

Комплексные экспериментальные исследования динамики развития ветровых волн на морской поверхности

А. В. Кузьмин^{1,2}, К. В. Куликовский², И. Н. Садовский^{1,2},
Д. С. Сазонов¹, В. В. Стерлядкин^{2,1}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

² *МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия*
E-mails: kuzmin@cosmos.ru, sterlyadkin@mail.ru

Представлено описание комплексного натурального эксперимента, который был проведён на стационарной гидрофизической платформе в Чёрном море близ пгт Качивели, Республика Крым, на базе Центра коллективного пользования «Морские исследования и технологии» Морского гидрофизического института РАН. В состав оборудования в экспериментах на гидрофизической платформе входил радиометрический комплекс, состоящий из двух радиометров-поляриметров 8-мм-диапазона. Радиометры были установлены на поворотную сканирующую платформу «Траверс-2». Для контроля параметров морского волнения в эксперименте использовались и работают по настоящее время лазерные волнографы. В лазерных измерениях применяется сканатор, который позволяет разворачивать лазерный луч по заданной траектории с частотой работы видеокамеры. При этом обновление изображения на видеокамере происходит на каждом кадре. Сканатор развёртки имел остановки в заданных точках траектории, что позволяло получить изображения границ лучей с более высоким отношением сигнал/шум и проводить измерения даже в дневное время суток. Также в измерениях используются три непрерывных лазера, которые формируют на морской поверхности три точки на заданном расстоянии, что позволяет измерять не только возвышения морской поверхности во времени в заданных точках, но и получать двумерное распределение уклонов, определять частотный спектр волнения. Экспериментальные исследования связи приводного ветра с динамикой развития ветровых волн на морской поверхности были основаны на синхронных измерениях ветрового поля с помощью двух акустических анемометров метеокомплексов МК-15, установленных на морской платформе на заданных высотных уровнях. За время эксперимента в летний период 2025 г. были получены уникальные измерения ветрового поля, морского волнения и поляризационных характеристик собственного излучения морской поверхности в различных метеорологических условиях. Полученные данные позволят провести исследование процессов взаимодействия поляризованного микроволнового излучения на границе морской поверхности и атмосферы с учётом взаимосвязи с ветром в приводном слое атмосферы и структурой морского волнения.

Ключевые слова: натуральный эксперимент, морская поверхность, собственное излучение, радиояркий контраст, ветровое волнение, лазерный волнограф, капиллярные волны, натурные измерения капиллярных волн, двумерное распределение уклонов

Одобрена к печати: 04.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-286-295

Введение

Комплексные экспериментальные исследования ветровой динамики волн на морской поверхности проходили в летний период 2025 г. на стационарной гидрофизической платформе в Чёрном море близ пгт Качивели, Республика Крым, на базе Центра коллективного пользования «Морские исследования и технологии» Морского гидрофизического института РАН. Основная задача экспериментов заключалась в исследовании влияния физических параметров системы «океан — атмосфера» на характеристики спектра ветровых волн в гравитационно-капиллярном интервале. Многочисленные экспериментальные и теоретические работы показывают, что именно короткие гравитационно-капиллярные волны (ГКВ) оказывают основное влияние на интенсивность процессов энерго- и массообмена в системе «океан — атмосфера» (Шарков, 2014). Изменение амплитуды спектральных компонент ГКВ — индикатор процессов атмосферного характера (например, приповерхностный ветер и т. д.),

внутриокеанического (например, внутренние волны, апвеллинги, океанические течения), поверхностного (например, наличие плёнок/загрязнений биологического и антропогенного происхождения) (Кутуза и др., 2016). Знание параметров ГКВ и влияния на них различных факторов в природных условиях имеет огромное значение для решения как фундаментальных задач, связанных с изучением процессов в системе «океан – атмосфера», так и широкого спектра прикладных задач, наиболее показательной из которых является достоверная интерпретация данных дистанционного зондирования Мирового океана из космоса микроволновыми приборами (Митник, Митник, 2011).

До настоящего времени не было предложено универсального волнографа, который позволял бы дистанционно с высокой точностью и частотой обновления получать «мгновенные» двумерные профили водной поверхности и при этом работать в широком диапазоне метеоусловий как ночью, так и днём. Проект такого волнографа и его экспериментальные возможности были продемонстрированы в работах В. В. Стерлядкина и его коллег (Стерлядкин, 2020; Стерлядкин, Куликовский, 2022; Стерлядкин и др., 2025). Отметим, что традиционно спектры волнения рассчитываются во временной области, с дальнейшим переходом к волновым числам на основе дисперсионного соотношения. Разработанная методика измерений позволяет получать именно пространственные спектры на основе двумерных геометрических профилей волновой поверхности, что было недоступно при традиционных методах измерений. В последнее время этой же группой были разработаны новые методы измерения уклонов по анализу изображения лазерных лучей, которые сверху вниз падают на морскую поверхность (Стерлядкин, 2024). Показано, что чувствительность нового метода такова, что позволяет регистрировать капиллярные волны амплитудой 30 мкм с расстояния 6–8 м.

