

Метод измерения дисперсии уклонов капиллярных волн на морской поверхности

В. В. Стерлядкин [✉], К. В. Куликовский, М. В. Лихачева

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
[✉] sterlyadkin@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2025; одобрена после рецензирования 12.10.2025;
принята к публикации 28.01.2026.

Аннотация

Цель. Обоснование и практическое применение нового метода быстрой (за 0,01 с) регистрации параметров капиллярных волн в натуральных условиях – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Метод основан на регистрации изображения тонкого лазерного луча, падающего на морскую поверхность. Рассеянное в воде излучение преломляется на взволнованной границе раздела и фиксируется видеокамерой, расположенной сбоку. Искажения изображения луча пропорциональны уклонам поверхности в точке выхода излучения. Наибольшие уклоны (более 30°) характерны для капиллярных волн, что делает метод особенно эффективным для их регистрации. Удаётся регистрировать волны амплитудой 30 мкм с расстояния 5–8 м. При интенсивной капиллярной ряби ниже точки падения луча на поверхность формируется световая «юбка», ширина которой растёт с ростом уклонов. По распределению интенсивности рассеянного света в поперечном сечении световой «юбки» рассчитывается распределение уклонов на каждом кадре или функция плотности вероятности за заданный временной интервал. Разработанный метод оперативного измерения распределения уклонов капиллярных волн применен для исследования капиллярной структуры на различных участках морского волнения: на гребнях и в ложбинах. Установлено, что дисперсия капиллярных уклонов в ложбинах существенно ниже, чем на гребнях, что согласуется с известными данными.

Выводы. Предложен новый метод дистанционных измерений уклонов капиллярных волн на морской поверхности, позволяющий проводить измерения за время 0,01 с на участках поверхности 10 × 10 см. В приведенном примере при значительной высоте волн (1,1 ± 0,1) м и скорости ветра (7,4 ± 0,5) м/с средняя дисперсия капиллярной фракции составила 0,0256 на гребнях и 0,008 в ложбинах. Достоинством метода является возможность измерений в широком диапазоне погодных условий как в ночное, так и в дневное время.

Ключевые слова: капиллярные волны, натурные измерения, распределение уклонов, дисперсия уклонов, лазерный волнограф


Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00189 «Исследование связи приводного ветра с динамикой развития ветровых волн на морской поверхности и процессами микроволнового радиационного переноса на границе морской поверхности и атмосферы», <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>.

Для цитирования: Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Лихачева М. В. Метод измерения дисперсии уклонов капиллярных волн на морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 2. С. 198–215. EDN YIFQJI.

Method for Measuring the Dispersion of Capillary Wave Slopes on the Sea Surface

V. V. Sterlyadkin , K. V. Kulikovskiy, M. V. Likhacheva

MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

 sterlyadkin@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to substantiate and apply in practice a new method for fast (0.01 s) recording of capillary wave parameters in natural conditions.

Methods and Results. The method is based on recording the image of a thin laser beam incidence on the sea surface. The scattered in water radiation is refracted at the rough interface and is recorded by a video camera located on the side. The beam image deviations are proportional to the surface slopes at the point of radiation exit. The largest slopes exceeding 30° are characteristic of capillary waves; it makes the method particularly effective for recording them. It has become possible to record the waves with the $30\ \mu\text{m}$ amplitude from a distance 5–8 m. With the intense capillary ripples below the point of beam incidence on the surface, a light “skirt” is formed, the width of which grows with the increasing slopes. The distribution of the scattered light intensity in the cross-section of light “skirt” makes it possible to calculate the slope distributions on each frame or the probability function for a given time interval. The developed method for operational determination of the distribution of capillary wave slopes is applied for studying the capillary structure of various areas of sea waves, namely on crests and in troughs. It is established that the dispersion of capillary slopes in the troughs is significantly lower than that on the crests, which is consistent with the known data.

Conclusions. A new method for remote measuring the capillary wave slopes on the sea surface is proposed, it permits to carry out measurements on the surface areas of $10 \times 10\ \text{cm}$ in 0.01 s. The given example shows that at a significant wave height (1.1 ± 0.1) m and wind speed (7.4 ± 0.5) m/s, the average dispersion of capillary fraction was 0.0256 on the crests and 0.008 in the troughs. The advantage of the method consists in providing the possibility to carry out measurements in a wide range of weather conditions, as well as during night and day.

Keywords: capillary waves, *in situ* measurements, slope distribution, slope dispersion, laser wave recorder

Acknowledgments: The study was carried out at financial support of the Russian Science Foundation grant No. 23-17-00189 “Investigation of the relationship between the surface wind and the dynamics of wind wave development on the sea surface and the processes of microwave radiation transfer at the sea surface-atmosphere boundary”, <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>.

For citation: Sterlyadkin, V.V., Kulikovskiy, K.V. and Likhacheva, M.V., 2026. Method for Measuring the Dispersion of Capillary Wave Slopes on the Sea Surface. *Physical Oceanography*, 33(2), pp. 246-262.

Введение

Капиллярное волнение оказывает сильное влияние на рассеяние электромагнитных волн в оптическом и микроволновом диапазонах, а также на собственное электромагнитное излучение морской взволнованной поверхности. Хотя амплитуда капиллярных волн обычно не превышает 0,5 мм, их влияние в радиолокации и радиометрии весьма значительно, поскольку уклоны в этих волнах нередко превышают 30° , что приводит к увеличению шероховатости поверхности и ее отражательной способности в широком диапазоне длин волн [1–4].

Капиллярные волны достаточно подробно изучены в лабораторных бассейнах, где средства измерений могут быть установлены в непосредственной близости от волны [5–9]. Однако параметры капиллярных волн в бассейнах могут существенно отличаться от параметров морских волн из-за наличия границ и отсутствия низкочастотных компонент волнения. Регистрация капиллярных волн в натуральных условиях сопряжена с трудностями: измерения должны проводиться с расстояния 5–10 м при амплитуде менее 0,5 мм. Дополнительные сложности возникают из-за пространственной неоднородности капиллярных волн (длина когерентности у них, как правило, не превышает 10 см) и их короткого времени жизни (время когерентности составляет десятые доли секунды).

Известны методы измерения уклонов с летательных аппаратов или спутников, основанные на отражении солнечного блика [10–12]. Однако они требуют наличия солнца и благоприятной геометрии освещения, а площадь усреднения не позволяет исследовать капиллярные волны на малых участках поверхности. Существуют методы измерения параметров гравитационно-капиллярных волн с помощью стереофотографий [13, 14] или поляриметрических фотографий [15–17]. Недостатком этих методов являются высокие требования к однородности фонового излучения и невозможность измерений в ночных условиях. Разработаны методы измерений уклонов, основанные на регистрации отраженного или преломленного лазерного излучения ¹ [18], их недостатком является необходимость размещения элементов конструкции под водой или на малом расстоянии от поверхности, что искажает структуру волнения или резко ограничивает условия эксплуатации. В патенте ² использован ножевой лазерный луч, освещающий поверхность, с регистрацией профиля на фото или видеокамеру; однако за время выдержки граница поверхности смещается, что снижает точность измерений профиля волнения. В работах ³ [19] предложен метод сканирования морской поверхности лазерным лучом, позволяющий восстанавливать «мгновенный» профиль поверхности раздела вдоль заданной траектории сканирования с пространственным разрешением до 0,5 мм. Натурные измерения «мгновенных» профилей и расчет одномерного пространственного спектра волнения описаны в работе [20]. Лабораторные и натурные измерения частотных спектров и профиля поверхности капиллярных волн выполнены в [21].

