Российский технологический
университет*

e-mail: sterlyadkin@mail.ru

Капиллярные волны

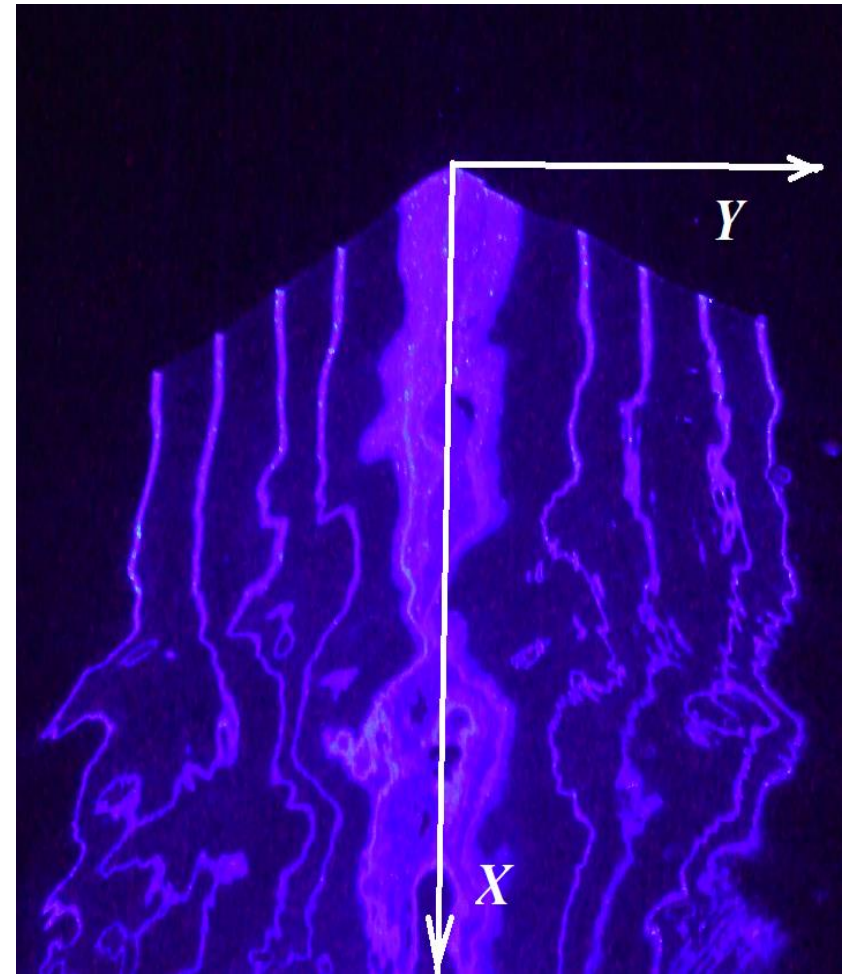
- Оказывают сильное влияние на рассеяние и излучение морской поверхности как в оптическом, так и в микроволновом диапазонах длин волн.
- Проблема слабо изучена, поскольку не было прямых методов регистрации капиллярных волн в натуральных условиях.
- Амплитуда менее 1 мм, нередко 0,1 мм. Длина волны 4-16 мм. Короткоживущие.
- Фундаментальная проблема.

Морская платформа в Кацивели, Крым



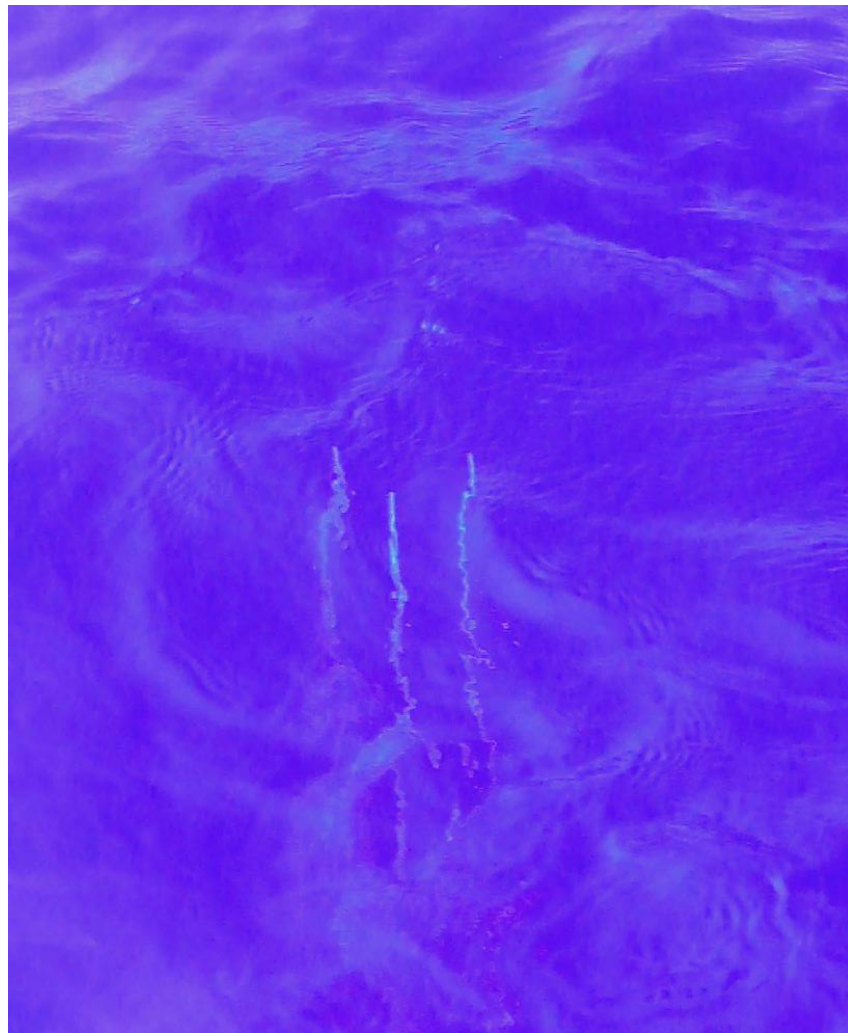
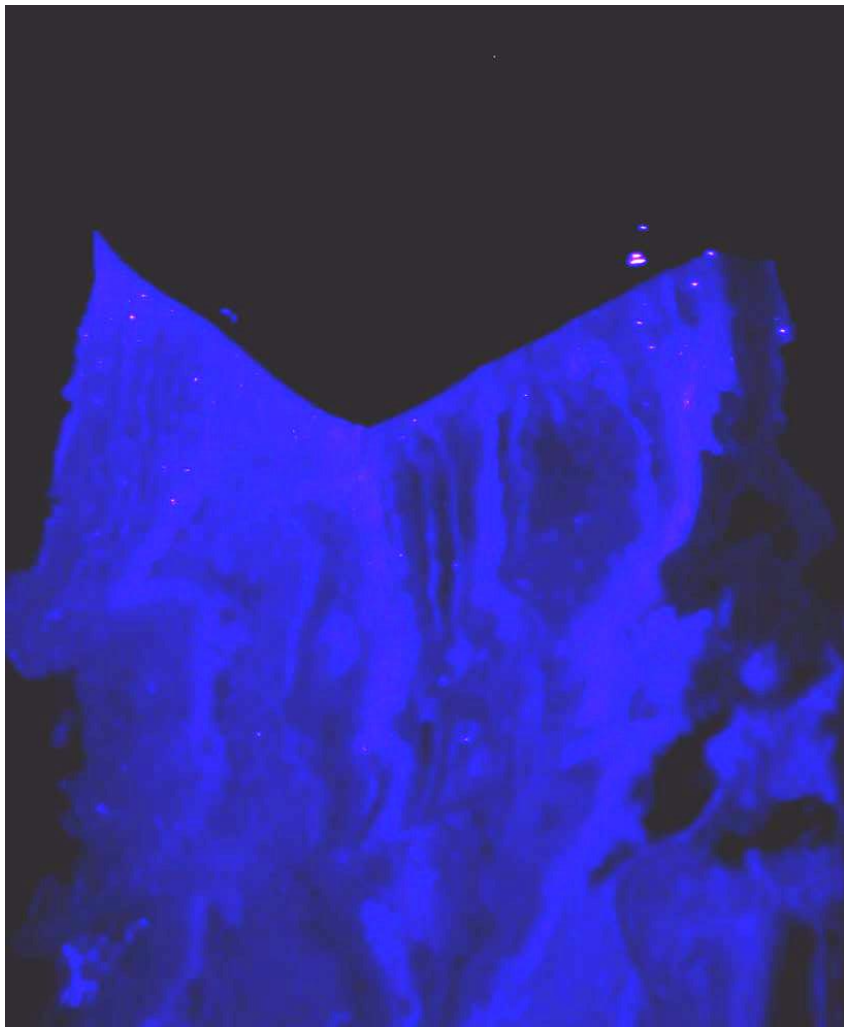
Место проведения натуральных измерения