В настоящей работе приведено описание комплексного эксперимента с использованием лазерного волнографа и сканирующего микроволнового радиометрического комплекса 8-мм-диапазона длин волн.

Используемое оборудование

Микроволновый радиометрический сканирующий комплекс

В волнографических экспериментах на стационарной гидрофизической платформе использовался радиометрический комплекс, состоящий из двух радиометров-поляриметров 8-мм-диапазона. Радиометры были установлены на поворотную сканирующую платформу «Траверс-2», подробное описание которой представлено в работе (Кузьмин и др., 2020). «Траверс-2» был установлен на юго-западном углу верхней палубы гидрофизической платформы на высоте 16 м над уровнем моря. Поворотное основание платформы фиксировалось на специально спроектированных и изготовленных направляющих рельсах таким образом, что обеспечивалась возможность выдвижения поворотной платформы в рабочее положение для минимизации влияния конструкций гидрофизической платформы на результаты измерений и перемещения её ближе к палубе, когда требовались установочные или ремонтные работы.

Оба радиометра представляют собой модуляционные приёмники прямого усиления с возможностью измерения поляризационных характеристик принимаемого излучения. Центральная частота принимаемого электромагнитного излучения равна 36,0 ГГц, полоса приёма 2 ГГц. Поворот плоскости принимаемого излучения осуществляется вращателем плоскости поляризации на эффекте Фарадея — гиратором. Модуляционные режимы работы каждого из радиометров, которые задаются с компьютера перед началом измерений, позволяют принимать от одной до четырёх поляризаций излучения, повернутых относительно входного волновода СВЧ-тракта на 0, –45, +45, 90°. Кроме радиометрических данных, оцифровываются данные трёх термодатчиков, расположенных на модуляторе, СВЧ-усилителе и корпусе радиометра. Флуктуационная чувствительность радиометров в режиме приёма четырёх поляризаций составляла $\Delta T = 0,1$ К при накоплении $\tau = 1$ с. Подробное описание радиометров приведено в работе (Анискович и др., 2016).

Лазерные волнографы

В эксперименте использовались и продолжают работать в настоящее время два лазерных волнографа с различными режимами измерений. Первый режим измерений использует сканатор, который позволяет разворачивать лазерный луч по заданной траектории с частотой работы видеокамеры. При этом обновление изображения происходит на каждом видеокадре (Sterlyadkin et al., 2021). Если на траектории развёртки луч имел остановки в заданных точках траектории, то удавалось получить изображения границ лучей с более высоким отношением сигнал/шум, *рис. 1а*.

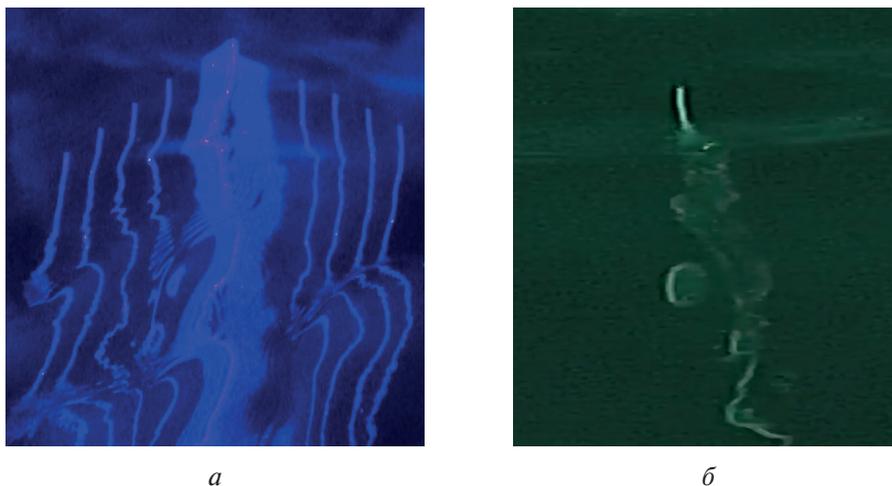


Рис. 1. Видеоизображения лазерных лучей, полученные с морской платформы. Развёртка с остановками в отдельных точках (*а*); дневные измерения в 15:53 мск (московское время) зарегистрировали уширение изображения луча за счёт капиллярных волн (*б*)