Цель настоящей работы – обоснование и верификация нового метода регистрации уклонов морского волнения, в том числе уклонов капиллярных

¹ *Заневалов А. С.* Статистические модели морской поверхности в задачах рассеяния акустического и электромагнитного излучения : дисс. ... д-ра ф.-м. наук. Севастополь, 2008. 290 с. EDN TVAFCH.

² Способ определения угла наклона и высоты волнения водной поверхности относительно ее равновесного состояния : патент 2448324 С2 Российская Федерация : МПК7 G01C 13/00, G01B 11/30 / Караев В. Ю., Мешков Е. М. ; заявитель и правообладатель Институт прикладной физики РАН. № 2010118817/28 ; заявл. 11.05.10 ; опубл. 20.04.12, Бюл. № 11. 8 с. EDN ZLCOPJ.

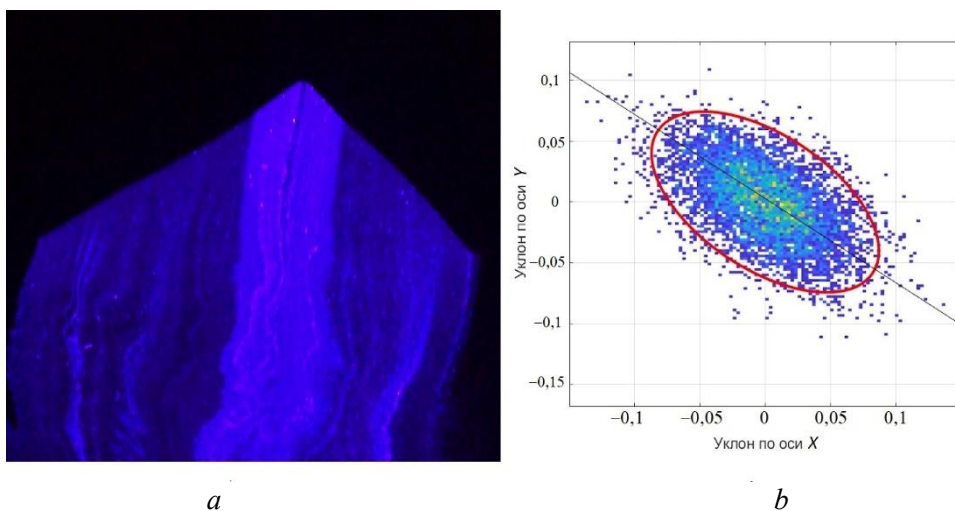
³ Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности : патент № 2749727 С1 Российская Федерация : МПК7 G01B 11/24, G01C 13/00 / Стерлядкин В. В. ; заявитель и правообладатель Стерлядкин В. В. № 2020134068 ; заявл. 16.10.20 ; опубл. 16.06.20, Бюл. № 17. 10 с.

волн, основанного на анализе изображения лазерного луча, падающего на морскую поверхность вертикально сверху вниз и регистрируемого с помощью видеокамеры сбоку от луча. Предложенный метод позволяет за 0,01 с определить распределение уклонов капиллярной фракции волнения на участках поверхности площадью от 10×10 см. Чувствительность метода обеспечивает регистрацию капиллярных волн амплитудой 30 мкм с расстояния 5–8 м. Теоретическое обоснование и экспериментальная проверка метода выполнены в предыдущих исследованиях [22, 23]. В данной работе кратко изложены основные результаты этих исследований и представлены новые натурные данные о параметрах капиллярных волн на различных участках крупных ветровых волн – на гребнях и в ложбинах.

Теоретическое обоснование и экспериментальная основа предлагаемого метода

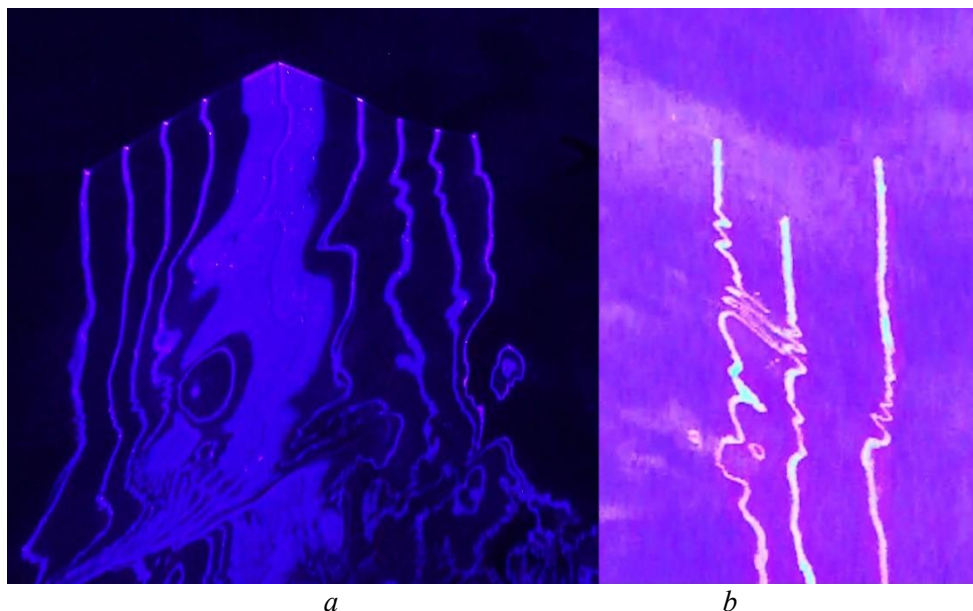
В работах ³ [19] приводится описание лазерного волнографа, который позволяет в натуральных условиях получать «мгновенный» профиль морской поверхности. Принцип измерений основан на сканировании морской поверхности тонким лазерным лучом, направленным сверху вниз по заданной траектории с известным временным законом. Синхронизация начала развертки с началом записи изображения на матрицу видеокамеры, расположенной сбоку от линии развертки, обеспечивает четкую регистрацию границы раздела вода – воздух на каждом кадре, что соответствует профилю волнения по всей траектории сканирования (рис. 1, *a*). Длительность освещения каждого пикселя траектории составляет около 10^{-4} с, поэтому изображение не размывается из-за вертикального движения волны; сравнение соседних кадров позволяет определить скорость вертикального перемещения каждой точки поверхности. Из-за конечной скорости развертки разные точки траектории освещаются в различные моменты времени, поэтому зарегистрированное изображение профиля не будет «мгновенным». Но его можно скорректировать и привести к «мгновенной» форме, например к моменту начала выдержки, с учетом известной для каждой точки профиля задержки освещения и скорости ее вертикального движения, полученной из сравнения соседних кадров. Точность синхронизации составляет 10^{-4} с, погрешность определения аппликат волнения определяется масштабом пикселя и обычно составляет 0,5–1,0 мм.

