

УДК 551.46.086
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Измерение капиллярных волн лазерным волнографом

В.В. Стерлядкин, К.В. Куликовский ©

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

© Автор для переписки, e-mail: constantinkk@mail.ru

Резюме

Цели. Капиллярные волны на морской поверхности играют важную роль в задачах дистанционного зондирования как в оптическом, так и в микроволновом диапазонах длин волн. Однако исследовать процессы рассеяния электромагнитного излучения на взволнованной морской поверхности можно только при надежном контроле параметров этих капиллярных волн в натуральных условиях. До настоящего времени не существовало методов измерения капиллярных волн в натуральных условиях. Целью настоящей работы являлось создание таких методов и их проверка в лабораторных и натуральных условиях.

Методы. В лаборатории были отработаны новые лазерные методы регистрации капиллярных волн на частотах до 100 Гц. Предложенные методы являются дистанционными, не искажающими поверхность. Они основаны на регистрации рассеянного лазерного излучения с помощью видеокамеры.

Результаты. В лабораторных условиях получены пространственные профили, временные зависимости высот для всех точек траектории лазерной развертки, частотные спектры мощности. Показано, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать 30°, а амплитуда капиллярных волн на частотах выше 25 Гц не превышает 0.5 мм. В натуральных условиях на морской платформе апробирована новая версия сканирующего лазерного волнографа. Измерения подтвердили возможность измерения параметров морского волнения на пространственных масштабах, охватывающих 3 порядка: от единиц миллиметров до единиц метров.

Выводы. Созданный волнограф позволяет проводить прямые измерения «мгновенных» профилей морской поверхности с временной синхронизацией в 10^{-4} с и пространственной точностью лучше 0.5 мм. Метод позволяет получать большие ряды (21 000) «мгновенных» профилей волнения с частотой обновления 60 Гц, что открывает возможности для исследования физики эволюции волнения, влияния параметров волнения на рассеяние электромагнитных волн. Достоинством метода является прямой характер измерения аппликат и всех характеристик волнения не только во времени, но и в пространстве. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения. Экспериментально в натуральных условиях доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

Ключевые слова: альтиметрия, спектр морского волнения, капиллярные волны, взаимодействие атмосферы и океана, лазерный волнограф, дистанционное зондирование

• Поступила: 03.02.2022 • Доработана: 11.07.2022 • Принята к опубликованию: 02.09.2022

Для цитирования: Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Измерение капиллярных волн лазерным волнографом. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):100–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Measurement of capillary waves with a laser wave recorder

Viktor V. Sterlyadkin, Konstantin V. Kulikovsky [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: constantinkk@mail.ru

Abstract

Objectives. Capillary waves on the sea surface play an important role in remote sensing, both in the optical and microwave wavelength ranges. However, processes of electromagnetic radiation scattering on a rough sea surface cannot be studied in the absence of reliable monitoring of the parameters of these capillary waves under natural conditions. Therefore, the aim of the present work was to develop methods for such monitoring purposes and test them under laboratory and field conditions.

Methods. Novel laser-based methods for recording capillary waves at frequencies up to 100 Hz were developed in the laboratory. The proposed remote methods, which do not interfere with the sea surface, are based on the recording of scattered laser radiation using a video camera.

Results. Under laboratory conditions, spatial profiles, time dependences of heights for all points of a laser sweep trajectory, and frequency power spectra were obtained. It is shown that slopes in capillary waves can reach 30° and that the amplitude of capillary waves at frequencies above 25 Hz does not exceed 0.5 mm. A new version of a scanning laser wave recorder was tested under natural conditions on an offshore platform. The measurements confirmed the possibility of measuring the parameters of sea waves on spatial scales covering 3 orders of magnitude: from units of millimeters to units of meters.

Conclusions. The developed wave recorder can be used to carry out direct measurements of “instantaneous” sea surface profiles with a time synchronization precision of 10^{-4} s and a spatial accuracy of better than 0.5 mm. The method makes it possible to obtain large series (21000) of «instantaneous» wave profiles with a refresh rate of 60 Hz, which opens up opportunities for studying the physics of wave evolution and the influence of wave parameters on the scattering of electromagnetic waves. The advantage of the method is the direct nature of the measurement of applicates and other wave characteristics not only in time but also in space. The entirely remote method does not distort the properties of the surface and is not affected by wind, waves, or sea currents. The possibility of using the proposed method under natural conditions at any time of the day and in a wide range of weather conditions has been experimentally ascertained.

Keywords: altimetry, spectrum of sea waves, capillary waves, atmosphere-ocean interaction, laser wave recorder, remote sensing

• Submitted: 03.02.2022 • Revised: 11.07.2022 • Accepted: 02.09.2022

For citation: Sterlyadkin V.V., Kulikovsky K.V. Measurement of capillary waves with a laser wave recorder. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):100–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Капиллярные волны играют принципиально важную роль в задачах рассеяния электромагнитных волн на взволнованной морской поверхности и при решении обратных задач дистанционного зондирования Земли из космоса. Влияние капиллярных волн каждый может наглядно наблюдать над

спокойной водной акваторией: в случае появления ветровых порывов поверхность покрывается мелкой рябью, изменяет свой цвет и темнеет за счет роста коэффициента поглощения. Аналогичные эффекты резкого роста коэффициента поглощения при появлении капиллярных волн наблюдаются не только в оптическом, но и микроволновом диапазоне длин волн. По этой причине капиллярные волны нередко

оказываются определяющим фактором в задачах восстановления метеопараметров атмосферы и подстилающей поверхности по радиотепловым и оптическим измерениям Земли с космических аппаратов. В связи с этим исследование детальной связи параметров капиллярных волн с рассеивающими характеристиками морской поверхности является важной фундаментальной и прикладной задачей. Трудность проведения таких исследований заключается в том, что до последнего времени фактически не существовало прямых методов дистанционного определения параметров капиллярных волн в натуральных условиях. Для измерения параметров гравитационных волн нередко используются дистанционные методы зондирования из-под воды по акустическим отражениям или по преломлению лазерного луча [1, 2]. Но данные измерения не позволяют регистрировать капиллярные волны. При проведении измерений с морских платформ или самолетов используют методы лазерной альтиметрии. Однако пространственное разрешение в этих случаях либо отсутствует [3] (одноточечные измерения), либо составляет единицы сантиметров [4, 5]. Эти методы также не дают возможность регистрировать капиллярные волны, амплитуда которых составляет доли миллиметров. Следует отметить дистанционные методы измерения параметров волнения, основанные на стереосъемке [6]. Однако эти методы не являются прямыми, и их чувствительность не позволяет измерять параметры капиллярных волн.