Второй режим измерений использует три непрерывных лазера, которые формируют на морской поверхности три точки на заданном расстоянии. Трёхточечный режим позволяет измерять не только возвышения морской поверхности, но также получать двумерное распределение уклонов, рассчитывать дисперсии, коэффициенты асимметрии и эксцесса вдоль и поперёк волнения, определять частотный спектр волнения. Режим односточечных измерений позволяет повысить отношение сигнал/шум и проводить измерения в дневное время, *рис. 1б*. Для этого используются интерференционный фильтр и поляризатор, который обеспечивает подавление бликов от ярких облаков или от светлого дневного неба. Режим одной точки позволяет почти «мгновенно» за время выдержки одного кадра (0,01 с) получать распределение капиллярных уклонов на основе метода лазерной «юбки», который кратко обсуждается ниже и более подробно описан в работе Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Лихачева М. В. «Натурные измерения параметров капиллярных волн на морской поверхности» (принята редакцией «Морского гидрофизического журнала» к печати в 2026 г.).

Метеорологические датчики

Для получения текущих данных о скорости и направлении ветра, температуры воздуха, атмосферном давлении использовались два метеокомплекса МК-15. Этот метеокомплекс отличается тем, что параметры ветра определяются акустическими датчиками, таким образом определяется как горизонтальная составляющая ветрового потока, так и вертикальная. Один метеокомплекс МК-15 установлен на выносе, расположенном на южной стороне гидрофизической платформы на высоте 4 м. Второй метеокомплекс МК-15 размещён на мачте в самой верхней точке на высоте 21,5 м над уровнем моря. Данные температуры контролировались

с помощью блока термодатчиков, который был установлен вблизи поворотной платформы «Траверс-2». Платиновые датчики по четырёхпроводной схеме контролировали температуру воздуха у платформы, температуру излучателей «холодной» и «горячей» нагрузки, температуру воды на глубине 1 м. Температура воды записывалась также на погружной изолированный датчик, в котором данные заносились на SD-карту. Данные с этого датчика были доступны только после окончания экспериментальных работ.