МЕТОДИКА И СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

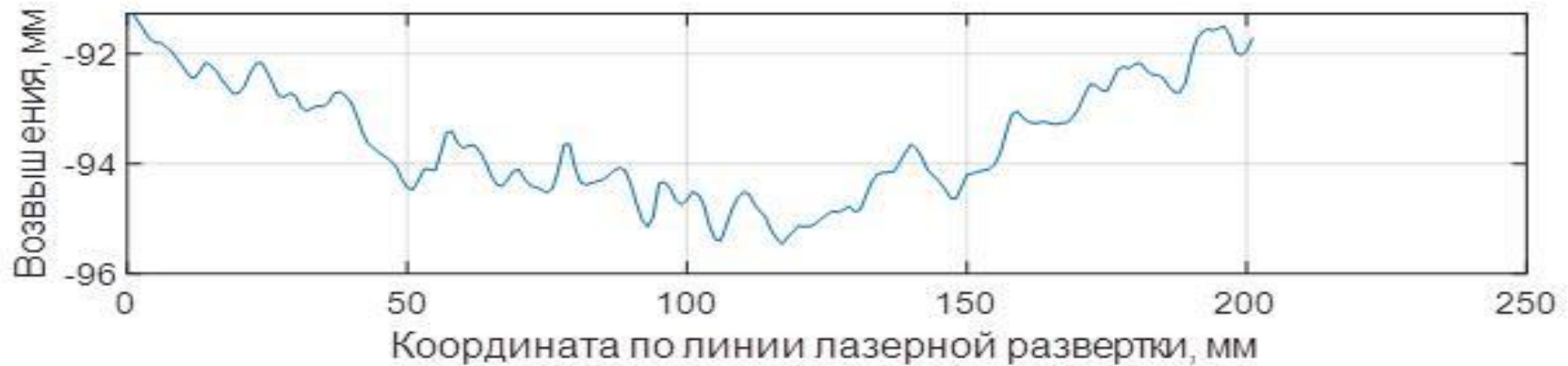


Лазерный луч направлен сверху вниз и сканирует морскую поверхность по заданной траектории. Верхняя граница лучей или занавески соответствует границе раздела,