На основе 5–10-минутных видеозаписей можно получить серии из десятков тысяч профилей морской поверхности $\zeta(x, y, t_i)$, вычислить частотный спектр волнения [19], уклоны ξ_x, ξ_y по ортогональным осям, двумерные распределения уклонов $P(\xi_x, \xi_y)$ в трех произвольных точках, освещаемых на поверхности (рис. 1, *b*). При этом можно выбирать масштаб треугольника, тем самым вовлекать в анализ разные масштабы ветровых волн. На рис. 1, *b* представлен полученный 21.08.2021 в 20:29 мск на океанографической платформе Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН) пример распределения уклонов. В центре скорость развертки в четыре раза меньше, чем на краях.



Р и с. 1. Видеокадр лазерной развертки по двум ортогональным направлениям (а); двумерное распределение уклонов $P(\xi_x, \xi_y)$ на прямоугольном треугольнике размером 300×300 мм (b)
F i g. 1. Video frame of laser scanning in two orthogonal directions (a); two-dimensional distribution of slopes $P(\xi_x, \xi_y)$ on a right triangle measuring 300×300 mm (b)

Если траектория развертки имеет остановки в заданных точках, формируются изображения границ лучей с более высоким отношением сигнал/шум, что позволяет проводить измерения даже в дневное время (рис. 2).



Р и с. 2. Искаженное взволнованной поверхностью изображение набора лазерных лучей, сформированное в воде при развертке сканатора с остановками в заданных точках (а); капиллярная гребенка (b)
F i g. 2. Image of a set of laser beams distorted by a rough surface and formed in water during scanning with stops at specified points (a); capillary comb (b)

При анализе видеокадров авторы обратили внимание на тот факт, что изображения лазерных лучей часто имеют сложную форму: дуги, петли, гребенки. Тонкий лазерный луч, падающий на морскую поверхность, распространяется в воде по прямолинейной траектории и светится вследствие рассеяния на неоднородностях воды. Однако изображение прямого луча при регистрации видеокамерой, расположенной сбоку от точки падения, проходит через взволнованную морскую поверхность и искажается. Эти искажения зависят от уклонов поверхности в точках преломления. В работе [22] формулируется математическая постановка и проводится анализ обратной задачи восстановления профиля морской поверхности по изображению преломленных лазерных лучей. Показано, что в общем виде по одному видеокадру восстановить профиль поверхности невозможно, поскольку число неизвестных на единицу превышает число уравнений, получаемых из законов преломления.

Однако при появлении капиллярных волн на морской поверхности на видеокадре нередко возникает капиллярная гребенка (рис. 2, *b*). По шагу периодичности и ориентации такой гребенки можно определить величину и направление волнового вектора \vec{k} капиллярной волны, а также ее амплитуду [23]. Информация о направлении волнового вектора дает дополнительное уравнение, которое позволяет решить обратную задачу и однозначно восстановить форму капиллярной волны. Корректность определения параметров капиллярной волны по видеоизображению прямой линии подтверждена в лабораторном эксперименте [23].

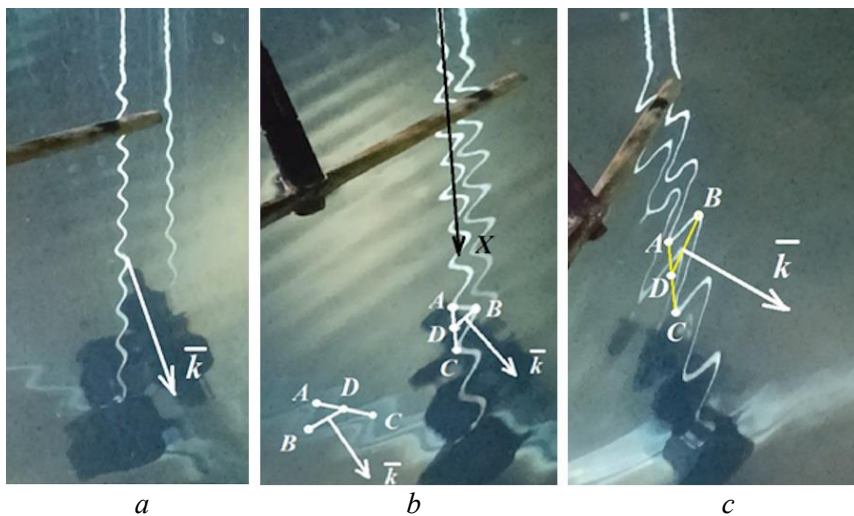


Рис. 3. Зависимость изображения прямой белой нити (и ее отражения от стенки аквариума), искаженного капиллярной волной на поверхности, от угла θ между волновым вектором \vec{k} и осью видеокамеры X при значении θ , равном 20° (*a*); 40° (*b*); 55° (*c*). $\triangle ABC$ – треугольник, построенный по точкам максимального отклонения изображения луча от невозмущенного состояния, BD – медиана треугольника ABC . Внизу – изображение светлой нижней горизонтальной грани аквариума [23]

Fig. 3. Dependence of the image of straight white thread (and its reflection from the aquarium wall) distorted by a capillary wave on the surface upon the angle θ between the wave vector \vec{k} and the X -axis of video camera at θ equal to 20° (*a*), 40° (*b*) and 55° (*c*). $\triangle ABC$ is a triangle constructed using the points of maximum deviation of beam image from the undisturbed state; BD is the median of triangle ABC . Below – image of the light lower horizontal edge of the aquarium [23]

На рис. 3 представлены изображения вертикальной белой нити, полученные при наблюдении сквозь капиллярную волну на поверхности аквариума при различных углах наблюдения относительно вектора \bar{k} . Показано, что волновой вектор \bar{k} перпендикулярен медиане BD треугольника ABC . Чувствительность метода, основанного на анализе формы лазерных лучей, позволяет в натуральных условиях регистрировать капиллярные волны амплитудой в 30 мкм с расстояния 5–8 м.

В работе [22] выполнен расчет связи между уклонами морской поверхности ξ_x, ξ_y и положением (x, y) светящейся точки на морской поверхности относительно точки $(x, y) = (0, 0)$ падения лазерного луча на поверхность для конкретной геометрии установки видеокамеры. Высота камеры над поверхностью $H = 4,70$ м, горизонтальное расстояние от точки падения луча до проекции видеокамеры на поверхность $L = 6,99$ м. Показано, что уклоны поверхности ξ_x в направлении оси видеокамеры (ось X) в первую очередь приводят к смещению изображения светящейся точки вдоль светящегося луча (ось X), поэтому слабо влияют на отклонение изображения луча по оси Y (перпендикулярно оси X). По предварительным оценкам, это влияние не превышает 16 % при самых интенсивных капиллярных уклонах по оси X . Напротив, уклоны ξ_y по ортогональной оси Y вызывают сильное отклонение изображения луча от невозмущенной линии по координате y . На рис. 4 приведены результаты расчета зависимости координаты y светящейся точки от уклона ξ_y для заданной геометрии измерений при $x_0 = 160$ мм и $\xi_x = 0$ (средний уклон по оси X). Корректность решения нелинейной системы уравнений подтверждается прямой подстановкой решения в уравнения геометрической оптики.