Радиометрические измерения

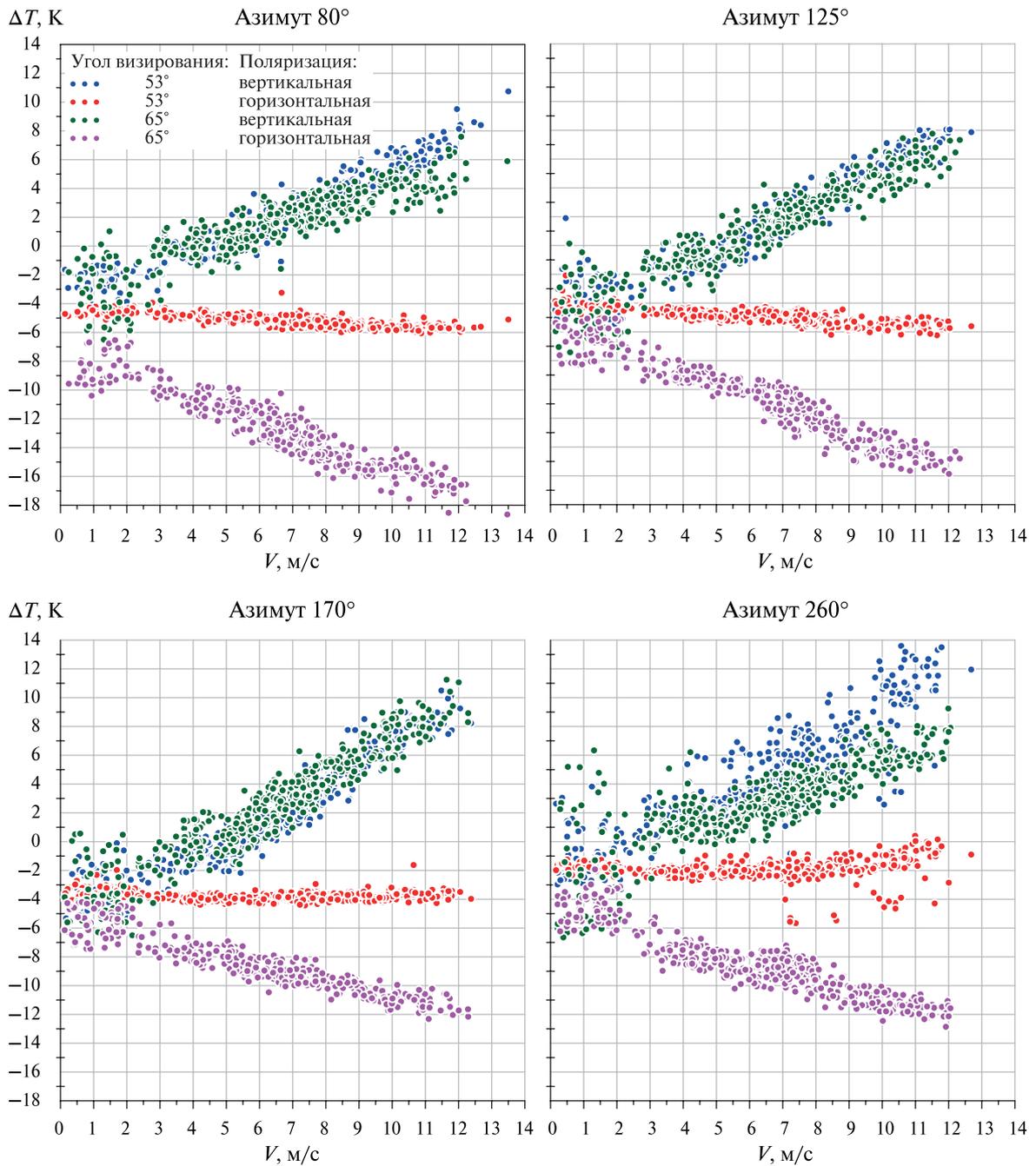


Рис. 2. Зависимость радиояркостных контрастов ΔT от скорости ветра V за период с 08:41, 21 июля по 23:58, 23 июля 2025 г. на углах визирования 53 и 65° для вертикальной и горизонтальной поляризации. Направление ветра соответствовало постоянному юго-западному направлению, для четырёх галсов на азимутах 60, 125, 170 и 260°. Каждая точка на графиках составляет 20-мин накопление

Радиометрические измерения проводились круглосуточно, на протяжении всего эксперимента с 4 июля по 4 августа. В предыдущих радиометрических экспериментах на гидрофизической платформе, которые описаны в работах (Садовский и др., 2016; Сазонов и др., 2016, 2018, 2024; Стерлядкин и др., 2018), использовалась схема сканирования, состоящая из непрерывного изменения угла места от 20° от надира до зенита и обратно на шести азимутах, охватывающих в сумме угол 180° морской поверхности от восточного направления до западного. При такой схеме измерений трудно выделить гравитационно-капиллярную составляющую волнения в яркостной температуре из-за модуляции излучения уклонами крупных волн.

Для того чтобы устранить эту причину, было принято решение изменить схему сканирования. Теперь схема сканирования по углу места состояла из трёх фиксированных углов: 40° , 55° и 65° , на которых визирование радиометров останавливалось на 20 с для усреднения крупномасштабного волнения. По азимуту были выбраны четыре направления: восточное, как преобладающее направление розы ветров, 45° и 90° от него в направлении моря и противоположное восточному направлению. После измерений радиояркостности на морской поверхности проводилось изменение угла визирования до зенита на каждом азимуте. Измерение яркостной температуры в верхней полусфере позволяло получать дополнительную точку на калибровочной кривой. На весь цикл измерений уходило примерно 6 мин, что позволяло отследить динамику ветра. Через каждые три цикла осуществлялась калибровка радиометров по чёрному телу и сканированию атмосферы. На *рис. 2* (см. с. 289) для примера показаны контрасты радиояркостности ΔT от скорости ветра V за период с 08:41, 21 июля по 23:58, 23 июля 2025 г., когда направление ветра соответствовало постоянному юго-западному направлению, для четырёх галсов на азимутах 60° , 125° , 170° и 260° . Каждая точка на графиках составляет 20-мин накопление.

Оптические измерения

Лазерный волнограф большую часть времени эксперимента функционировал в режиме трёхточечных измерений, позволяющих с частотой 90 Гц определять возвышения морской поверхности в каждой из них. Лазерные лучи падали на поверхность вертикально в вершинах прямоугольного равнобедренного треугольника с катетами 8 см. Это дало возможность вычислять мгновенные значения двумерных уклонов морской поверхности, параметры двумерного распределения уклонов, тем самым оценивать свойства волновых компонент длиннее 16 см. Данная величина была определена исходя из рабочей длины волны радиометрических приёмников $\lambda = 8$ мм и являлась верхней границей $\Lambda_{\text{гр}}$ длинноволнового диапазона волнения.