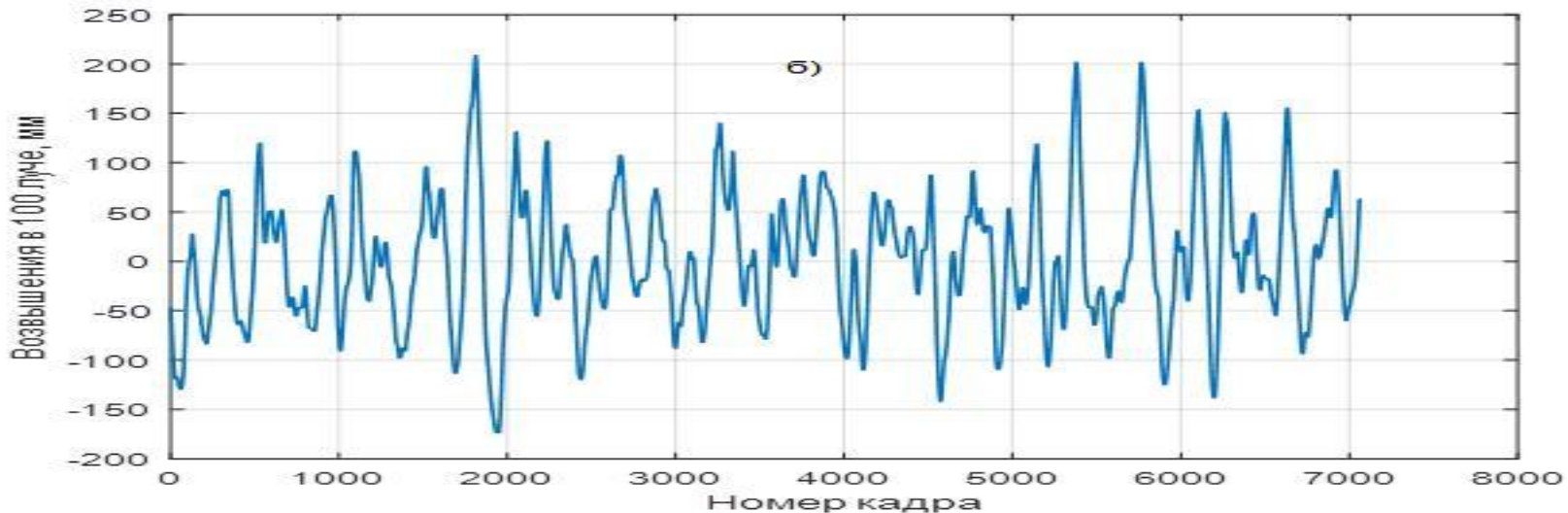
Измерения в различное время суток



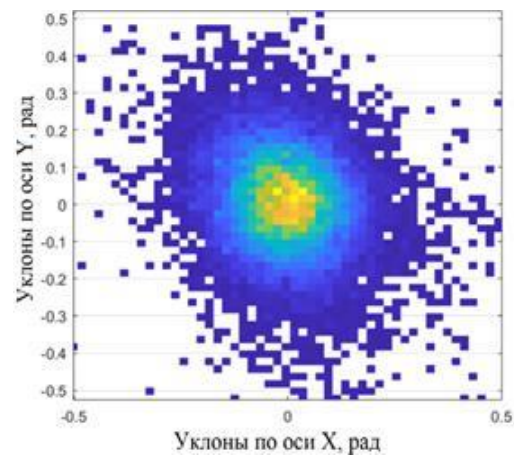
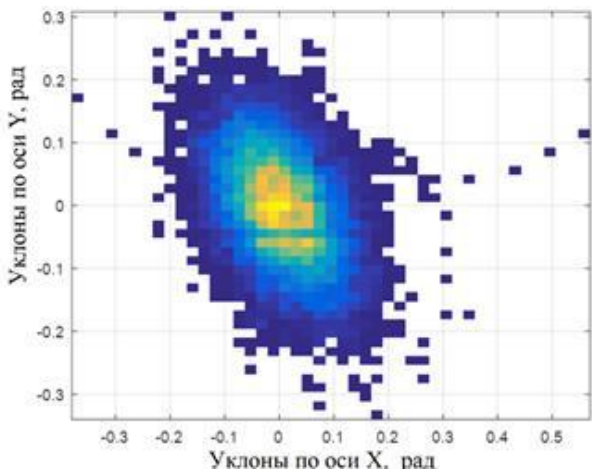
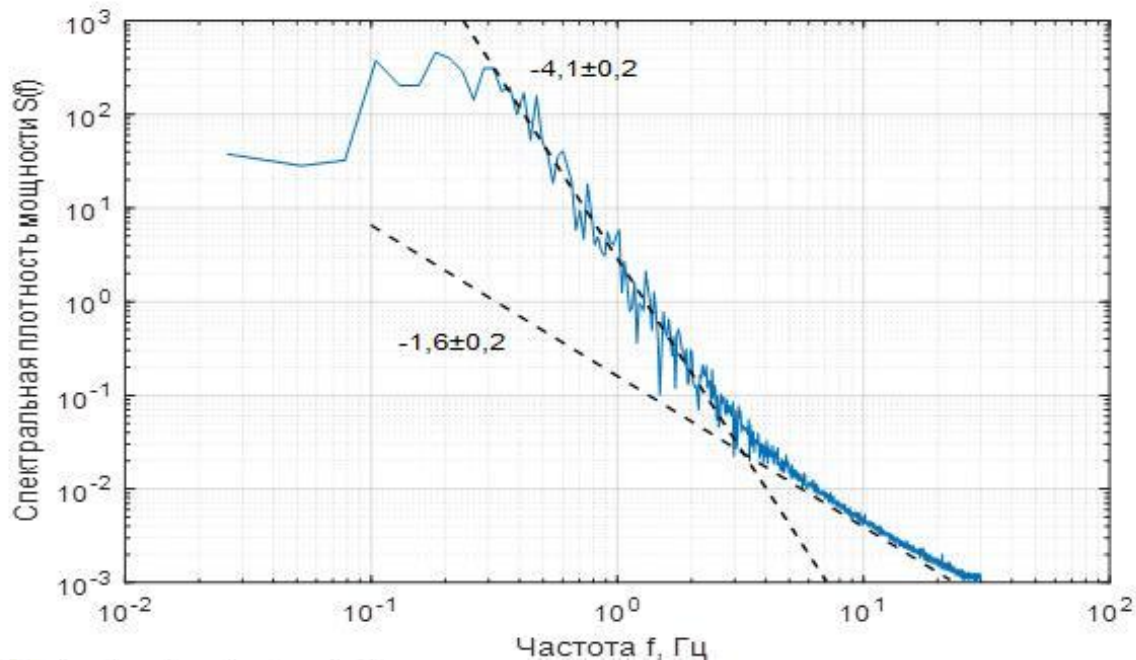
Возможно измерение пространственных профилей волнения, обновления с частотой работы видеокамеры 30-90 Гц



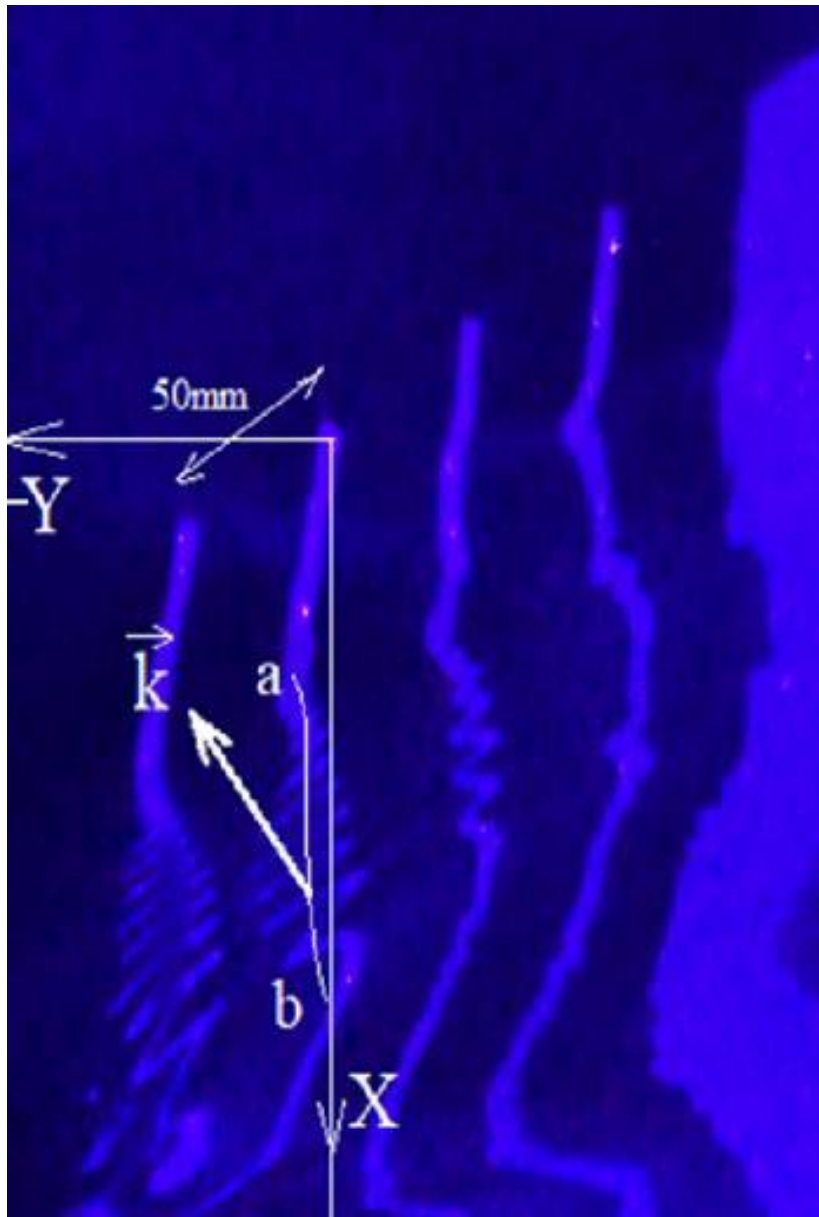
Возвышения в каждой точке профиля измеряются на каждом кадре. Точность до 0,4 мм, возможно повышение