Имеется значительное количество публикаций по измерениям искусственных капиллярных волн в бассейнах. Хороший анализ данных методов дан в работах [7, 8]. Общим недостатком измерений в бассейнах является наличие резонансных краевых эффектов, которые искажают результаты. Теория турбулентности гравитационных и капиллярных волн развита во многих работах¹ [9–13], однако нам не удалось найти результаты исследований, где в натуральных условиях проводились бы дистанционные пространственно-временные измерения характеристик капиллярных волн.

Настоящая работа направлена на создание дистанционного лазерного метода, позволяющего проводить измерения волнения от гравитационных до капиллярных масштабов. В результате

¹ Филатов С.В. Нелинейные волновые и вихревые движения на поверхности жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Черноголовка; 2020. 82 с. <https://docplayer.com/170397192-Filatov-sergey-vasilevich-nelineynye-volnovye-i-vihrevye-dvizheniya-na-poverhnosti-zhidkosti.html>. [Filatov S.V. Nonlinear wave and vortex motions on the surface of a liquid. Cand. Sci. Thesis (Phys.-Math.). Chernogolovka; 2020. 82 p. (in Russ.). <https://docplayer.com/170397192-Filatov-sergey-vasilevich-nelineynye-volnovye-i-vihrevye-dvizheniya-na-poverhnosti-zhidkosti.html>]

исследований был создан макет лазерного волнографа, который прошел испытания как в лабораторных, так и в натуральных условиях. В работе приводится описание способа и результаты измерений.

В предыдущих работах [14, 15] нами были предложены новые лазерные методы измерений «мгновенной» формы взволнованной морской поверхности. Основой методов является лазерное сканирование водной поверхности с регистрацией на видеокамеру траектории луча на границе раздела. При этом проводится синхронизация начала развертки луча с началом записи изображения на матрицу видеокамеры. Данные методы позволили дистанционно определять детальную структуру всех видов гравитационных и гравитационно-капиллярных волн в широком диапазоне метеоусловий. Достигнутая точность метода по измерению высоты поверхности раздела составила 1 мм, а точность привязки всей траектории к единому моменту времени составляла 10^{-4} с. Экспериментальная проверка разработанных методов в натуральных условиях показала, что для измерения чисто капиллярной составляющей волнения требуется их модернизация. Во-первых, капиллярная составляющая волнения становится существенной для частот выше 16 Гц, поэтому традиционная частота видеосъемки в 25 Гц не позволяла их регистрировать. Как минимум частота регистрации профилей должна быть вдвое больше. Во-вторых, амплитуда капиллярных волн имеет масштаб сравнимый или меньший, чем 1 мм, следовательно, чувствительность метода, с помощью которого будут регистрироваться эти волны, должна быть на уровне 0.5 мм и меньше. В настоящей работе осуществляется доработка методики дистанционных лазерных измерений волнения до уровня, необходимого для регистрации капиллярных волн. Проводится проверка метода в лабораторных условиях и адаптация методики к измерениям в натуральных условиях.

ГЕНЕРАЦИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ И МЕТОДИКА ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Важным этапом при создании метода измерения капиллярных волн в морских условиях являются лабораторные измерения. На рис. 1 представлена схема лабораторной установки, которая позволяет генерировать капиллярные волны заданной амплитуды и частоты, а также обеспечивает дистанционные измерения параметров создаваемых волн. Колебания диффузора низкочастотного динамика передаются легким стержнем на круглую площадку, которая является источником возмущений на водной поверхности. Линейка позволяет регистрировать на фотографиях длину волны генерируемых волн. Стробоскоп

позволяет «остановить» изображение капиллярных волн, если его частота согласована с частотой сигнала, подаваемого на динамик. Использование стробоскопа позволило получать четкое изображение волн на поверхности ванны и надежно измерять пространственную протяженность набора из нескольких волн.

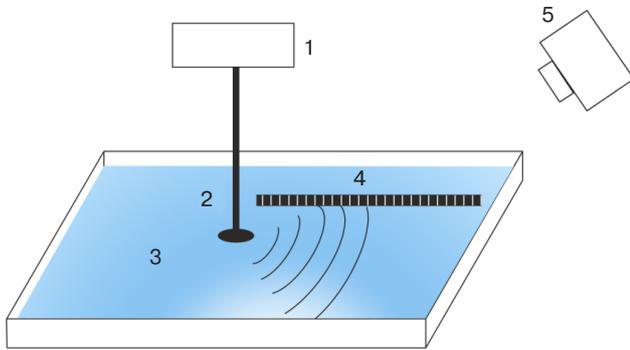


Рис. 1. Схема генерации капиллярных волн в лабораторных условиях:

- 1 – низкочастотный динамик, 2 – осциллирующая площадка, 3 – водная поверхность, 4 – линейка, 5 – стробоскоп

На рис. 2 представлены фотографии создаваемых волн при разной частоте генератора f . На рис. 2а частота составляет $f = 16$ Гц, что соответствует гравитационно-капиллярной волне, а на рис. 2б частота генерируемых волн $f = 60$ Гц, что относится к чисто капиллярным колебаниям.