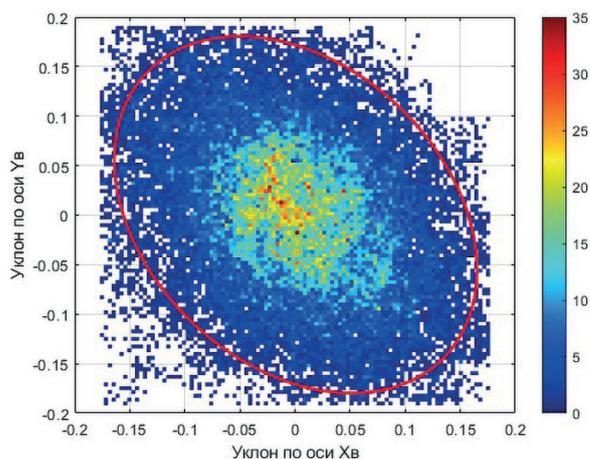


Рис. 3. Пример экспериментально измеренного двумерного распределения уклонов крупных волн в координатных осях волнографа для одной серии измерений. Цветовая шкала дана для скорости ветра (в м/с)

Измерения выполнялись непрерывными сериями, каждая из которых составляла 9 мин, 3 серии в час. Пример двумерного распределения уклонов на данном треугольнике представлен на *рис. 3* (см. с. 290).

Получаемое распределение уклонов крупных волн позволяло определять следующие параметры волнения: направление главной оси φ_W эллипса распределения относительно направления на север; дисперсию уклонов ветровых волн σ^2 и σ_Y^2 для двух ортогональных катетов треугольника; дисперсию уклонов ветровых волн σ_U^2 и σ_C^2 по волнению и поперёк него, переопределённых с учётом угла φ_W ; коэффициенты асимметрии распределения уклонов для этих направлений K_U^S и K_C^S ; коэффициенты эксцесса K_U^E и K_C^E двумерного распределения уклонов ветровых волн.

Дополнительно для измерений распределения капиллярных уклонов применялся принципиально новый метод, который был назван методом лазерных юбок. Причина такого названия заключается в том, что при сильном капиллярном волнении изображение лазерного луча превращается в световой конус, который начинается от точки падения луча на поверхность, *рис. 4*.

Чем больше время накопления кадров, тем более длинные волны принимают участие в создании дисперсии лазерной юбки. Условно можно считать, что все волны, период которых $T < \tau$, успеют изменить фазу уклонов на 2π и принять участие в формировании дисперсии лазерной юбки. На *рис. 4в* представлено изображение лазерного луча при накоплении 1000 кадров, что вдвое превышает период самых длинных волн. Следовательно, это изображение формируется за счёт всех возможных уклонов морской поверхности.

В работе (Стерлядкин, 2024) показано, что смещение y светящейся точки по оси Y , перпендикулярной оси видеокамеры, почти линейно зависит от уклона ξ_y волновой поверхности по этой оси и слабо зависит от уклона по оси X , которая направлена к видеокамере. Поэтому по распределению освещённости $I(x_0, y)$ в сечении лазерной юбки, можно рассчитать плотность вероятности $P(\xi_y)$ распределения уклонов ξ_y вдоль оси Y . На *рис. 4а* представлен один видеокادر, на котором изображение лазерного луча имеет вид лазерной юбки. Измерения выполнены 4 октября 2025 г. в 00:00:11 мск на морской гидрофизической платформе. Скорость ветра была равна 12 м/с. На этом видеокadre, выдержка которого составляла $\tau = 1/100$ с, капиллярные волны с частотой $\nu > 16$ Гц успевали изменить свою фазу (и уклоны) в пределах $2\pi\nu\tau > 1$ рад. Поэтому не во всех точках поверхности возникали условия свечения и лазерная юбка получилась неоднородной, «дырявой». На *рис. 5* (см. с. 292) представлены результаты расчёта плотности вероятности $P(\xi_y)$ распределения уклонов ξ_y для трёх изображений, представленных на *рис. 4*.