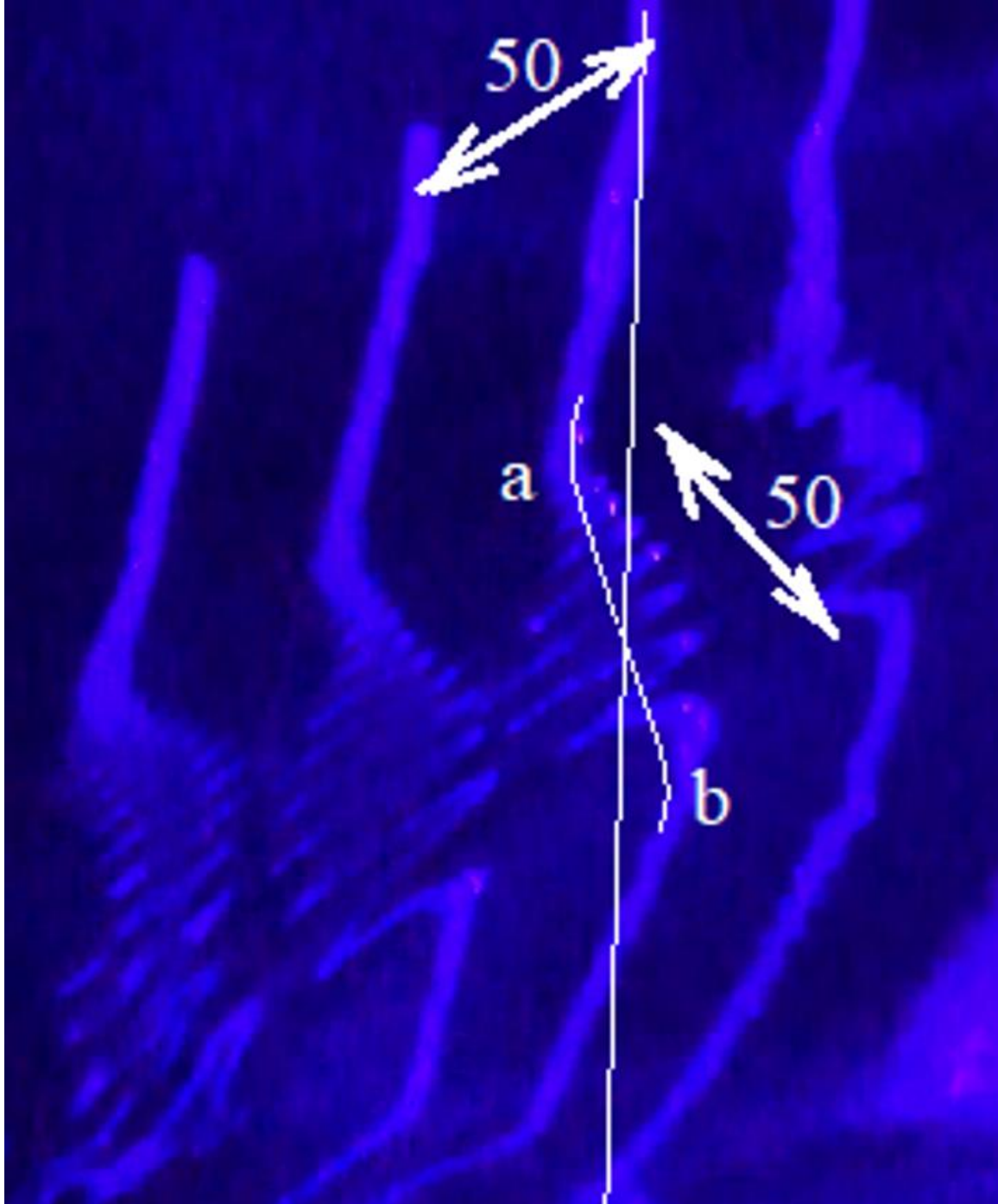


Расчет частотных временных спектров, двумерных уклонов на треугольниках различного масштаба



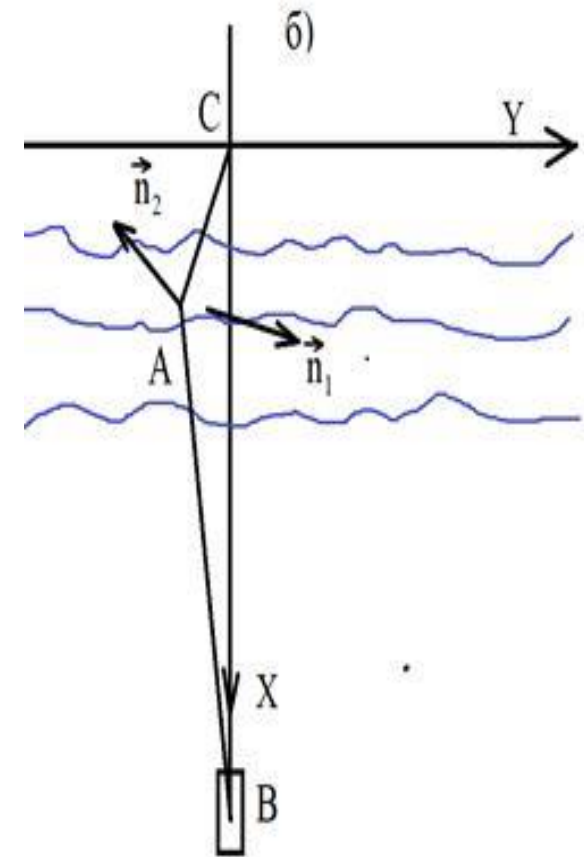
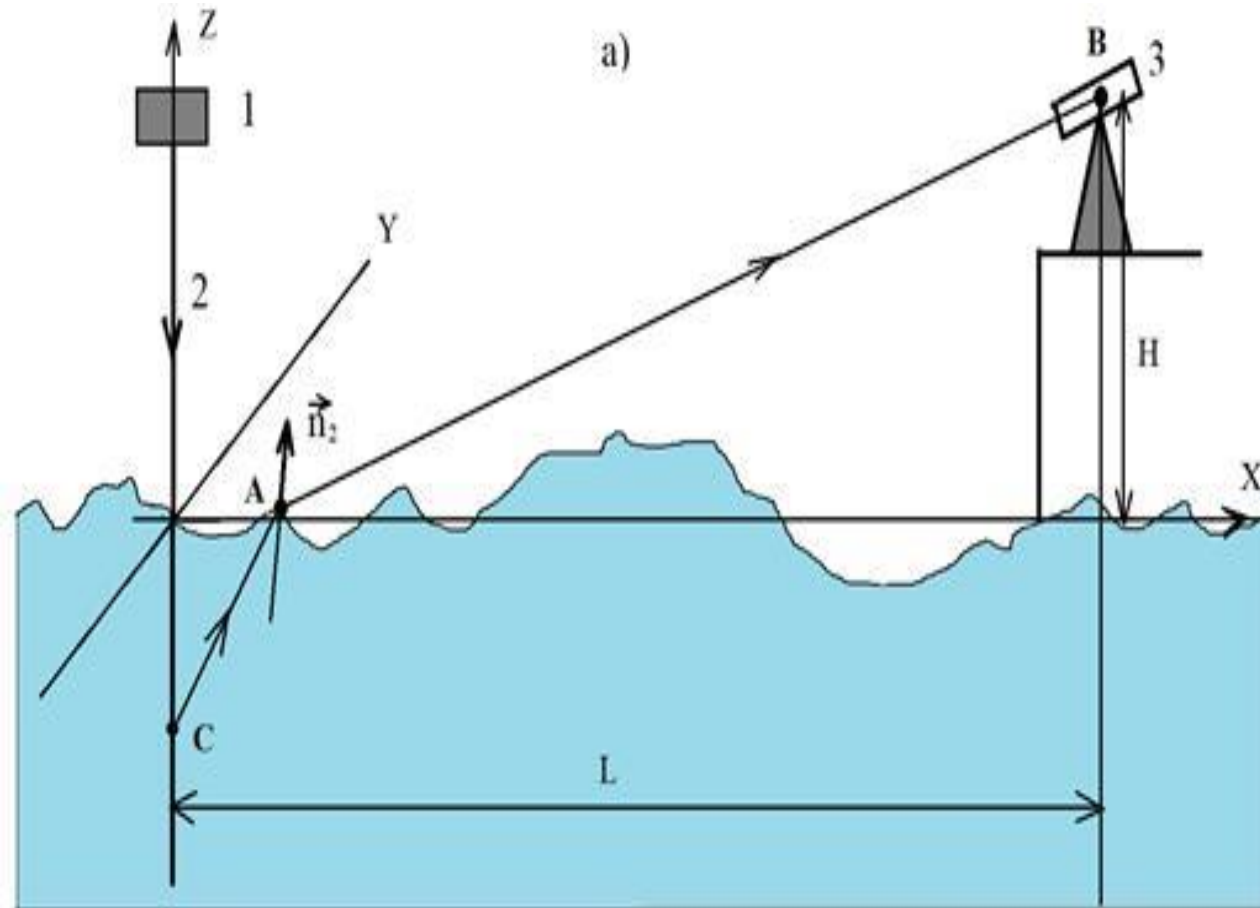
Капиллярные волны





Масштаб
50 мм.