Рис. 2. Изображение поверхностных волн при частоте генерации $f = 16$ Гц (а) и при частоте генерации $f = 60$ Гц (б)

Созданная установка позволила проверить дисперсионное соотношение между круговой частотой волны ω и длиной волны λ . Теоретические выражения для дисперсионного соотношения и фазовой скорости волн имеют вид [16]:

$$\omega = \sqrt{kg + \frac{k^3\sigma}{\rho}}, \quad (1)$$

Таблица. Результаты лабораторных измерений

Частота f , Гц	8	10	12	14	16	18	20	24	28	35	40	50	60	70	80	100
Длина волны λ , мм	27.5	22.0	18.3	16.3	13.7	12.0	11.0	9.2	8.0	7.0	6.2	5.2	4.3	3.75	3.6	2.9

$$U = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} + \frac{k\sigma}{\rho}}, \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости. В данном уравнении первое слагаемое под корнем определяет гравитационную часть, в то время как второе слагаемое отвечает за капиллярную составляющую. Для чистой воды $\sigma = 72$ мН/м, и условная граница перехода от преимущественно гравитационных к преимущественно капиллярным волнам соответствует равенству этих слагаемых. При этом $k = \frac{\rho g}{\sigma} = 369 \text{ м}^{-1}$, а длина волны, соответствующая границе перехода к капиллярным волнам, составляет $\lambda_{\text{гр}} = 17$ мм. Результаты лабораторных измерений представлены в таблице.

На рис. 3 представлена дисперсионная зависимость для поверхностных волн. Следует отметить, что в процессе эксперимента не принимались никакие специальные меры для очистки воды от поверхностно активных веществ, что понизило величину σ . Оптимизация теоретической зависимости по этому параметру по отношению к экспериментальным измерениям показала, что наилучшее приближение соответствует $\sigma = 45$ мН/м. Отметим, что в лабораторных измерениях условная длина волны $\lambda_{\text{гр}}$, соответствующая переходу к капиллярной составляющей, уменьшается пропорционально коэффициенту поверхностного натяжения.

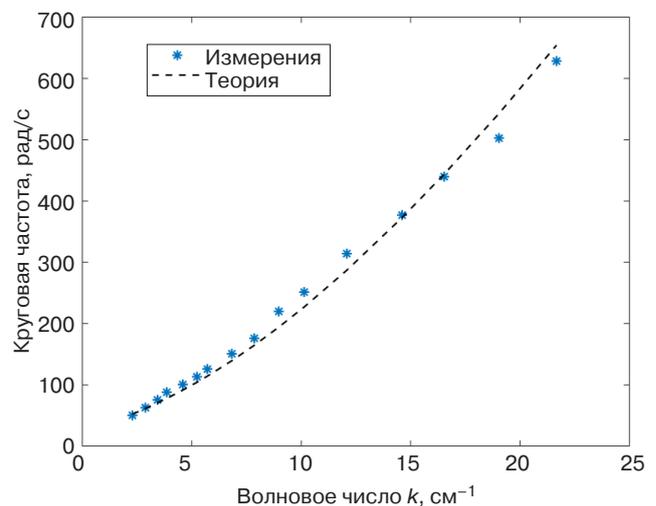


Рис. 3. Экспериментальная дисперсионная зависимость для гравитационно-капиллярных и капиллярных волн ($\sigma = 45$ мН/м)

Из графика видно, что измеренная дисперсионная зависимость хорошо соответствует теоретической зависимости (1).

Следующим шагом эксперимента была регистрация амплитуды возникающих гравитационно-капиллярных волн. Для этого поверхность освещалась лазерным излучением, которое сканировало вдоль поверхности с короткими остановками в отдельных точках. На рис. 4 показана фотография, где четко видна граница, на которой рассеиваются лазерные лучи. Регистрация движения поверхности при распространении волны осуществляется с помощью расположенной сбоку видеокамеры с частотой съемки 60 Гц. Лазерные лучи при попадании в воду рассеиваются, создавая почти вертикальный луч. Верхняя граница каждого луча соответствует границе раздела «вода-воздух».

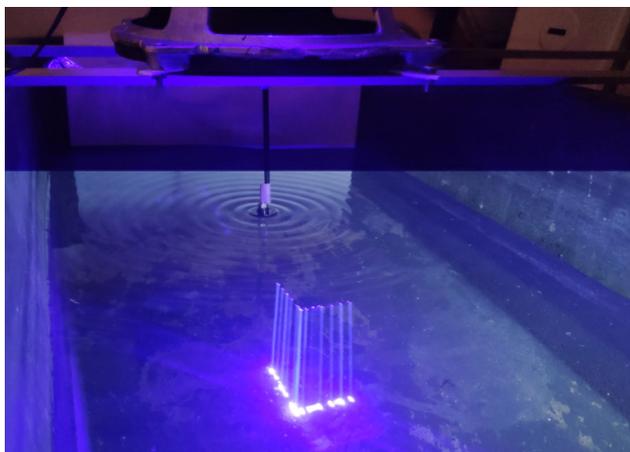


Рис. 4. Лазерные лучи при рассеянии в воде формируют четкий край на поверхности

Однако такая схема измерений не позволяла регистрировать сечение поверхности, ее профиль. Для решения этой проблемы схема измерений была модернизирована. Для этого была собрана установка, схема которой представлена на рис. 5.

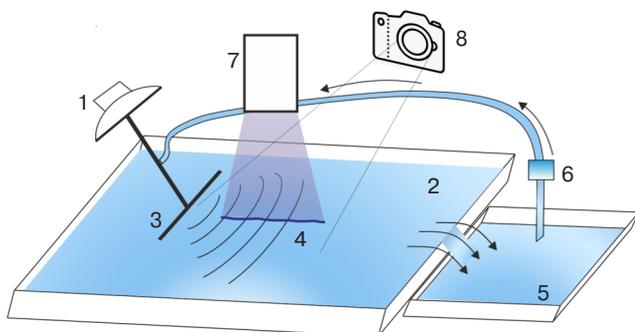


Рис. 5. Схема лабораторных оптических измерений капиллярных волн: 1 – динамик, 2 – водная поверхность, 3 – осциллирующая пластина, 4 – граница раздела, освещенная сканирующим лазером, 5 – нижний резервуар, 6 – насос, 7 – электронно управляемый сканатор, 8 – видеокамера