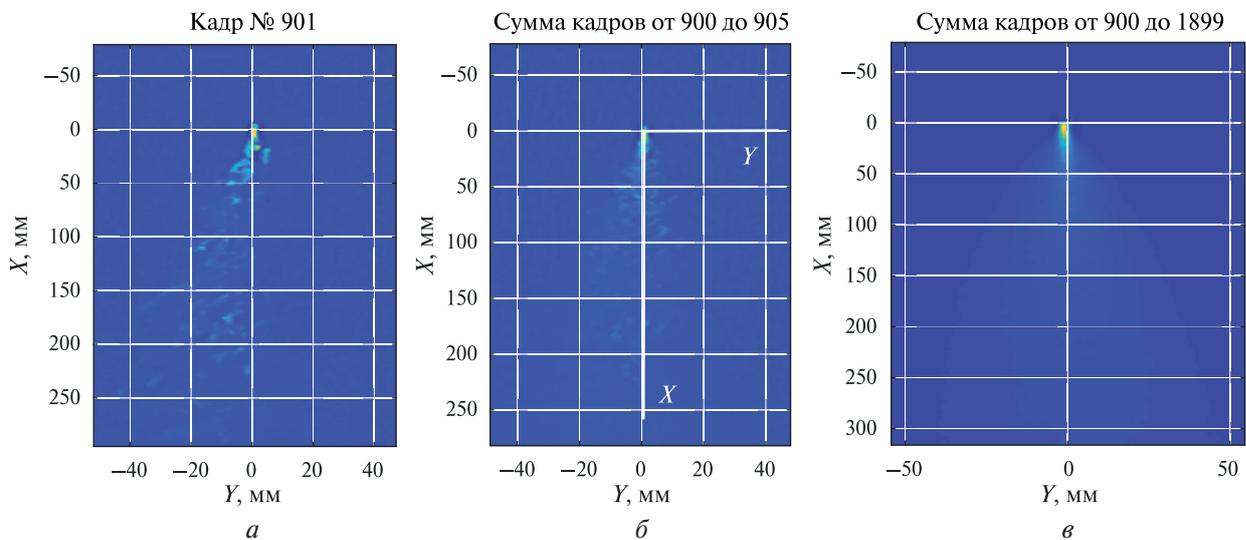


Рис. 4. Один видеокادر с выдержкой 1/100 с (*а*); сумма 6 видеокадров с привязкой к началу координат, совпадающему с точкой падения луча на морскую поверхность (*б*); сумма 1000 кадров (*в*)

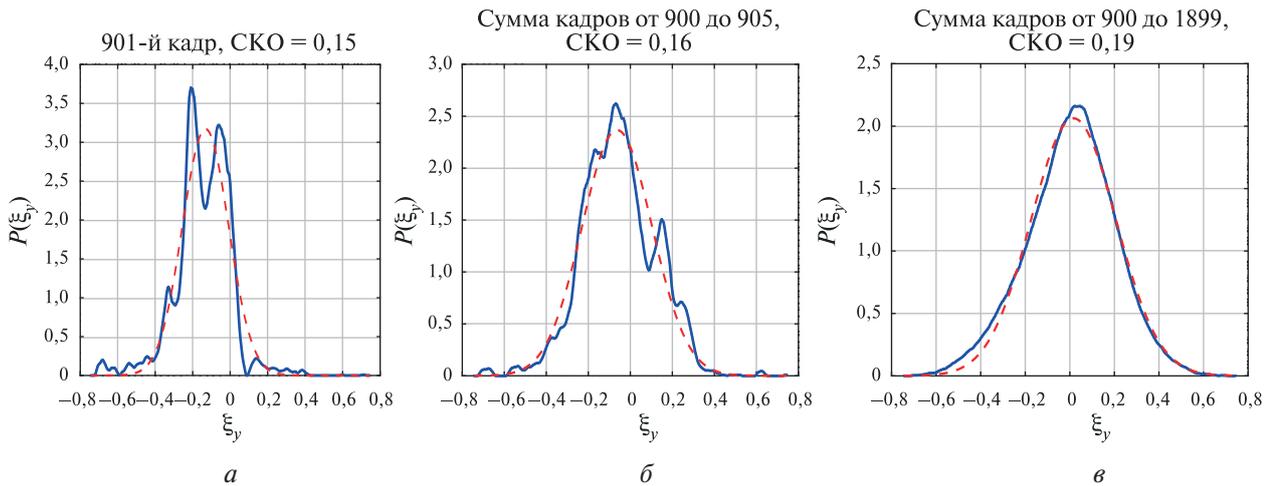


Рис. 5. Плотность распределения уклонов для изображений, представленных на предыдущем рисунке: *a* — для одного 901-го видеокadra, среднеквадратичное отклонение (СКО) равно 0,15; *б* — для суммы 6 кадров, СКО = 0,16; *в* — для суммы 1000 кадров, СКО = 0,19. Синяя непрерывная кривая — экспериментальные данные, красный пунктир — аппроксимация Гаусса

Для проверки предложенного метода мы сравнили полученную дисперсию полного распределения уклонов $\sigma^2 = 0,036 \pm 0,004$ со значением $\sigma_u^2 = 0,038 \pm 0,004$, установленным по формуле Кокса – Манка (Cox, Munk, 1954) для скорости ветра 12 м/с. Соответствие оказалось в пределах погрешности измерений.