Задача – определение уклонов по искажениям лучей на камере



Постановка задачи

$$(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2) = 0.$$

$$n \sin(\alpha) = \sin(\beta),$$

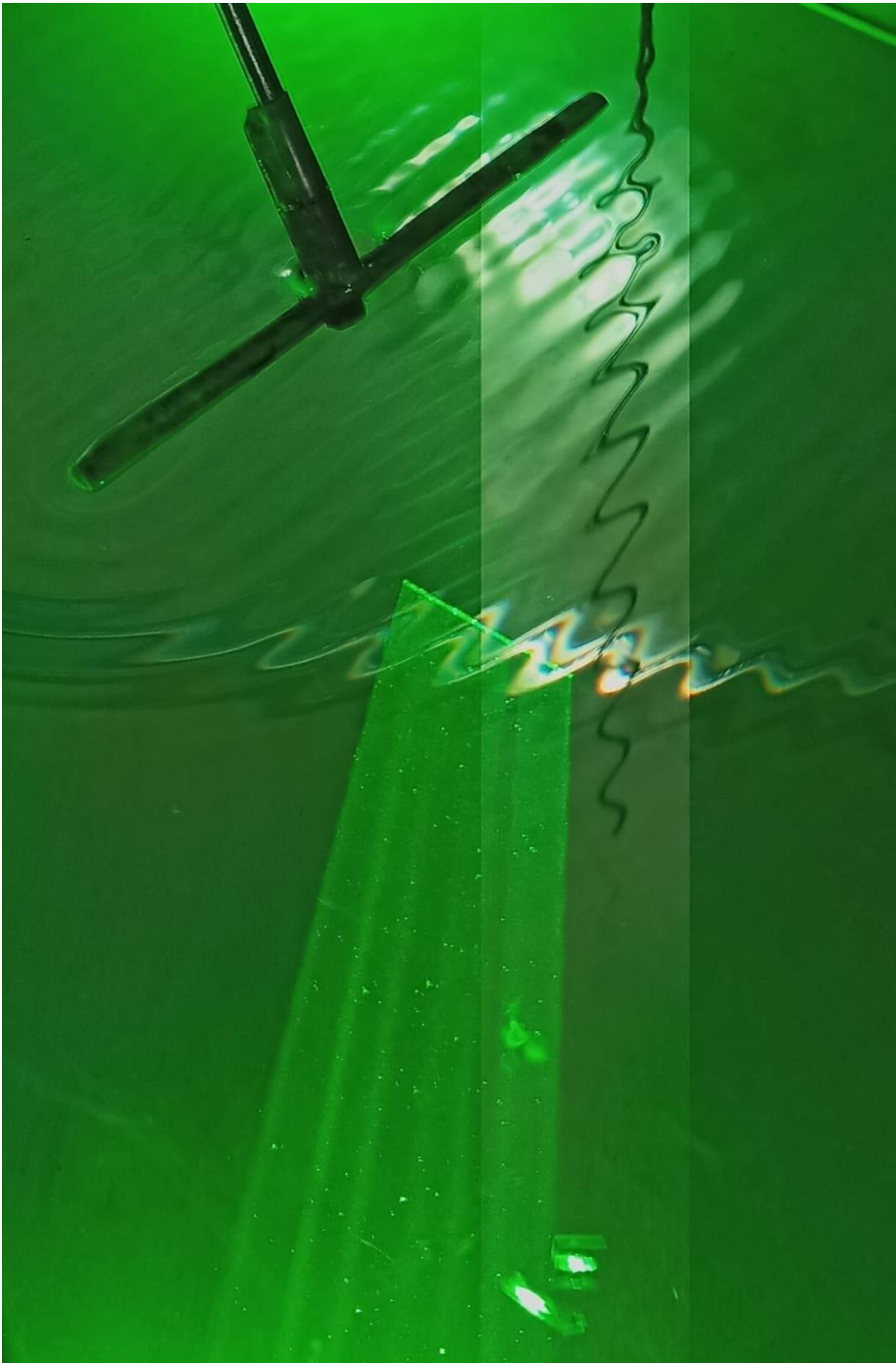
$$\sin(\alpha) = \frac{|\mathbf{CA} \times \mathbf{n}_2|}{|\mathbf{CA}|},$$

$$\sin(\beta) = \frac{|\mathbf{AB} \times \mathbf{n}_2|}{|\mathbf{AB}|}.$$

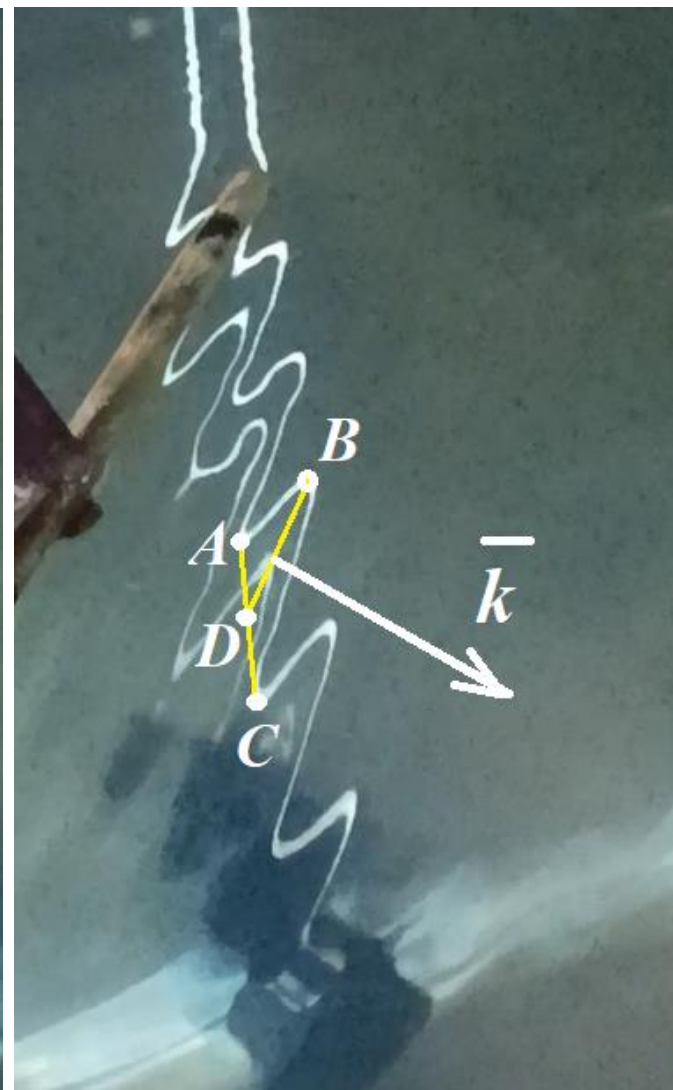
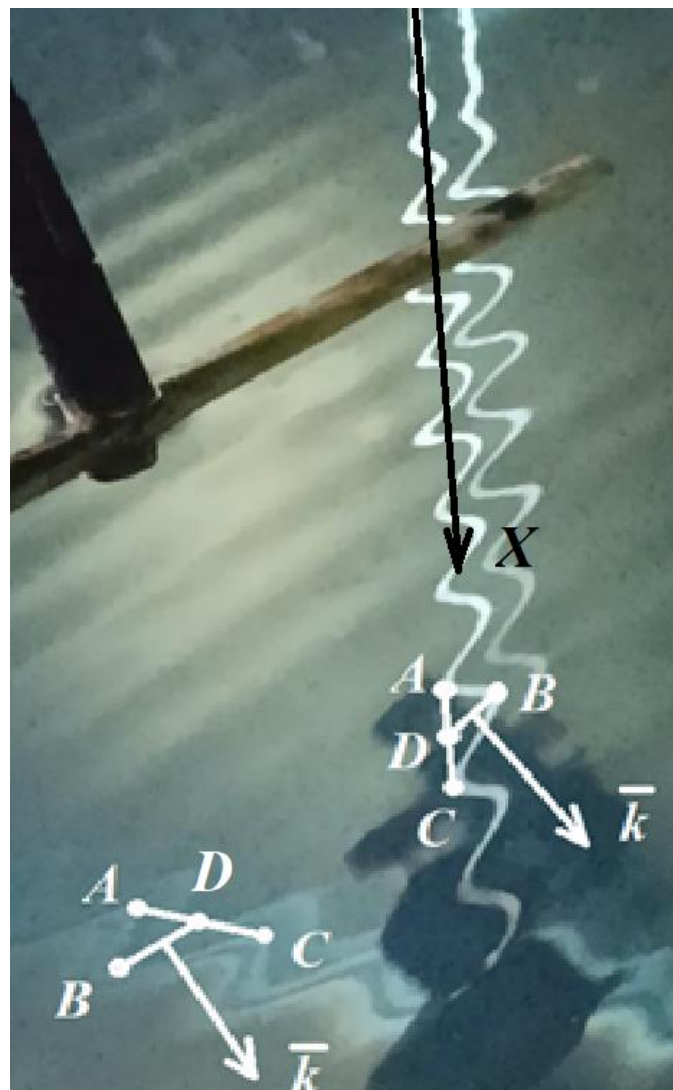
- \mathbf{n}_1 — единичный вектор, перпендикулярный плоскости ABC
- \mathbf{n}_2 — единичный вектор нормали к поверхности
- α — угол падения луча CA на поверхность; β — угол преломления