В данном эксперименте генератором волн являлась осциллирующая пластинка, частично погруженная в воду. Диффузор динамика передавал колебания на водную поверхность с помощью жестко соединенной с ним пластинки. Питание динамика осуществлялось звуковым генератором с усилителем, позволяющим изменять амплитуду и частоту колебаний пластинки в широких пределах. В результате смещения пластинки на водной поверхности возникали плоские волны, которые освещались сканирующим лазерным лучом. Для уменьшения количества пылинок, оседающих на поверхности, проводился слив воды через край ванны в нижний резервуар, из которого вода с помощью насоса возвращалась в верхнюю ванну. Лазерное излучение с длиной волны 450 нм и мощностью около 1 Вт с помощью электронно управляемого сканатора разворачивалось на поверхности вдоль прямой линии длиной около 80 мм. Регистрация луча, рассеянного на поверхности раздела, производилась сбоку видеокамерой. При этом время развертки луча было близко к длительности выдержки видеокадров. Пример видеокадра, на котором лазерное излучение рассеивается на возмущенной поверхности раздела, представлен на рис. 6. На каждом кадре четко видна граница водной поверхности, которая с учетом калибровки матрицы видеокамеры может быть преобразована в высоту возмущения в каждой точке траектории луча. Наличие пылинок на поверхности приводило к яркой засветке в месте расположения пылинок, однако слив воды значительно уменьшил их количество, что позволило ускорить обработку кадров.

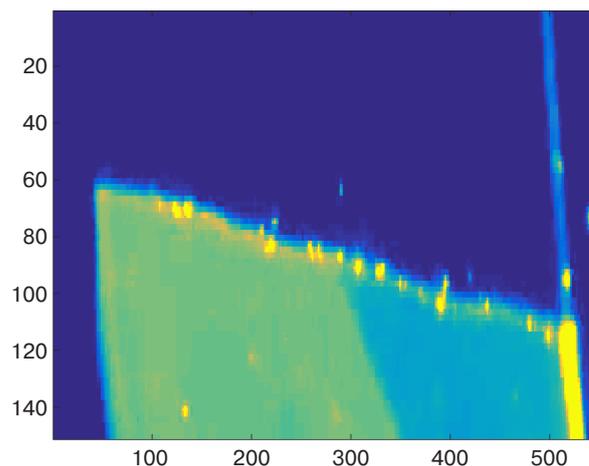


Рис. 6. Видеокадр волновой поверхности, по которой распространяется капиллярная волна

Обработка видеокадров проводилась по каждому столбцу изображения. На рис. 7 представлен график изменения интенсивности засветки вдоль одного из столбцов кадра. Видно, что граница поверхности раздела, которая соответствует скачку интенсивности

до заданного уровня, имеет протяженность на уровне одного пикселя. Следовательно, разрешение данного метода по высоте соответствует масштабу одного пикселя, что в нашем эксперименте составляло 0.15 мм. Последовательная обработка всех столбцов видеокadra позволяет регистрировать профиль волны.

Калибровка видео изображения и перевод пикселей в высоту в миллиметрах проводился

с учетом положения невозмущенной поверхности и масштабирования по известному изображению (мире). На следующем этапе полезным оказалось сглаживание профиля скользящим окном. На рис. 8 представлены примеры волнового профиля для гравитационно-капиллярных и капиллярных волн различной частоты с учетом сглаживания.

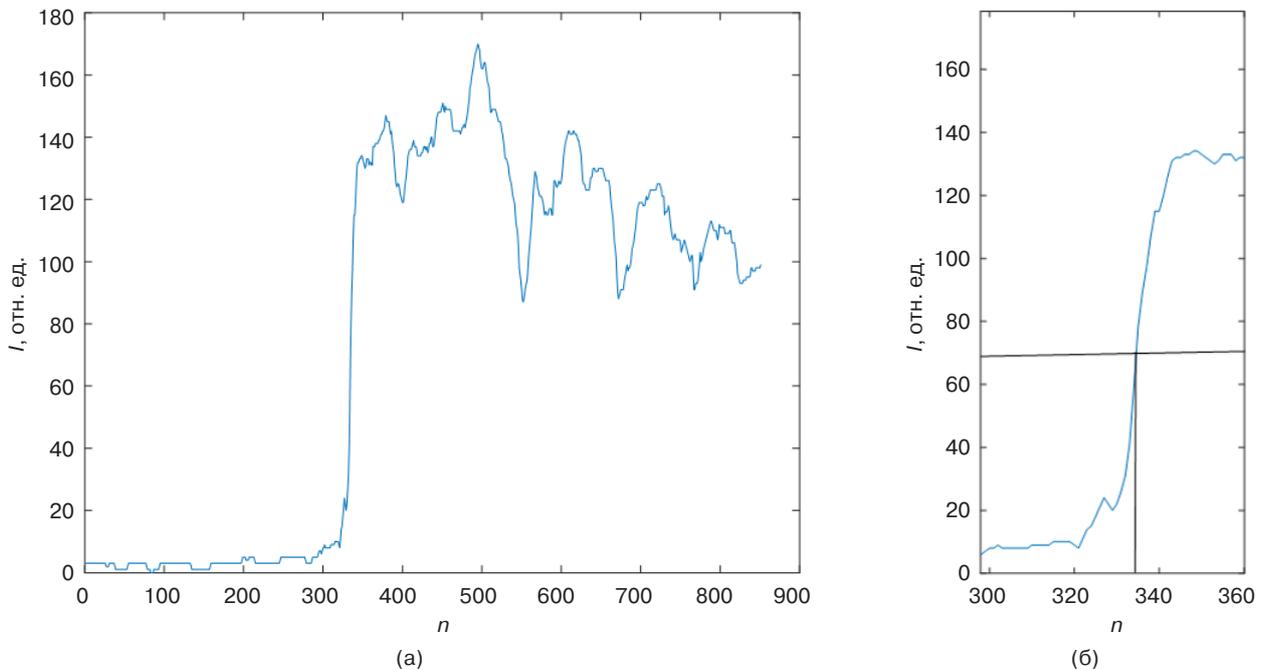


Рис. 7. Зависимость интенсивности изображения от номера строки вдоль одного из столбцов видеокadra на рис. 5 (а) и граница в увеличенном масштабе (видна четкая граница засветки) (б)

