

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 53.083

**СТРУННЫЙ ВОЛНОГРАФ С ИНФРАКРАСНОЙ
РЕГИСТРАЦИЕЙ ДЛИНЫ СТРУН**

© 2021 г. **В. В. Стерлядкин^{a,*}, К. В. Куликовский^a, А. В. Кузьмин^b,
Е. А. Шарков^b, М. В. Лихачева^a**

^a МИРЭА – Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

^b Институт космических исследований (ИКИ) РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

*e-mail: sterlyadkin@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принята к публикации 12.02.2021 г.

Рассмотрен новый способ регистрации параметров морского волнения, основанный на видеорегистрации длины вертикально расположенных струн. Оказалось, что хлопковые струны, освещенные инфракрасным прожектором, ярко светятся в надводной части, формируя четкий край на границе раздела. Измерения возможно проводить в любое время суток при расстояниях между струн от единиц миллиметров до десятков сантиметров. Приводятся результаты натуральных измерений, проведенных на морской платформе. Представлены примеры расчетов спектров возвышений, распределения одномерных и двумерных уклонов, оценки анизотропии. Обоснована точность измерений, перспективы развития и ограничения предложенного метода.

DOI: 10.31857/S003281622104011X

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерению ветровых волн, исследованию их структуры и характеристик посвящены сотни работ. Характеристики волнения необходимы широкому кругу потребителей, при этом с каждым годом повышаются требования к точности, оперативности и детализации измерений. В отделе “Исследование Земли из космоса” ИКИ РАН проводятся экспериментальные и теоретические исследования связи параметров приводного ветра со структурой волнения и рассеянием радиоволн на взволнованной водной поверхности. Решение этой непростой задачи необходимо для отработки методов восстановления метеопараметров и характеристик волнения по данным пассивного микроволнового зондирования с борта космических аппаратов. Вопросы, связанные с измерением параметров приводного ветра и измерением собственного излучения морской поверхности в микроволновом диапазоне, в целом удается решать на базе стандартных метеокомплексов и имеющих радиометров. Однако задача мониторинга и регистрации параметров морского волнения до последнего времени оставалась нерешенной. Общей проблемой известных способов измерения волнения является трудность регистрации параметров волн на масштабах менее 10 см. Но имен-

но этот диапазон масштабов волнения оказывает определяющее влияние на рассеяние микроволн в диапазоне длин волн $10 \text{ см} < \lambda < 3 \text{ мм}$. Поэтому в экспериментальном плане настоятельно требовалось измерение аппликата морской поверхности и уклонов в точках, расположенных на расстоянии $< 10 \text{ см}$.

Традиционно для измерения параметров волнения используются струнные волнографы, в которых измеряется изменение сопротивления струн при изменении уровня погружения струн в воду [1, 2]. Недостатками таких волнографов являются неконтролируемое изменение сопротивления при охлаждении струны ветровыми пульсациями, нарастание водорослей, смачивание, взаимное электрическое влияние соседних струн друг на друга. Последнее свойство приводит к трудности измерений при расположении струн на расстояниях $< 10 \text{ см}$. Широко известны методы измерения волнения с высоты самолета по угловому положению бликов солнца, отраженных от поверхности, или по угловому распределению бликов от искусственных источников света. В настоящее время наблюдается активное использование малых летательных аппаратов для получения фотоизображений бликов на морской поверхности с высоты в несколько сотен метров. Но

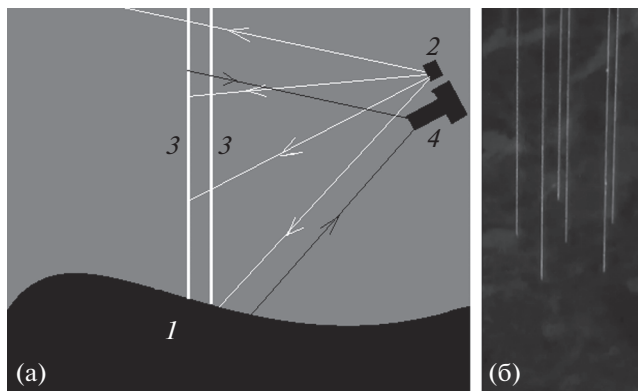


Рис. 1. а – схема измерений (поверхность раздела 1 освещается и.к.-прожектором 2, длина светящихся струн 3 регистрируется видеокамерой 4); б – изображение шести струн на видеокадре.