Заключение

В натуральных экспериментах, проведённых на стационарной гидрофизической платформе Центра коллективного пользования «Морские исследования и технологии» Морского гидрофизического института РАН, были получены синхронные данные о ветровом поле, параметрах морского волнения и поляризационных характеристиках собственного излучения морской поверхности в различных метеорологических условиях. Целью исследований было изучение физических процессов формирования собственного излучения морской поверхности с учётом её тонкой структуры, включая капиллярные волны. С помощью трёхточечных лазерных измерений удалось получить двумерное распределение уклонов на масштабах 8×8 см, которое формирует длинноволновую фракцию микроволнового излучения морской поверхности. Начат анализ связи между статистическими моментами распределения уклонов (дисперсией, коэффициентами асимметрии и эксцесса) с возникающим микроволновым излучением. Начались прямые измерения и капиллярных уклонов, основанные на новом методе анализа изображений лазерного луча, падающего сверху вниз на морскую поверхность. Данный метод, который был назван методом лазерных юбок, позволяет измерять распределение капиллярных уклонов за время порядка 0,07 с. При этом показана возможность работы в широком диапазоне метеорологических условий как в ночное, так и в дневное время.

Одной из задач проекта является уточнение и модернизация модели формирования и переноса излучения в системе «океан – атмосфера». Уточнение планируется как в рамках физического подхода, в котором уточняются физические модели, связывающие геометрическую форму и структуру поверхности с формируемыми радиотепловыми сигналами, так и в рамках корреляционного подхода, базирующегося на установлении эмпирических связей между указанными величинами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00189, <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>).

Литература

1. *Анискович В. М., Кузьмин А. В., Сазонов Д. С., Хайкин В. Б.* Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натуральных и лабораторных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213–223. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. *Кузьмин А. В., Садовский И. Н., Горшков А. А., Ермаков Д. М.* Приборная платформа для надводных измерений морской поверхности и атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 83–91. DOI: 10.31857/S0205961420010054.
3. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
4. *Митник Л. М., Митник М. Л.* Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
5. *Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Поспелов М. Н. и др.* Экспериментальные исследования коротковолновой части спектра ветровых волн: Предварительный анализ результатов дистанционных радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 55–67. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-55-67.
6. *Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Садовский И. Н.* Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 25–34. DOI: 10.7868/S0205961416010127.
7. *Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Садовский И. Н.* Азимутальная зависимость микроволнового излучения водной поверхности на основе дистанционных измерений на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 29–40. DOI: 10.7868/S0205961418030028.
8. *Сазонов Д. С., Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В.* Натурные исследования угловых зависимостей третьего параметра Стокса излучения морской поверхности на частоте 37 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 309–319. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319.
9. *Стерлядкин В. В.* Сканирующий лазерный волнограф с регистрацией «мгновенной» формы поверхности. Патент РФ 2749727. Рег. 16.10.2020.
10. *Стерлядкин В. В.* Задача восстановления профиля морской поверхности по видеоизображению лазерных лучей // Океанология. 2024. Т. 64. № 3. С. 396–407. DOI: 10.31857/S0030157424030022.
11. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В.* Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // Российский технолог. журн. 2022. Т. 10. № 5. С. 100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
12. *Стерлядкин В. В., Сазонов Д. С., Кузьмин А. В., Шарков Е. А.* Наземные радиометрические измерения эффективной излучательной способности морской поверхности без абсолютной калибровки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 29–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41.
13. *Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Заdernовский А. А.* Измерение капиллярных колебаний морской поверхности // Океанология. 2025. Т. 65. № 2. С. 201–211. DOI: 10.31857/S0030157425020018.
14. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
15. *Cox C., Munk W.* Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // J. Optical Soc. America. 1954. V. 44. No. 11. P. 838–850.
16. *Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Kuzmin A. V. et al.* Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2021. V. 38. No. 8. P. 1415–1424. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>.