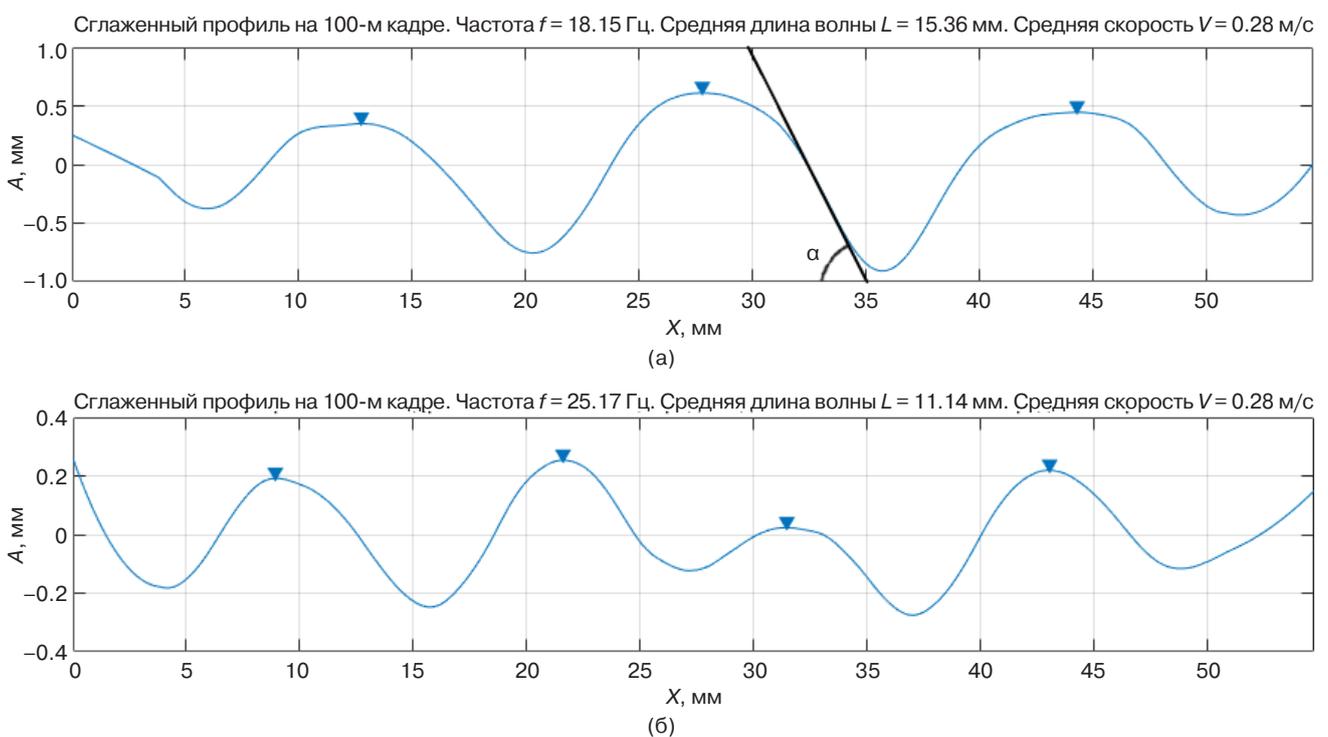


Рис. 8. Профиль капиллярных волн на отдельном кадре изображения:
(а) частота волны 18 Гц, (б) частота волны 25 Гц

Следует отметить, что амплитуда волн на частотах выше 16 Гц не превышала одного миллиметра и уменьшалась с увеличением частоты, хотя амплитуда колебаний диффузора динамика и возмущающего стержня на поверхности ванны не изменялась. Это свидетельствует о росте коэффициента затухания с ростом частоты капиллярных волн. Кроме пространственного изображения капиллярных волн проведенный эксперимент позволил получать временную изменчивость аппликат (высоты) в любой точке траектории. На рис. 9а представлена зависимость высоты возмущения от времени. Фурье-анализ данной зависимости позволяет получать спектр мощности волнового процесса (рис. 9б). На спектре четко регистрируется основная частота возбуждаемых капиллярных волн, которая соответствует частоте колебаний диффузора динамика.

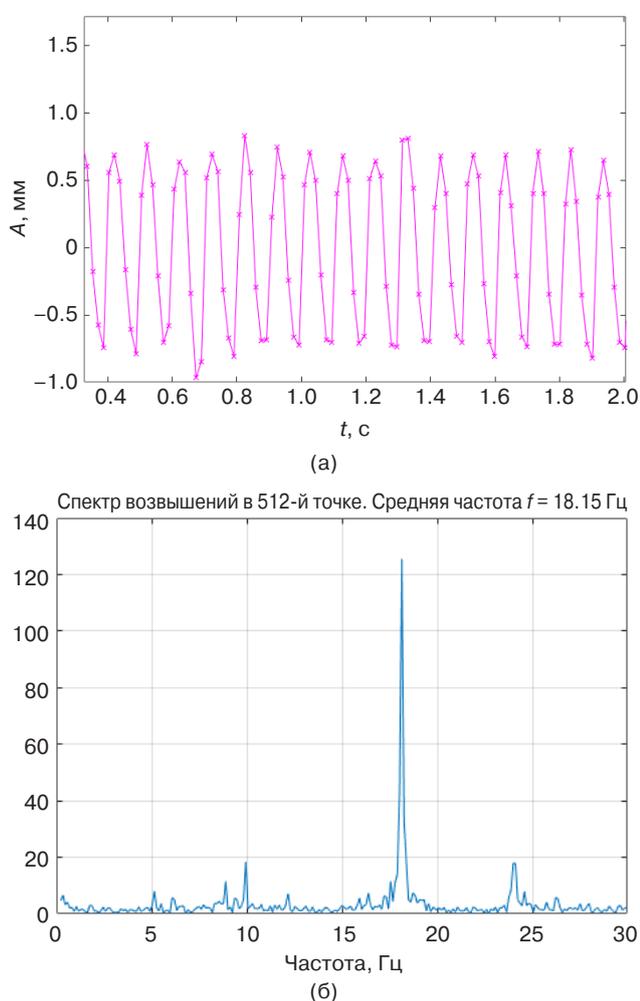


Рис. 9. Зависимость высоты поверхности раздела в одной точке траектории от времени (а) и спектр мощности для представленной временной реализации (б)

Проведенные лабораторные исследования капиллярных волн дали возможность напрямую измерить их основные особенности и учесть эти особенности

при проектировании морского волнографа, позволяющего регистрировать капиллярную составляющую морского волнения. В результате проведенного анализа можно сделать ряд выводов. Во-первых, из формы волны на рис. 8а следует, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать уровня $\xi = \text{tg}(\alpha) = 2/5$, что составляет 23° . В натуральных условиях капиллярные волны накладываются на гравитационные, увеличивая общий наклон участка поверхности. Можно ожидать, что результирующие уклоны в натуральных условиях могут достигать 30° и более. При этом лазерный луч, падающий вертикально вниз на морскую поверхность, будет отклоняться больше, чем на 60° .