Sterlyadkin V.V. The Problem of Reconstructing the Profile of the Sea Surface from the Video Image of Laser Beams. *Oceanology*, 2024, Vol. 64, No. 3, pp. 342–352. ISSN 0001-4370

Лабораторные измерения капиллярных искажений



Лабораторные измерения капиллярных искажений



В приближении гармонической капиллярной волны в точках максимального отклонения лазерной линии от невозмущённой уклоны поверхности также максимальны по обеим координатам:

$$\xi_x^{\max} = Ak_x = Ak \cos(\theta), \quad \xi_y^{\max} = Ak_y = Ak \sin(\theta),$$

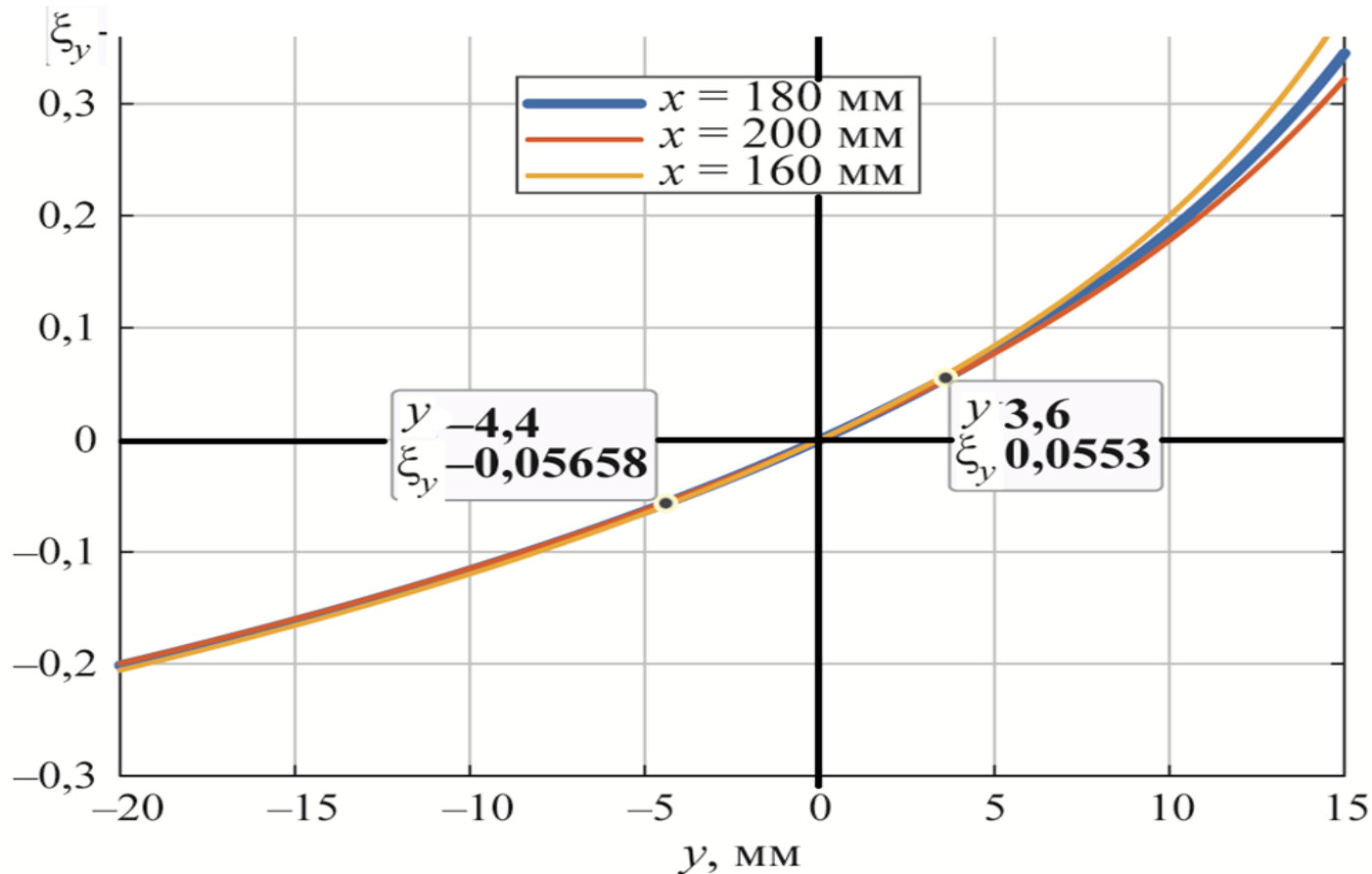
где A - амплитуду капиллярной волны, θ – угол между волновым вектором и осью X .

Данный факт позволяет получить третье уравнение, связывающее уклоны между собой:

$$\frac{\xi_y}{\xi_x} = \operatorname{tg}(\theta). \quad (3)$$

Таким образом, задача восстановления параметров капиллярных волн замыкается и для поиска трёх неизвестных — z_c , ξ_x , ξ_y — и мы имеем три уравнения.

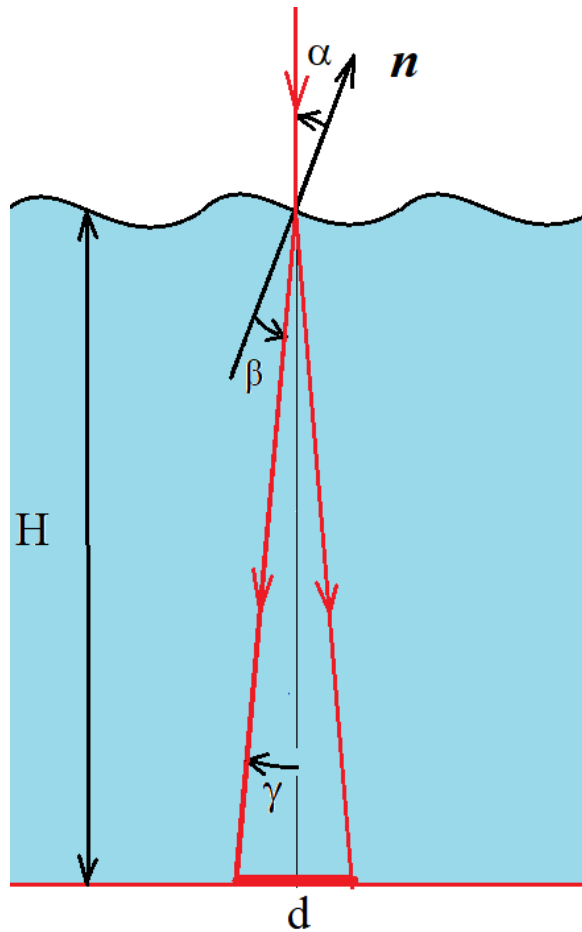
Интерпретация результатов лабораторных экспериментов



Зависимость уклонов ξ_y от отклонения y луча от невозмущённой линии при координате x , указанной в легенде. Угол θ между волновым вектором \mathbf{k} и осью X составляет 45°

$$\xi_{\max} = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2} = 0.078 \pm 0.016.$$