Comprehensive experimental studies of the dynamics of wind wave development at the sea surface

A. V. Kuzmin^{1,2}, K. V. Kulikovskiy², I. N. Sadovskiy^{1,2}, D. S. Sazonov¹,
V. V. Sterlyadkin^{2,1}

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

² MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
E-mails: kuzmin@cosmos.ru, sterlyadkin@mail.ru

The paper describes a comprehensive field experiment conducted from a stationary hydrophysical platform in the Black Sea near the town of Katsiveli, Republic of Crimea, at the Marine Research and Technology Shared Use Center of Marine Hydrophysical Institute RAS. The equipment used in the experiment included a radiometric system consisting of two 8-mm-band radiometer-polarimeters. The radiometers were mounted on a Traverse-2 rotating scanning platform. Laser wave recorders were used in the experiment and are still in operation, monitoring sea wave parameters. Laser measurements utilize a scanner that allows the laser beam to be swept along a specified trajectory at the same frequency as a video camera. The image in the video camera is updated at each frame. The scanner stops at specified points along the trajectory allowing for images of the beam boundaries to be obtained with a higher signal-to-noise ratio and measurements to be conducted even in daylight. The measurements also utilize three continuous lasers, which form three points on the sea surface at a specified distance. This allows for measuring not only sea surface elevation over time at specified points but also obtaining a two-dimensional slope distribution and determining the wave frequency spectrum. Experimental studies of the relationship between surface wind and the dynamics of wind wave development on the sea surface were based on synchronous wind field measurements using two sonic anemometers of the MK-15 meteorological complexes, installed on an offshore platform at specified elevation levels. During the experiment in the summer of 2025, unique measurements of wind field, sea waves, and polarization characteristics of sea surface emission were obtained under various meteorological conditions. The data obtained will enable research into the interaction of polarized microwave radiation at the sea surface–atmosphere interface, considering the relationship between wind in the atmospheric surface layer and sea wave structure.

Keywords: natural experiment, sea surface, emission, brightness contrast, wind waves, laser wave recorder, capillary waves, *in situ* measurements of capillary waves, two-dimensional distribution of slopes

The work was carried out with financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00189, <https://rscf.ru/project/23-17-00189/>).

Accepted: 04.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-286-295

References

1. Aniskovich V. M., Kuzmin A. V., Sazonov D. S., Khaikin V. B., Radiometer-polarimeter at 0.8 cm for field and laboratory measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 2, pp. 213–223 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. Kuzmin A. V., Sadovskiy I. N., Gorshkov A. A., Ermakov D. M., Instrumental platform for overhead measurements of the sea surface and atmosphere, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 1, pp. 83–91 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420010054.
3. Kutuzova B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2016, 336 p. (in Russian).
4. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Algorithm for reconstructing the surface wind speed based on measurements of the AMSR-E microwave radiometer from the Aqua satellite, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 34–44 (in Russian).
5. Sadovskiy I. N., Kuzmin A. V., Pospelov M. N. et al., Experimental studies of the short-wave part of wind-waves spectrum: Preliminary analysis of radiometric remote measurements, *Sovremennye prob-*

- lemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 5, pp. 55–67 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-55-67.
6. Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovsky I. N., Experimental studies of the dependence of the intensity of radiothermal radiation of a rough sea surface on the speed of the surface wind, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 25–34 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961416010127.
 7. Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovsky I. N., Azimuthal dependence of microwave radiation of the water surface based on remote measurements in the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 29–40 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030028.
 8. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Kuzmin A. V., Pashinov E. V., Field studies of the third Stokes parameter angular dependences of sea surface radiation at a frequency of 37 GHz, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 309–319 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319.
 9. Sterlyadkin V. V., *Skanirovushchii lazernyi volnograf s registratsiei “mgnovennoi” formy poverkhnosti* (Scanning laser wave recorder with registration of the “instantaneous” surface shape), Patent RU 2749727, Reg. 16.10.2020 (in Russian).
 10. Sterlyadkin V. V., The problem of reconstructing the sea surface profile from a video image of laser beams, *Okeanologiya*, 2024, V. 64, No. 3, pp. 396–407 (in Russian), DOI: 10.31857/S0030157424030022.
 11. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Measuring capillary waves with a laser wave recorder, *Russian Technological J.*, 2022, V. 10, No. 5, pp. 100–110 (in Russian), DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110.
 12. Sterlyadkin V. V., Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sharkov E. A., Ground radiometric measurements of the sea surface effective emissivity without absolute calibration, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 29–41 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-29-41.
 13. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Zadernovskiy A. A., Measurement of capillary oscillations of the sea surface, *Okeanologiya*, 2025, V. 65, No. 2, pp. 201–211 (in Russian), DOI: 10.31857/S0030157425020018.
 14. Sharkov E. A., *Passive microwave remote sensing of the Earth: Physical foundations*, Berlin: Springer/PRAXIS, 2003, 613 p.
 15. Cox C., Munk W., Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter, *J. Optical Soc. America*, 1954, V. 44, No. 11, pp. 838–850.
 16. Sterlyadkin V. V., Kulikovskiy K. V., Kuzmin A. V. et al., Scanning laser wave recorder with registration of “instantaneous” sea surface profiles, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2021, V. 38, No. 8, pp. 1415–1424, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>.