Другой вывод заключается в том, что на частотах 25–30 Гц не удастся создать капиллярные волны с амплитудой больше 0.5 мм. Отсюда следует, что регистрация капиллярной составляющей морского волнения в натуральных условиях на частотах от 16 до 30 Гц потребует чувствительности аппаратуры на уровне 0.5 мм или выше.

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

В августе 2021 г. были проведены первые натурные измерения с помощью сканирующего лазерного волнографа, который позволял проводить регистрацию капиллярных волн. Измерения проводились с морского пирса Морского гидрофизического института и со стационарной океанографической платформы Морского гидрофизического института Российской Академии наук, расположенной в пгт. Качивели, Крым. В отличие от предыдущей версии волнографа, описанной в работе [14], частота видеосъемки была повышена с 25 до 60 Гц. Это позволило измерять спектры волнения до 30 Гц, где капиллярная составляющая уже является основной. Напомним, что для чистой воды, начиная с частот выше 16 Гц, капиллярные силы превышают гравитационные. Второе усовершенствование касалось использования трансфокатора на объективе видеокамеры, который повысил пространственное разрешение до 0.3–0.6 мм.

Пример видеокadra, полученного 26 августа 2021 г. в 20:47 по московскому времени на морском пирсе, представлен на рис. 10. На изображении четко регистрируется форма волновой поверхности. За каждую 6-минутную реализацию удастся зарегистрировать 21 600 «мгновенных» спектров. Это позволяет вычислять как временные, так и пространственные спектры волнения, одномерные и двумерные уклоны на любом масштабе, а также изменчивость параметров волнения при изменении метеорологической обстановки.

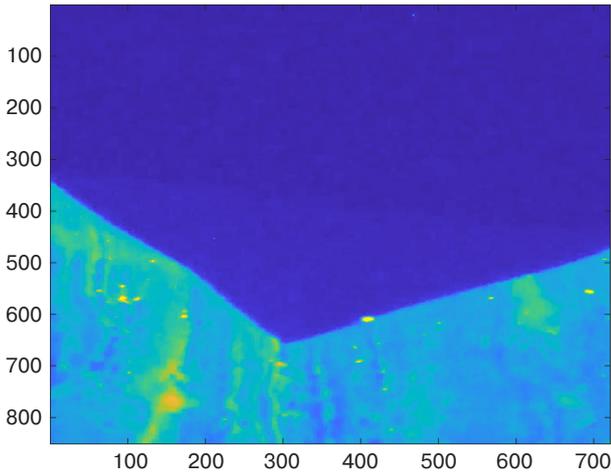


Рис. 10. Типичный видеокадр волнения (оси в пикселах). Частота оцифровки 60 Гц

На рис. 11 приведен пример реализации от 26 августа 2021 г. для зависимости высоты от номера кадра для одной точки траектории (полное количество разрешаемых точек на траектории развертки лазерного луча – 700). На рис. 11а представлена вся реализация, а на рис. 11б – небольшой отрезок реализации в увеличенном масштабе.

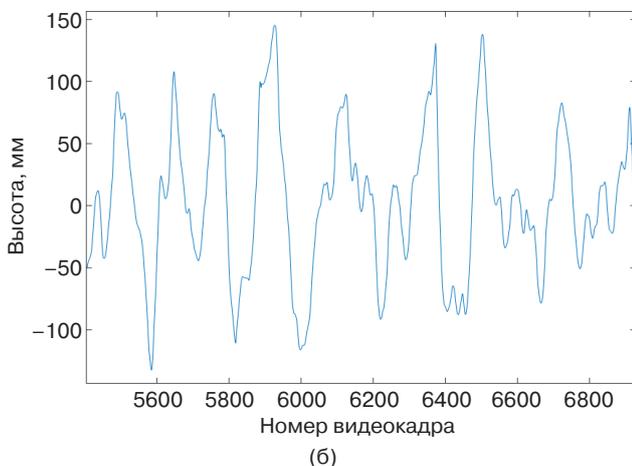
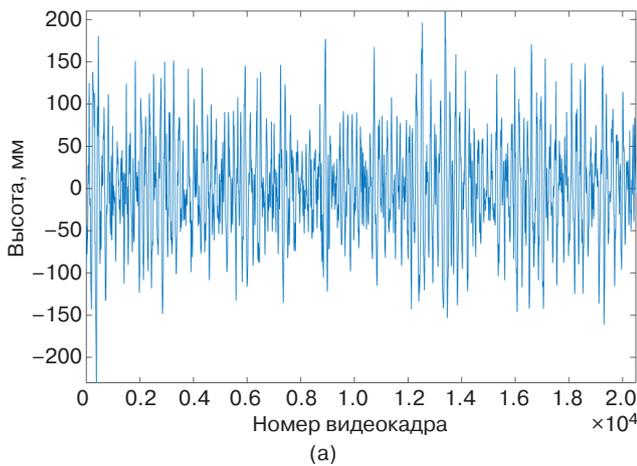


Рис. 11. Пример зависимости высоты волнения от номера кадра для одной точки на траектории развертки (а) и участок записи в увеличенном масштабе (б)