Проверки корректности решения обратной задачи



$$\operatorname{tg}(\gamma_{\max}) = \operatorname{tg}(\delta_{\max} - \beta_{\max}) = \frac{d}{2H}.$$

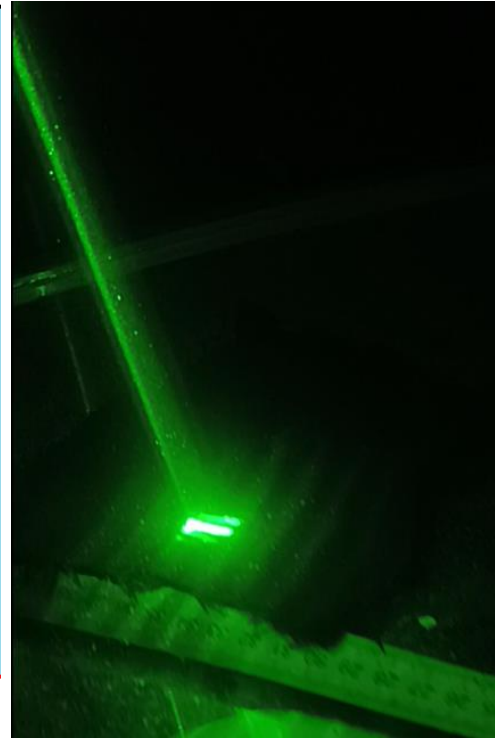


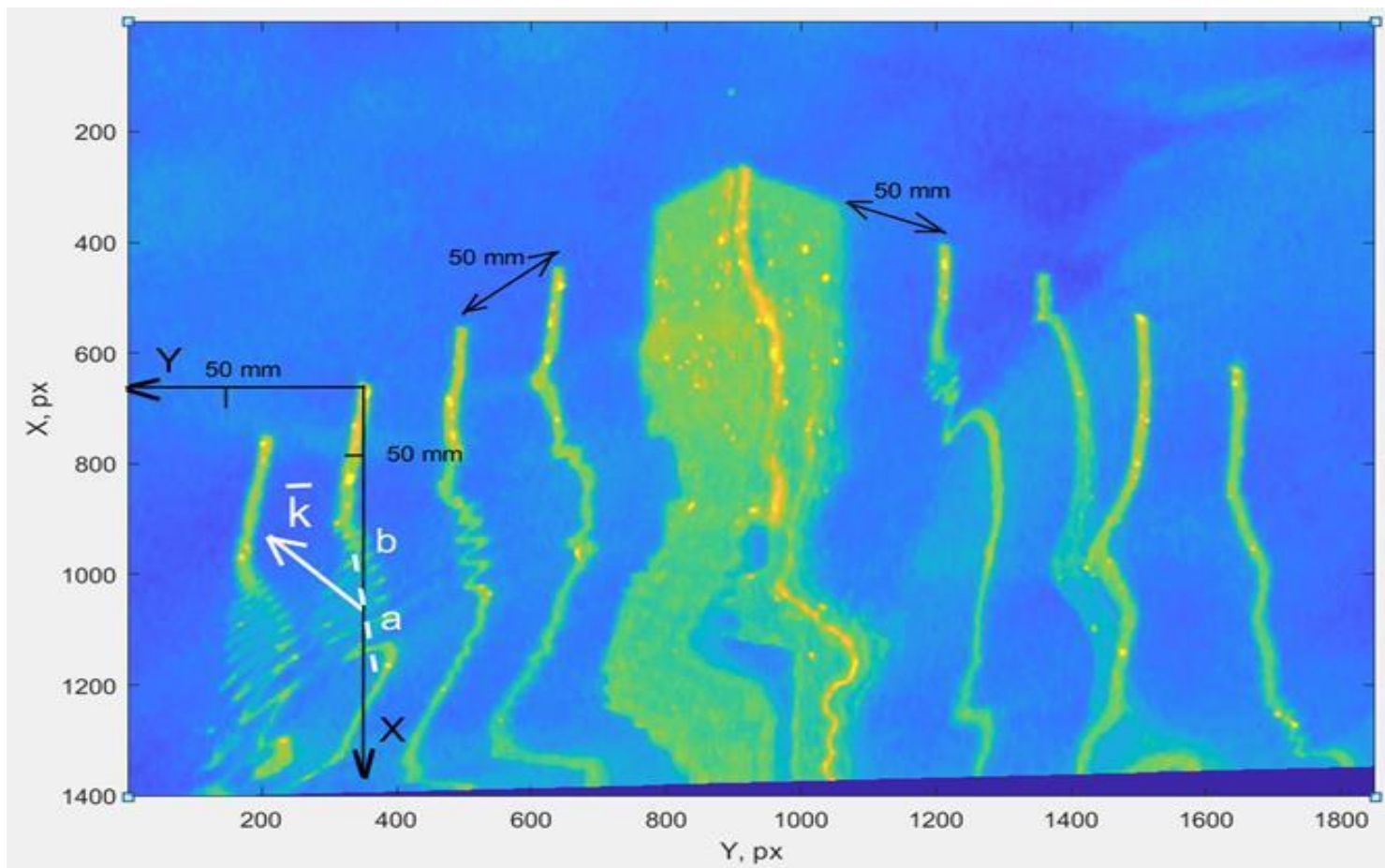
Схема измерения максимальных уклонов по отклонению луча на дне аквариума (а); видеокадр измерений, на дне расположена линейка и чёрная ткань (б)

Аппроксимируя форму волны синусоидой, получим, что амплитуда связана с максимальным уклоном соотношением $A = \xi_{\max} \lambda / 2\pi$. Для приведённого примера лабораторных измерений длина волны $\lambda = 12 \pm 1$ мм, а амплитуда составила $A = 0.12 \pm 0.012$ мм.

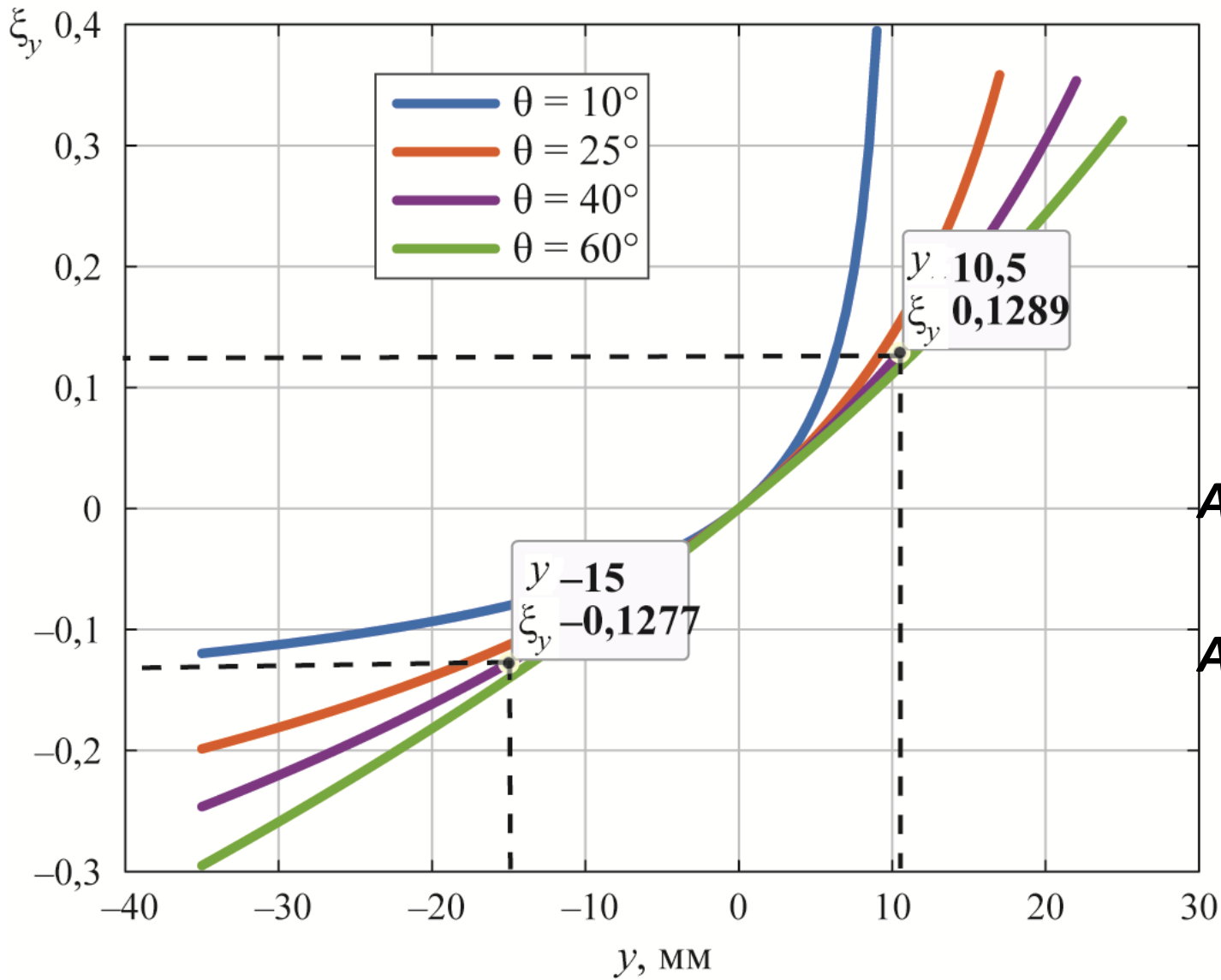
Следует отметить, что зависимость $\xi_y(y)$ уклона от отклонения y луча от невозмущённой линии может быть рассчитана для произвольного угла θ , который определяется по ориентации капиллярной гребёнки на видеокадре.