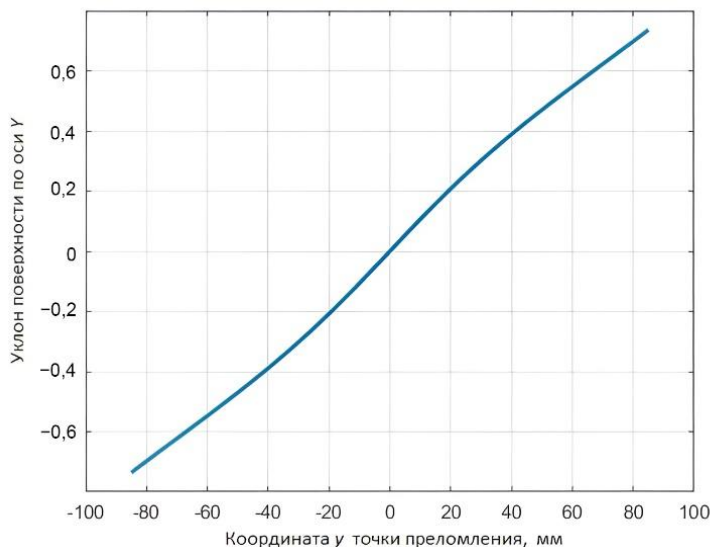
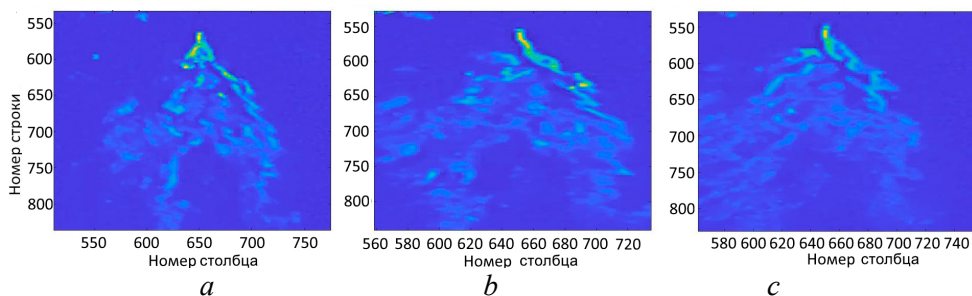


Рис. 4. Зависимость уклона морской поверхности $\xi_y(y)$ от координаты y в точке преломления для описанной геометрии наблюдений на расстоянии $x = 160$ мм от точки падения луча на поверхность. Уклон ξ_x принят равным нулю

Fig. 4. Dependence of the sea surface slope $\xi_y(y)$ on the y coordinate in the luminous point for the described observation geometry at a distance of $x = 160$ mm from the point of beam incidence on the surface. Slope ξ_x is taken to be zero

Зависимость $\xi_s(y)$ имеет монотонный и однозначный характер: чем дальше светящаяся точка от невозмущенного положения $y = 0$, тем больше уклон морской поверхности в этой точке. Данную зависимость мы будем использовать для вычисления плотности вероятности уклонов морской поверхности по видеоизображениям лазерного луча.

Метод световой «юбки» позволяет получать «мгновенное» распределение уклонов. При сильном капиллярном волнении на видеокдрах ниже точки падения луча в воду формируется световая «юбка» (рис. 5). Три последовательных видеокдра получены с частотой съемки 90 кадров в секунду, выдержка $1/100$ с, скорость ветра V_w 7–8 м/с, значительная высота волн ($1,1 \pm 0,1$) м, период волн спектрального пика ($7,2 \pm 0,1$) с. При этом морская поверхность была частично покрыта капиллярной рябью. Измерения выполнены 22.02.2025 в 02:55 мск на Морской гидрофизической платформе МГИ РАН.



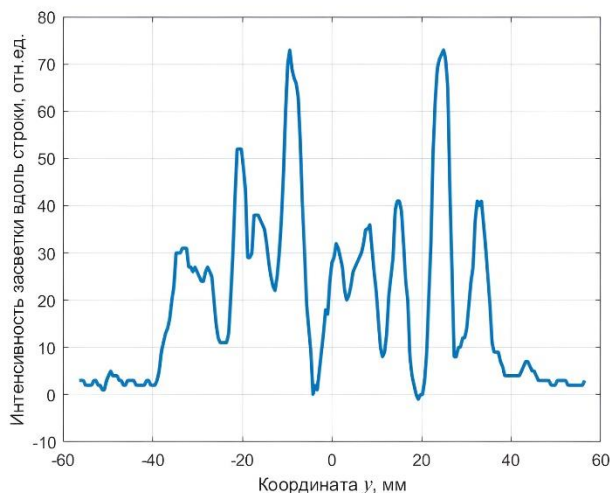
Р и с. 5. Три последовательных кадра: 4578 (a), 4579 (b) и 4580 (c) – с выдержкой $1/100$ с при частоте съемки 90 кадров в секунду

F i g. 5. Three consecutive frames: 4578 (a), 4579 (b) and 4580 (c) with a shutter speed $1/100$ s at a video frame rate 90 frames per second

Появление световой «юбки» вместо лазерного луча объясняется тем фактом, что капиллярные волны имеют частоту ν , превышающую 16 Гц, поэтому за время выдержки $\Delta t = 1/100$ с фаза капиллярной волны изменяется на $2\pi\nu\Delta t$ (свыше 1 рад). Чем выше частота капиллярной волны, тем в большем диапазоне изменяются уклоны поверхности в каждой точке. При этом во многих точках поверхности на короткое время возникают такие уклоны, при которых данная точка начинает светиться, то есть преломлять светящийся лазерный луч в сторону видеокамеры. Чем ярче свечение данной точки на видеокadre, тем большую долю времени эта точка имеет соответствующий уклон. Поскольку за один кадр условия свечения возникают не во всех точках поверхности, где проходит капиллярная волна, на отдельном кадре есть участки, которые не светились. В результате световая «юбка» получается дырявой, «кружевной». На рис. 6 представлено распределение интенсивности в 4578-м кадре (см. рис. 5, a) вдоль 715-й строки.

Распределение интенсивности (рис. 6) имеет ярко выраженную периодичность, связанную с периодичностью капиллярных уклонов на поверхности. На синусоиде одинаковые уклоны повторяются два раза за период, поэтому два периода на рисунке соответствуют периодичности капиллярной структуры

$\Lambda \approx 16$ мм. Учитывая, что периодичность Λ регистрируется вдоль оси Y , и эта периодичность связана с длиной λ капиллярной волны соотношением $\Lambda = \lambda / \cos(\theta)$, где θ – угол отклонения волнового вектора \vec{k} от оси Y , получим длину капиллярной волны λ меньше 16 мм.



Р и с. 6. Распределение интенсивности свечения световой юбки вдоль 715-й строки 4578-го кадра, показанного на рис. 5, *a*

Fig. 6. Distribution of the intensity of light “skirt” glow along line 715 of frame 4578 shown in Fig. 5, *a*

При суммировании нескольких кадров светящиеся участки смещаются вместе с волной и накладываются друг на друга, формируя более равномерное распределение интенсивности свечения «юбки». Если суммировать девять кадров, общая продолжительность накопления изображения составит 0,1 с. За это время в каждой точке поверхности, где проходит волна с частотой свыше 10 Гц, фаза волны изменяется на 2π и более, поэтому уклоны также изменяются во всем диапазоне значений, характерном для данной капиллярной волны. «Юбка» засвечивается везде, где присутствует капиллярная волна, и ее ширина тем больше, чем больше максимальный уклон в данной волне.