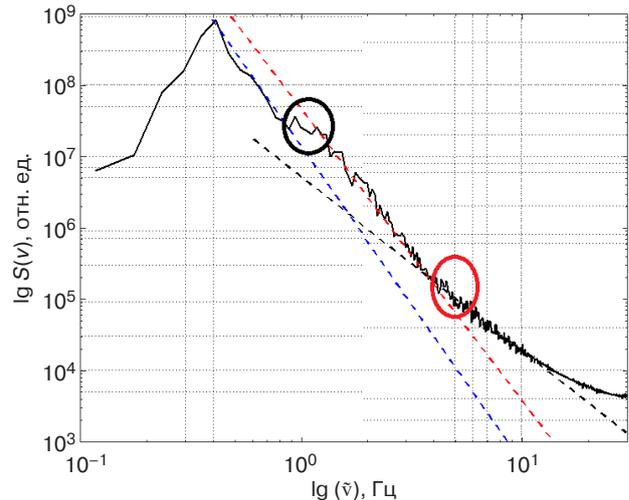


Рис. 12. Спектр возвышений в отдельной точке профиля в логарифмическом масштабе для развивающегося волнения (26.08.2021, Кацивели). Кругами обозначены области перехода от одного наклона спектра к другому

Интерес представляет временной спектр полученной реализации (рис. 12). Традиционно его представляют в двойном логарифмическом масштабе. На спектре прослеживаются три участка, наклон которых характеризует различные формы волнения. Самый низкочастотный участок спектра (длинноволновый) имеет наклон -4.5 ± 0.3 , средний участок отвечает за гравитационное волнение и имеет наклон -4.0 ± 0.2 , а третий участок, по-видимому, уже учитывает капиллярные волны. Его наклон существенно ниже первых двух и составляет -2.6 ± 0.3 . Полученные показатели степенной зависимости хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными. Так степенная зависимость с наклоном -4.0 соответствует спектру В.Е. Захарова и Н.Н. Филоненко [10], а участок с наклоном -4.5 – переходной режим к спектру Филлипса $E \sim f^{-5}$ [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данном этапе исследований авторы не ставили задачу интерпретации спектральных или иных характеристик волнения. Целью настоящей работы были создание и апробация в лабораторных и натуральных условиях нового лазерного волнографа, проверка его возможностей по измерению полного спектра гравитационных, гравитационно-капиллярных и капиллярных волн в натуральных морских условиях. Поставленные задачи удалось выполнить. В лабораторных условиях были проверены лазерные методы регистрации капиллярных волн, получены характеристики волн на высоких частотах: пространственные профили, временные зависимости высот для всех точек траектории лазерной

развертки, частотные спектры мощности. Сделаны выводы о том, что уклоны в капиллярных волнах могут достигать 30° , а амплитуда на частотах выше 25 Гц не превышает 0.5 мм. Важным этапом работы была проверка новой версии сканирующего лазерного волнографа в морских натуральных условиях. Измерения подтвердили возможность предложенного лазерного метода по измерению параметров морского волнения на пространственных масштабах, охватывающих 3 порядка: от единиц миллиметров до единиц метров. Нам не известны мировые аналоги, имеющие такие характеристики. Метод запатентован [15]. Создание волнографа, позволяющего проводить прямые измерения «мгновенных» профилей морской поверхности с временной синхронизацией в 10^{-4} с и пространственной точностью лучше 0.5 мм открывают широкие возможности для исследования физики эволюции волнения, влияния волнения на рассеяние электромагнитных волн. Такие возможности открываются впервые. Достоинством метода является прямой характер измерения аппликата и всех характеристик волнения не только во времени, но и в пространстве. Это позволяет получать

большие ряды (21 000) «мгновенных» профилей волнения для каждой 6-минутной реализации. Метод полностью дистанционен, не искажает свойства поверхности, не подвержен влиянию ветра, волн и морского течения, позволяет измерять долю пены на поверхности. Экспериментально в натуральных условиях доказана возможность применения предложенного метода в любое время суток и в широком диапазоне погодных условий.

Вклад авторов

Идеи предложенных методов, аппаратная реализация и сборка макетного образца, а также разработка программного обеспечения для обработки данных реализованы сотрудниками кафедры физики РТУ МИРЭА профессором В.В. Стерлядкиным и старшим преподавателем К.В. Куликовским.

Authors' contribution

The ideas of the proposed methods, hardware implementation, and assembly of the device, as well as the development of software for processing data were implemented by Professor V.V. Sterlyadkin and Senior Lecturer K.V. Kulikovskiy, the staff of the Department of Physics at the MIREA – Russian Technological University.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press; 2010. 404 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
2. Hashimoto N. Analysis of the directional wave spectrum from field data. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Liu P.L.-F. (Ed.). Singapore: World Scientific. 1997;3:103–143. https://doi.org/10.1142/9789812797568_0004
3. Grare L., Lenain L., Melville W.K. Vertical profiles of the wave-induced airflow above ocean surface waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2018;48(12):2901–2922. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0121.1>
4. Hwang P.A., Wang D.W., Walsh E.J., Krabill W.B., Swift R.N. Airborne measurements of the wave number spectra of ocean surface waves. Part I: Spectral slope and dimensionless spectral coefficient. *J. Phys. Oceanogr.* 2000;30(11):2753–2767. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2)
5. Allender J., Audunson T., Barstow S.F., Bjerken S., Krogstad H.E., Steinbakke P., Vartdal L., Borgman L.E., Graham C. The WADIC project; a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Eng.* 1989;16(5–6):505–536. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0029-8018(89)90050-4)
6. Banner M.L., Jones I.S., Trinder J. Wavenumber spectra of short gravity waves. *J. Fluid Mech.* 1989;198:321–344. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000157>

REFERENCES

1. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press; 2010. 404 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536>
2. Hashimoto N. Analysis of the directional wave spectrum from field data. In: *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Liu P.L.-F. (Ed.). Singapore: World Scientific. 1997;3:103–143. https://doi.org/10.1142/9789812797568_0004
3. Grare L., Lenain L., Melville W.K. Vertical profiles of the wave-induced airflow above ocean surface waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2018;48(12):2901–2922. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0121.1>
4. Hwang P.A., Wang D.W., Walsh E.J., Krabill W.B., Swift R.N. Airborne measurements of the wave number spectra of ocean surface waves. Part I: Spectral slope and dimensionless spectral coefficient. *J. Phys. Oceanogr.* 2000;30(11):2753–2767. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2753:AMOTWS>2.0.CO;2)
5. Allender J., Audunson T., Barstow S.F., Bjerken S., Krogstad H.E., Steinbakke P., Vartdal L., Borgman L.E., Graham C. The WADIC project; a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Eng.* 1989;16(5–6):505–536. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(89\)90050-4](https://doi.org/10.1016/0029-8018(89)90050-4)
6. Banner M.L., Jones I.S., Trinder J. Wavenumber spectra of short gravity waves. *J. Fluid Mech.* 1989;198:321–344. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000157>