Следовательно, по форме капиллярных возмущений вертикальной линии или лазерного луча можно определить всю информацию о капиллярном возмущении поверхности.

Измерение капиллярных колебаний морской поверхности в натуральных условиях



С учётом калибровки вблизи точки b длина капиллярной волны составляет $\lambda_b = 13 \pm 1$ мм, а вблизи точки a длина волны $\lambda_a = 4.5 \pm 0.5$ мм, т.е. уменьшается почти в три раза.



$$\xi_{y,\max} = 0.128 \pm 0.015$$

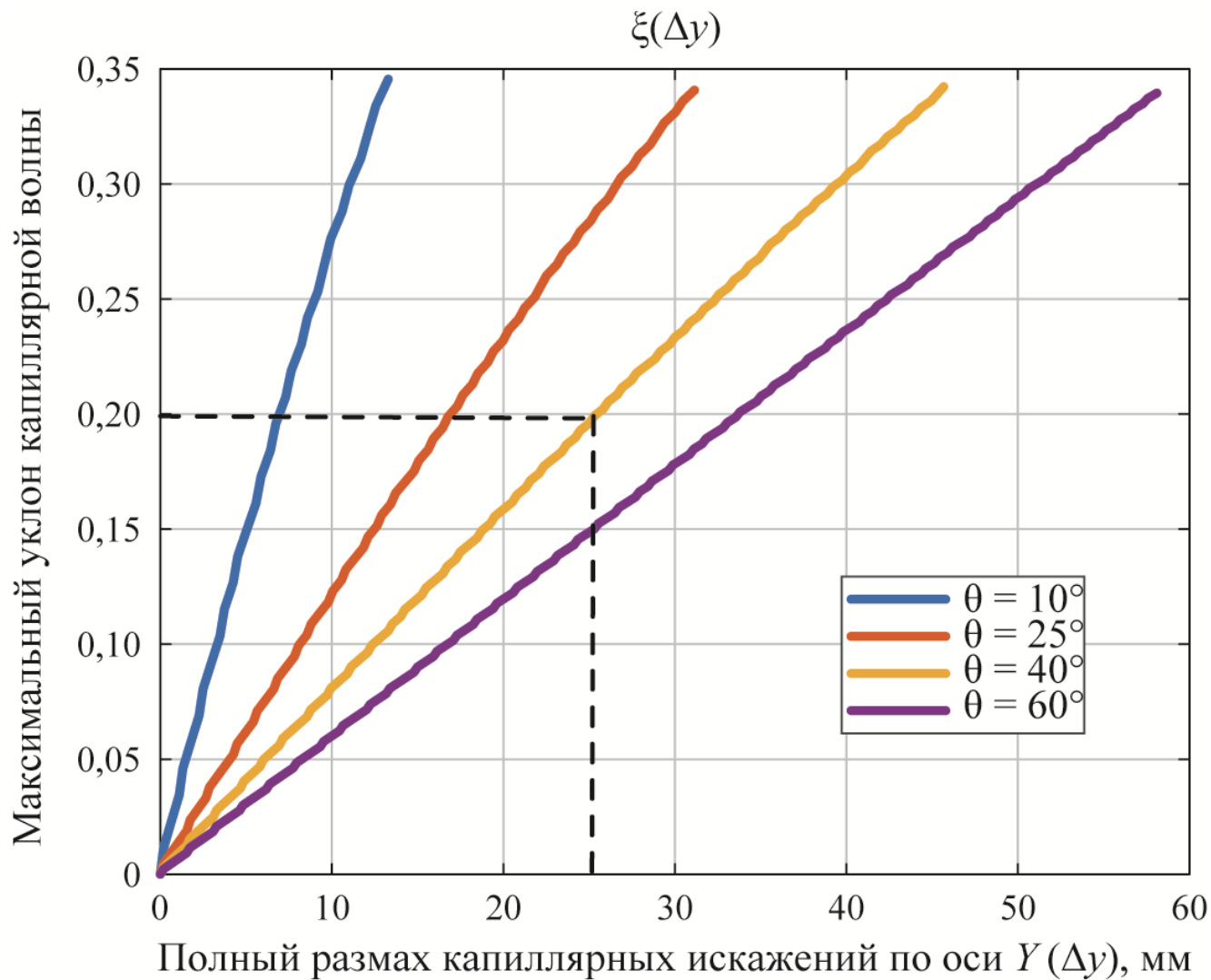
$$\xi_{\max} = \xi_{y,\max} / \sin(\theta) = 0.20 \pm 0.02$$

$$\xi_{\max} = \text{tg}(\gamma_y) = A_b(2\pi/\lambda)$$

$$A_b = 0.41 \pm 0,06 \text{ мм}$$

$$A_a = 30 \pm 10 \text{ мкм}$$

Зависимость уклона ξ_y нормали к поверхности от смещения луча по оси y при координате $x = 170$ мм и различной ориентации волнового вектора относительно оси X .



Зависимость максимального уклона капиллярной волны ξ_{\max} от суммарной амплитуды капиллярной гребёнки при координате $x = 170$ мм. Угол θ отклонения волнового вектора от оси X представлен в легенде

Заключение

1. Показано, что по видеокадрам с капиллярными искажениями лазерной линии можно однозначно определять **волновой вектор k** , **уклоны**, **амплитуду** и **профиль капиллярной волны**.
2. Получены зависимости уклонов капиллярной волны от суммарной амплитуды зарегистрированной капиллярной гребёнки.
3. Показана возможность регистрации капиллярных колебаний амплитудой до **30 мкм с расстояния выше 4 м**.
4. Достоинством предложенного метода является его дистанционный характер, регистрация уклонов и формы волны не в одной точке, а на значительном участке морской поверхности, возможность измерений, как в ночное, так и в дневное время

Спасибо за внимание

Источники финансирования

Исследование выполнено за счёт гранта
Российского научного фонда № 23-17-
00189, <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>.