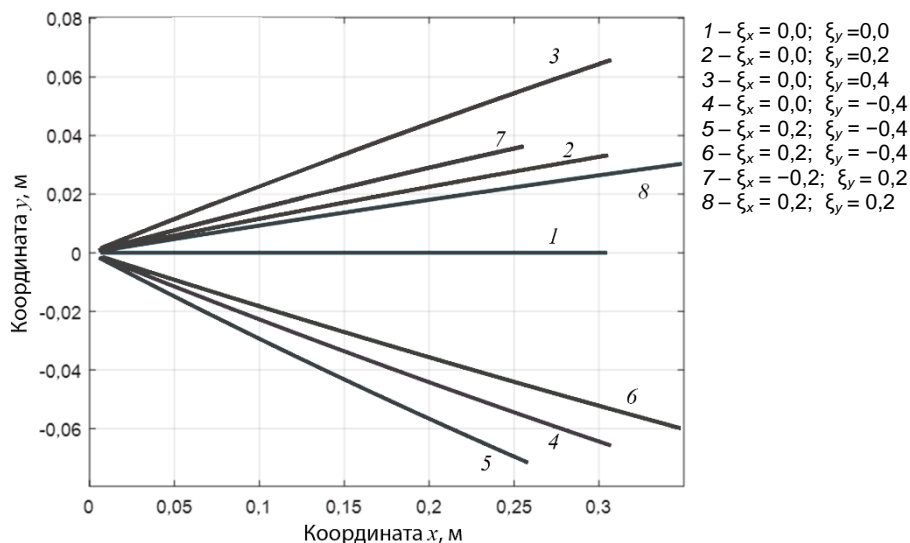
Рассмотрим связь между распределением яркости «юбки» и уклонами поверхности. Для фиксированного значения координаты $x_0 = 160$ мм рассчитана зависимость уклона морской поверхности $\xi_y(y)$ от координаты y светящейся точки (см. рис. 4). Световая энергия, приходящаяся на интервал $(y, y + dy)$, составляет величину $I(x_0, y)dy$, которая должна быть пропорциональна вероятности попадания уклона в соответствующий интервал $P(\xi_y)dy$, где $P(\xi_y)$ – плотность вероятности уклонов. С учетом связи $\xi_y(y)$ получаем

$$P(\xi_y) = AI(x_0, y) \frac{dy}{d\xi_y}, \quad (1)$$

где A – нормировочный коэффициент, который определяется из условия

$$\int P(\xi_y) d\xi_y = 1. \quad (2)$$

Информация о капиллярных уклонах содержится не только в одной строке x_0 , но и во всех остальных строках световой «юбки». Рассмотрим процедуру использования информации по всему кадру и накопления информации путем анализа распределения интенсивности «юбки» не по одной конкретной строке, а по всем строкам. Расчеты, проведенные по методике, описанной в работе [22], показывают, что при одинаковом уклоне поверхности смещение светящейся точки по координате y пропорционально расстоянию x (рис. 7).



Р и с. 7. Зависимость смещения луча по координате y от расстояния x при заданном уклоне поверхности

Fig. 7. Dependence of the beam displacement along the y coordinate upon distance x at a given surface slope

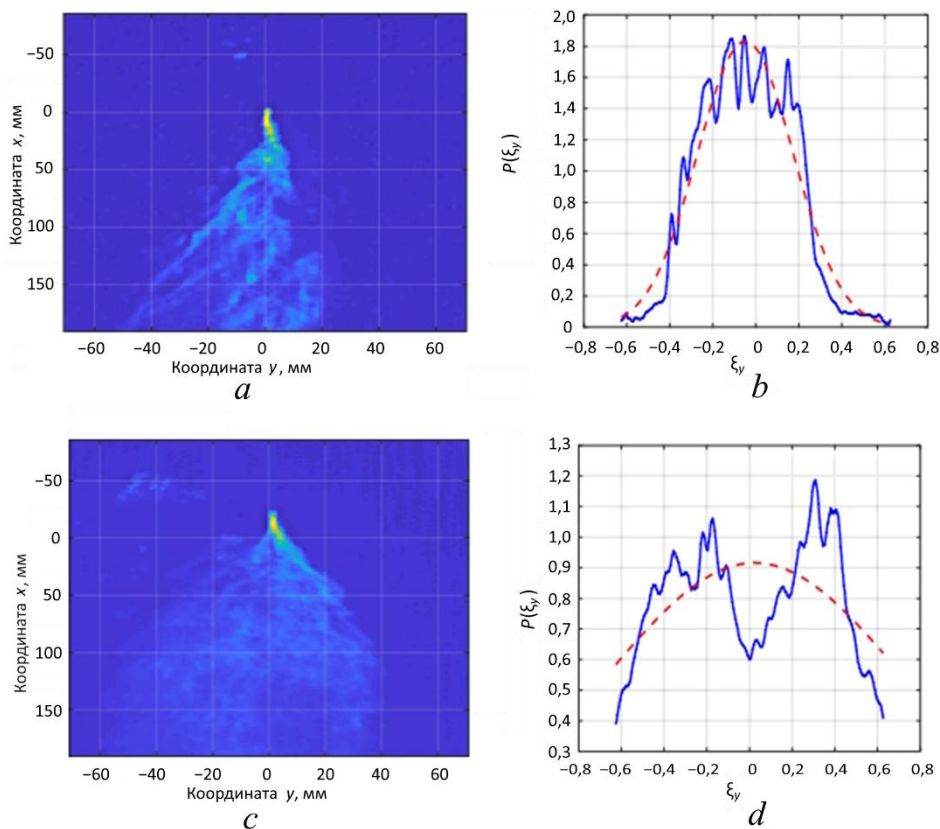
Следствием этого факта является то, что форма «юбки» при наличии интенсивной капиллярной фракции часто имеет вид конуса, начинающегося от точки падения луча в воду. Примером могут служить кадры на рис. 5. Линейный характер связи $y(x)$ позволяет суммировать все строки и привести все изображение к одной строке $x_0 = 160$ мм или суммировать изображения в заданном интервале строк. Для этого необходимо учесть линейное изменение масштаба в x/x_0 раз и уменьшение интенсивности свечения в x/x_0 раз, обусловленное распределением световой энергии в другом интервале координат (ослаблением излучения при рассмотрении небольшого участка поверхности мы пренебрегаем). Обозначим $I(x_0, y)$ распределение интенсивности засветки вдоль оси y при заданном значении x_0 , а $I(x, y)$ – распределение интенсивности при x , отличном от x_0 . Процесс нормировки строки с координатой x к единому значению x_0 можно записать в виде

$$I_n(x_0, y) = \frac{x}{x_0} I\left(x, \frac{x_0}{x} y\right).$$

Нормированные распределения интенсивности затем усредняются в заданном интервале значений $x_1 < x < x_2$:

$$I_{cp}(x_0, y) = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \sum_{x_1}^{x_2} \frac{x}{x_0} I\left(x, \frac{x_0}{x} y\right).$$

Интервал усреднения целесообразно выбирать не слишком близко к точке падения, поскольку в начале луча возможно насыщение интенсивности пикселей, и не слишком далеко от нее, поскольку в нижних строках изображения уменьшается отношение сигнал/фон и нужно учитывать ослабление лазерного излучения в воде. На рис. 8, *a, c* представлены примеры световых «юбок», накопленных по девяти кадрам, а на рис. 8, *b, d* – соответствующие распределения уклонов, полученные по формулам (1), (2) с использованием $I_{cp}(x_0, y)$ в качестве $I(x_0, y)$, усредненной в интервале между $x_1 = 50$ мм и $x_2 = 160$ мм.