7. Falcon E., Mordant N. Experiments in surface gravity-capillary wave turbulence. *Annual Rev. Fluid Mech.* 2022;54:1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>
8. Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. Excitation and detection of nonlinear waves on a charged surface of liquid hydrogen. *Instruments and Experimental Techniques.* 2002;45(6):758–763. <https://doi.org/10.1023/A:1021418819539>
9. Захаров В.Е. Слабая турбулентность в средах с распадным спектром. *Прикладная механика и техническая физика.* 1965;4:35–39. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/2f5/2f55daccf31e1bdf4c6c44e436b4166.pdf>
10. Захаров В. Е., Филоненко Н. Н. Спектр энергии для стохастических колебаний поверхности жидкости. *Докл. АН СССР.* 1966;170(6):1292–1295. URL: <http://www.mathnet.ru/links/ec2b951f99ebc10ab5bb4c2bf4fe5948/dan32646.pdf>
11. Захаров В.Е., Филоненко Н.Н. Слабая турбулентность капиллярных волн. *Прикладная механика и техническая физика.* 1967;5:62–67. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/24e/24ea0a63fb235c70765e3dd7eceedea.pdf>
12. Бадюлин С.И., Захаров В.Е. Спектр Филлиппса и модель диссипации ветрового волнения. *Теоретическая и математическая физика.* 2020;202(3):353–363. <https://doi.org/10.4213/tmf9801>
13. Lukaschuk S., Nazarenko S., McLelland S., Denissenko P. Gravity wave turbulence in wave tanks: Space and time statistics. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(4):044501. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.044501>
14. Sterlyadkin V.V., Kulikovskii K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of «instantaneous» sea surface profiles. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2021;38(8):1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
15. Стерлядкин В.В. Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности: Пат. RU № 2749727. Заявка № RU2020134068А; заявл. 16.10.2020; опубл. 16.06.2021.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика: Учебное пособие.* В 10 т. Т. VI. *Гидродинамика.* М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.; 1986. 736 с.
7. Falcon E., Mordant N. Experiments in surface gravity-capillary wave turbulence. *Annual Rev. Fluid Mech.* 2022;54:1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>
8. Brazhnikov M.Yu., Levchenko A.A., Mezhev-Deglin L.P. Excitation and detection of nonlinear waves on a charged surface of liquid hydrogen. *Instruments and Experimental Techniques.* 2002;45(6):758–763. <https://doi.org/10.1023/A:1021418819539>
9. Zakharov V.E. Weak turbulence in media with a decay spectrum. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1965;6(4):22–24. <https://doi.org/10.1007/BF01565814> [Original Russian Text: Zakharov V.E. Weak turbulence in media with a decay spectrum. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika.* 1965;4:35–39 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/2f5/2f55daccf31e1bdf4c6c44e436b4166.pdf>]
10. Zakharov V.E., Filonenko N.N. Energy spectrum for stochastic oscillations of the surface of a liquid. *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 1966;170(6):1292–1295 (in Russ.). Available from URL: <http://www.mathnet.ru/links/ec2b951f99ebc10ab5bb4c2bf4fe5948/dan32646.pdf>
11. Zakharov V.E., Filonenko N.H. Weak turbulence of capillary waves. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1967;8:37–40. <https://doi.org/10.1007/BF00915178> [Original Russian Text: Zakharov V.E., Filonenko N.H. Weak turbulence of capillary waves. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika.* 1967;5:62–67 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/24e/24ea0a63fb235c70765e3dd7eceedea.pdf>]
12. Badulin S.I., Zakharov V.E. Phillips spectrum and a model of wind wave dissipation. *Theoret. and Math. Phys.* 2020;202(3):309–318. <https://doi.org/10.1134/S0040577920030034> [Original Russian Text: Badulin S.I., Zakharov V.E. Phillips spectrum and a model of wind wave dissipation. *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika.* 2020;202(3):353–363 (in Russ.). <https://doi.org/10.4213/tmf9801>]
13. Lukaschuk S., Nazarenko S., McLelland S., Denissenko P. Gravity wave turbulence in wave tanks: Space and time statistics. *Phys. Rev. Lett.* 2009;103(4):044501. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.044501>
14. Sterlyadkin V.V., Kulikovskii K.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V. Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2021;38(8):1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
15. Sterlyadkin V.V. *Scanning laser recorder recording “instant” shape of surface:* RU Pat. 2749727. Publ. 16.06.2021 (in Russ.).
16. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: Uchebnoe posobie.* V 10 t. T. VI. *Gidrodinamika (Theoretical Physics: Textbook.* In 10 v. V. VI. *Hydrodynamics.* Moscow: Nauka; 1986. 736 p. (in Russ.).

Об авторах

Стерлядкин Виктор Вячеславович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра физики Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sterlyadkin@mirea.ru. Scopus Author ID 6505940691, ResearcherID D-7125-2017, <https://orcid.org/0000-0002-1832-8608>

Куликовский Константин Владимирович, старший преподаватель, кафедра физики Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: constantinkk@mail.ru. Scopus Author ID 57223241696, <https://orcid.org/0000-0001-9296-6424>

About the authors

Viktor V. Sterlyadkin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sterlyadkin@mirea.ru. Scopus Author ID 6505940691, ResearcherID D-7125-2017, <https://orcid.org/0000-0002-1832-8608>

Konstantin V. Kulikovskiy, Senior Lecturer, Department of Physics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: constantinkk@mail.ru. Scopus Author ID 57223241696, <https://orcid.org/0000-0001-9296-6424>