Р и с. 8. Примеры световых «юбок», накопленных по девяти кадрам: с 3272-го по 3280-й (*a*) и 4577-го по 4585-й (*c*), и соответствующие им распределения уклонов (сплошная линия) с аппроксимацией гауссовым распределением (пунктирная линия) (*b, d*)

Fig. 8. Examples of light “skirts” accumulated over nine frames: from 3272 to 3280 (*a*) and from 4577 to 4585 (*c*), and the corresponding slope distributions (solid line) with the Gaussian distribution approximation (dashed line) (*b, d*)

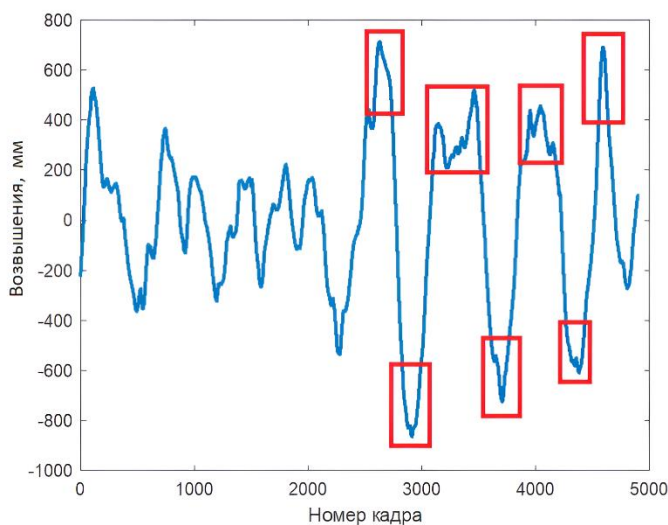
На рис. 8, *b* распределение уклонов смещено от центра в среднем на $-0,1$, что характеризует средний уклон гравитационной волны на участке усреднения. Лазерная «юбка» связана с наличием капиллярных волн со среднеквадратичным отклонением (СКО) уклонов ξ , около $0,25$. На рис. 8, *c* «юбка» очень широкая. Уклоны в ней достигают $0,6$, что соответствует углу наклона в 34° .

Таким образом, предложенная методика анализа лазерных «юбок» позволяет получать почти «мгновенное» распределение уклонов капиллярных волн на небольших (100×100 мм) участках морской поверхности.

Результаты

Структура капиллярных волн на гребнях и в ложбинах гравитационного волнения

В качестве примера рассмотрим измерения, выполненные 22.02.2025 в 02:55 мск на Морской гидрофизической платформе МГИ РАН. На рис. 9 представлена высота границы раздела в зависимости от номера кадра (аппликаты) морской поверхности в точке падения непрерывного лазерного излучения. Частота видеосъемки составляла 90 кадров в секунду, выдержка $1/100$ с, длина видеоряда 26 000 кадров, значительная высота волн ($1,1 \pm 0,1$) м, скорость ветра ($7,4 \pm 0,5$) м. Направление ветра – восточное, отклонение от оси $Y - 12^\circ$. На рисунке в качестве примера прямоугольниками выделены четыре участка на гребнях волн и три участка в ложбинах, выбранные для сравнения дисперсий уклонов.



Р и с. 9. Аппликаты в зависимости от номера кадра. Прямоугольниками отмечены анализируемые области

F i g. 9. Applicates depending on the frame number. Rectangles denote the analyzed areas

Каждый участок разбивался на группы по девять кадров, что соответствовало времени усреднения $0,1$ с, и проводилось сложение изображений со сдви-

гом точки падения к началу координат. За 0,1 с гравитационные уклоны изменяются незначительно, тогда как фаза капиллярных волн в каждой точке успевает пройти полный цикл $0-2\pi$, что обеспечивает регистрацию всего диапазона капиллярных уклонов. При этом формируется световая «юбка». На рис. 10 (сверху) показаны суммарные «юбки», полученные в ложбинах в интервале кадров 3680–3706. Внизу на том же рисунке представлены соответствующие распределения уклонов. Аналогичные данные показаны на рис. 11 для гребней в интервале кадров 2618–2653. Ширина «юбок» на гребне гравитационной волны заметно больше. Красным пунктиром на всех распределениях уклонов обозначена аппроксимация распределения нормальным законом.

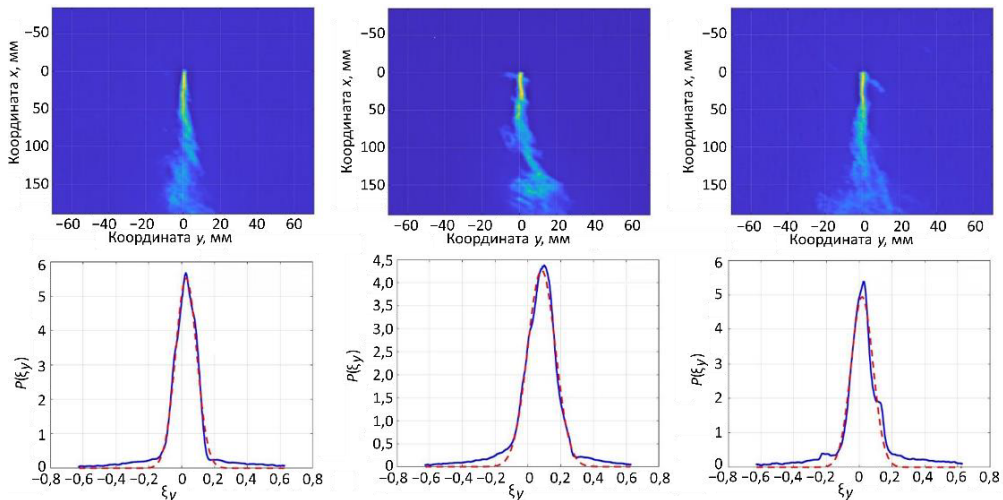


Рис. 10. Накопление изображения луча за 0,1 с (по девяти кадрам) в области ложбины (в интервале кадров 3680–3706 на рис. 9) (сверху); соответствующие распределения уклонов (снизу): *a* – кадры 3680–3688; *b* – 3689–3697; *c* – 3698–3706

Fig. 10. Accumulation of the beam images for 0.1 s (nine frames) in the trough area (in the frame interval 3680–3706 in Fig. 9) (top); corresponding slope distributions (bottom): *a* – frames 3680–3688; *b* – 3689–3697; *c* – 3698–3706

В первом приближении оценивать интенсивность капиллярного волнения можно по дисперсии $\sigma_{\xi_y}^2$ распределения уклонов. Для серии из четырех «юбок» в ложбине (рис. 10) усредненное значение среднеквадратичного уклона σ_{ξ_y} составило 0,07 (дисперсия 0,0049). Аналогичное значение для серии из четырех «юбок» на гребне (рис. 11) дало среднеквадратичное значение уклонов капиллярных волн $\sigma_{\xi_y} = 0,20$. Усреднением, проведенным по 1/3 наиболее выраженных гребней и ложбин за 5-минутную видеозапись, получено значение $\sigma_{\xi_y}^{\text{ложб}} = 0,09$, $\sigma_{\xi_y}^{\text{греб}} = 0,16$. Массив усреднения составил 98 гребней и 94 ложбины.

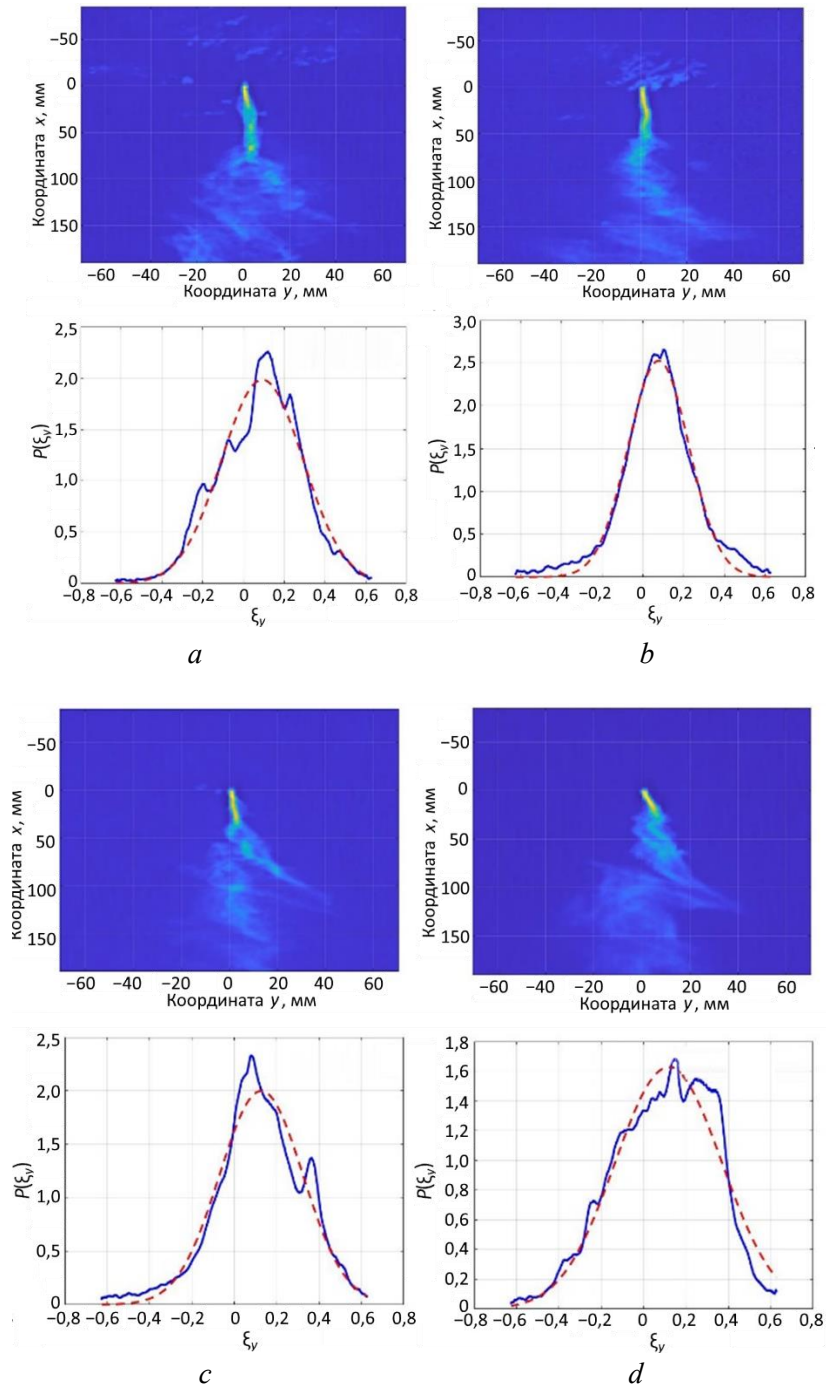


Рис. 11. Накопление изображения луча за 0,1 с (по девяти кадрам) в области гребня (в интервале кадров 2618–2653 на рис. 9) (*сверху*); соответствующие распределения уклонов (*снизу*): *a* – кадры 2618–2626; *b* – 2627–2635; *c* – 2636–2644; *d* – 2645–2653

Fig. 11. Accumulation of the beam images for 0.1 s (nine frames) in the crest area (in the frame interval 2618–2653 in Fig. 9) (*top*); the corresponding slope distributions (*bottom*): *a* – frames 2618–2626; *b* – 2627–2635; *c* – 2636–2644; *d* – 2645–2653

Период волн спектрального максимума составлял 7,2 с, а амплитуда – 0,55 м. Поскольку направление оси Y , вдоль которой измеряются уклоны, отличалось от направления ветра (и направления длинных волн) всего на 12° , $\cos 12^\circ = 0,98$, можно принять условие $k_y = k$. По полученным данным оценена модуляционная передаточная функция (англ. *Modulation Transfer Function, MTF*), которую по аналогии с [24, 25] можно ввести для модуляции среднеквадратичного значения уклонов капиллярных волн в виде

$$\sigma_{\xi y} = \overline{\sigma_{\xi y}} [1 + M \cdot \varepsilon \cdot \sin(\phi - \phi_0)],$$

где $\overline{\sigma_{\xi y}}$ – среднее по поверхности значение $\sigma_{\xi y}$; M – *MTF*; $\varepsilon = kA$ – крутизна модулирующей волны с возвышениями $\zeta(y, t) = A \cdot \sin(ky - \Omega t - \phi_0)$, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число для длинных волн, которые распространяются по оси y , A – их амплитуда, ϕ_0 – фазовый сдвиг между ζ и $\sigma_{\xi y}$. С учетом полученных значений крутизна модулирующей волны ε равна 0,044, а полученные значения среднеквадратичного уклона 0,09 и 0,16 достигаются при *MTF* = 6,6.

Обсуждение

Предложенный метод световой «юбки» позволяет измерять распределение уклонов капиллярных волн на участках поверхности размером 10×10 см за время 0,1 с. В отличие от традиционных методов, он не требует сложной калибровки, может применяться в широком диапазоне освещенности, включая дневное время, и не предполагает размещения элементов конструкции в воде.

Полученные значения дисперсии капиллярных уклонов на гребнях (0,0256) и в ложбинах (0,0049) согласуются с физическими представлениями о более интенсивной генерации капиллярных волн на гребнях длинных волн из-за увеличения эффективной скорости ветра и нелинейных эффектов. Эти данные также качественно соответствуют результатам, полученным в [24, 25] для модуляции коротких волн длинными.

Корректность метода лазерных «юбок» проверена сравнением полной дисперсии уклонов, которую мы получаем при накоплении кадров за несколько периодов энергонесущих волн, с дисперсией, вычисленной по формулам Кокса – Манка [10]. Так, в рассматриваемом эксперименте (22.02.2025 в 02:55 мск) при накоплении 1500 кадров (16,7 с), измеренная дисперсия полного распределения уклонов составила $\sigma_y^2 = 0,018 \pm 0,003$. Дисперсия по Коксу – Манку при скорости ветра 7,4 м/с и направлении, отличающемся на 12° от направления оси Y , составила $\sigma_c^2 = 0,017 \pm 0,002$. Совпадение в пределах погрешности сравниваемых методов подтверждает достоверность предложенного метода.

Оценка *MTF* (6,6) является предварительной, поскольку основана на обработанных единичных данных измерений. Для установления зависимостей *MTF* от метеопараметров и физических процессов необходимы дальнейшие систематические измерения. Тем не менее приведенный пример демонстрирует возможности предложенного метода для исследования капиллярных волн на больших участках морской поверхности.

Выводы

В работе предложен новый метод оперативного измерения распределения уклонов капиллярных волн на морской поверхности. Метод основан на анализе распределения яркости лазерных «юбок», которые формируются при падении лазерного луча на морскую поверхность и регистрации рассеянного излучения сбоку от точки падения с помощью видеокамеры. Показано, что ширина «юбки» пропорциональна величине уклонов, а распределение интенсивности в поперечном сечении «юбки» позволяет рассчитать плотность распределения уклонов. Метод обеспечивает регистрацию капиллярных волн амплитудой 30 мкм с расстояния 5–8 м и позволяет проводить измерения за 0,01 с на участках поверхности 10 × 10 см. Достоинством предложенного метода является возможность измерений в широком диапазоне освещенности, включая дневное время. Возможны измерения даже по одному или нескольким кадрам.

В натуральных условиях метод применен для исследования капиллярной структуры на гребнях и в ложбинах гравитационных волн. Установлено, что дисперсия капиллярных уклонов в ложбинах существенно ниже, чем на гребнях, что согласуется с известными данными о модуляции коротких волн длинными. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для изучения капиллярного волнения в открытом море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kwoh D. S. W., Lake B. M.* Microwave scattering from short gravity waves // *Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface* / eds. O. M. Phillips, K. Hasselmann. Boston, MA : Springer, 1986. P. 443–447. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8980-4_30
2. Wave tank study of steep gravity-capillary waves and their role in Ka band radar backscatter / S. A. Ermakov [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. 4202812. EDN CWZYSK. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3086627>
3. *Ermakov S. A., Kapustin I. A., Sergievskaya I. A.* On peculiarities of scattering of microwave radar signals by breaking gravity-capillary waves // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012. Vol. 55, iss. 7. P. 453–461. EDN RGHBCV. <https://doi.org/10.1007/s11141-012-9381-1>
4. *Rozenberg A., Matusov P., Melville W. K.* Polarized microwave scattering by surface water waves and turbulence // *IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment*. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing: Symposium Proceedings. Seattle, WA, USA: IEEE, 1998. Vol. 4. P. 2273–2275. (Cat. No. 98CH36174). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1998.703810>
5. *Falcon E., Mordant N.* Experiments in surface gravity–capillary wave turbulence // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 54. P. 1–25. EDN DCFYEC. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>
6. *Bobb L.C., Ferguson G., Rankin M.* Capillary wave measurements // *Applied Optics*. 1979. Vol. 18, iss. 8. P. 1167–1171. <https://doi.org/10.1364/AO.18.001167>
7. Gravity wave turbulence in wave tanks: Space and time statistics / S. Lukaschuk [et al.] // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 103, iss. 4. 044501. EDN MXBWZV. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.044501>
8. *Soman S. S., Singh S. K.* Study of evolving young wind waves under steady wind forcing // *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2025. Vol. 147, iss. 5. 051201. EDN VYJCOQ. <https://doi.org/10.1115/1.4067551>

9. *Xu C., Perlin M.* Parasitic waves and micro-breaking on highly nonlinear gravity–capillary waves in a convergent channel // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 962. A46. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.322>
10. *Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun’s glitter // *Journal of the Optical Society of America*. 1954. Vol. 44, iss. 11. P. 838–850. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000838>
11. *Breon F. M., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C6. C06005. <https://doi.org/10.1029/2005JC003343>
12. *Натурные измерения спектра поверхностных волн по фотографиям с беспилотного мультикоптера / М. В. Юровская [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 1. С. 245–257. EDN XPNWMP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257>
13. *Kosnik M. V., Dulov V. A.* Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // *Measurement Science and Technology*. 2011. Vol. 22, no. 1. 015504. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/1/015504>
14. *Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography / М. Юровская [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 9. P. 4380–4394. EDN ГННРАЕ. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20296>
15. *Spectral characteristics of gravity-capillary waves, with connections to wave growth and microbreaking / N. J. M. Laxague [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 7. P. 4576–4592. EDN YJFZGX. <https://doi.org/10.1029/2018JC01385>
16. *Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging / C. J. Zappa [et al.] // Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19, no. 5. 055503. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/5/055503>
17. *An overview of sea state conditions and air-sea fluxes during RaDyO / C. J. Zappa [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C7. C00H19. EDN YCMQWD. <https://doi.org/10.1029/2011JC007336>
18. *Hughes B. A., Grant H. L., Chappell R. W.* A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave moments // *Deep Sea Research*. 1977. Vol. 24, iss. 12. P. 1211–1223. [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90524-0](https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90524-0)
19. *Scanning laser wave recorder with registration of “Instantaneous” sea surface profiles / V. V. Sterlyadkin [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2021. Vol. 38, iss. 8. P. 1415–1424. EDN KJSNHJ. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
20. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Бадулин С. И.* Натурные измерения формы морской поверхности и одномерного пространственного спектра волнения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21, № 1. С. 270–285. EDN LTPURJ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-1-270-285>
21. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В.* Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // *Российский технологический журнал*. 2022. Т. 10, № 5. С. 100–110. EDN AZEGKW. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>
22. *Sterlyadkin V. V.* The problem of reconstructing the profile of the sea surface from the video image of laser beams // *Oceanology*. 2024. Vol. 64, iss. 3. P. 342–352. EDN PWJTAY. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700024>
23. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Задерновский А. А.* Измерение капиллярных колебаний морской поверхности // *Океанология*. 2025. Т. 65, № 2. С. 201–211. EDN DXRYMK.
24. *Modulation of wind-wave breaking by long surface waves / V. A. Dulov [et al.] // Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 14. 2825. <https://doi.org/10.3390/rs13142825>

25. Modulation of short wind waves by long waves / M. A. Donelan [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2010. Vol. 115, iss. C10. C10003. <https://doi.org/10.1029/2009JC005794>

Об авторах:

Стерлядкин Виктор Вячеславович, профессор кафедры физики и технической механики, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1832-8608**, **Web of Science ResearcherID: D-7125-2017**, **Scopus Author ID: 6505940691**, **SPIN-код: 8368-0889**, sterlyadkin@mail.ru

Куликовский Константин Владимирович, доцент кафедры физики и технической механики, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9296-6424**, **Scopus Author ID: 57223241696**, **Web of Science ResearcherID: D-7125-2017**, **SPIN-код: 8368-0889**, constantinkk@mail.ru

Лихачева Мария Викторовна, старший преподаватель кафедры физики и технической механики, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), **ORCID ID: 0009-0007-6021-080X**, **Scopus Author ID: 23005642200**, **Web of Science ResearcherID: OBN-9238-2025**, **SPIN-код: 4548-9098**, likhacheva.m@gmail.com