этот метод не является всепогодным и сложен в реализации [3–5].

В последние годы разработаны оптические методы регистрации уклонов поверхности, основанные на регистрации отраженного лазерного луча [6]. Недостатком этих методов является уход блика из апертуры приемной системы даже при небольших уклонах, что не позволяет измерять уклоны даже при умеренном волнении. Интересное техническое решение связано с фото- или видеоизмерением положения точек, сформированных лазерным лучом при его падении на поверхность раздела. При этом лазерный луч может либо излучать в отдельную точку, либо разворачиваться в ножевой оптический луч [7]. Однако при развертке лазерного луча его интенсивность становится недостаточной для надежной регистрации границы раздела. Хороший обзор известных контактных и дистанционных методов измерения ветрового волнения приведен в работах [8–11].

В данной работе описан новый метод измерения параметров волнения на основе видеорегистрации длины вертикально расположенных струн, расстояние между которыми может снижаться до 10 мм. Струны изготавливаются из хлопковых нитей, которые ярко светятся при их освещении инфракрасным излучением и формируют четкий край на границе раздела.

2. ГЕОМЕТРИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1а представлена схема измерений. Взмолнованная поверхность раздела 1 освещалась инфракрасным (и.к.) прожектором 2 на длине волны 940 нм. Струны 3 были изготовлены из прочных хлопковых нитей и имели независимое натяжение за счет грузов, опущенных на значительную глубину для снижения влияния волне-

ния. Надводная часть струн была ярко освещена за счет прямого освещения и.к.-прожектором, а также за счет отражения части излучения прожектора от поверхности. При этом излучение, рассеянное надводной частью струн, напрямую попадало в видеокамеру 4. Подводная часть струн освещалась только преломленной частью излучения прожектора, которое к тому же дважды испытывало сильное поглощение в воде. По этим причинам границы раздела всех струн четко регистрировались на видеокамере 4, что видно на видеокадре рис. 1б.

На рис. 2а показано расположение нитей волнографа, и.к.-прожектора и видеокамеры при натурных измерениях, проведенных на морской гидрофизической платформе Морского гидрофизического института РАН вблизи п. Кацивели в сентябре 2019. На рис. 2б представлена геометрия расположения струн и направление наблюдений. Следует отметить, что в процессе измерений ориентация струн, имеющих независимое натяжение, оказалась очень стабильна даже при значительном волнении. В эксперименте пять струн располагались в виде звезды, а шестая струна находилась в центре. Расстояние от центральной струны до остальных струн составляло 80 мм. Это позволило определять уклоны в 15 различных направлениях, рассчитывать двумерное распределение уклонов и другие характеристики волнения.

Измерения проводились круглосуточно, как в ночное, так и в дневное время. На рис. 3 в верхнем ряду представлена серия видеокадров при ночных измерениях, а внизу – видеокадры дневных записей. При измерениях на видеокамере использовался интерференционный светофильтр, согласованный с полосой частот инфракрасного прожектора. Для снижения яркости бликов неба в дневное время видеорегистрация нитей проводилась вблизи угла Брюстера с использованием поляризатора.

Анализ видеоизображений позволяет сделать вывод о наличии четкой границы на каждой из нитей, которая может автоматически определяться соответствующим программным обеспечением. Следует заметить, что дневные измерения проводились на фоне бликов от дневного неба. Однако отношение сигнал/шум и при дневных измерениях вполне достаточно для определения границ каждой нити на всех кадрах. На рис. 4 представлена зависимость интенсивности засветки нитей от номера пикселя на видеокадре (высоты над уровнем моря) в ночных и дневных условиях. Переход от светящихся частей нитей к темной их части весьма резок, что в увеличенном масштабе показано на рисунках справа. Если за границу нитей принять половинную интенсивность ступени, то протяженность границы занимает 1–2 пикселя (1.5–3.0 мм). Это и есть точ-

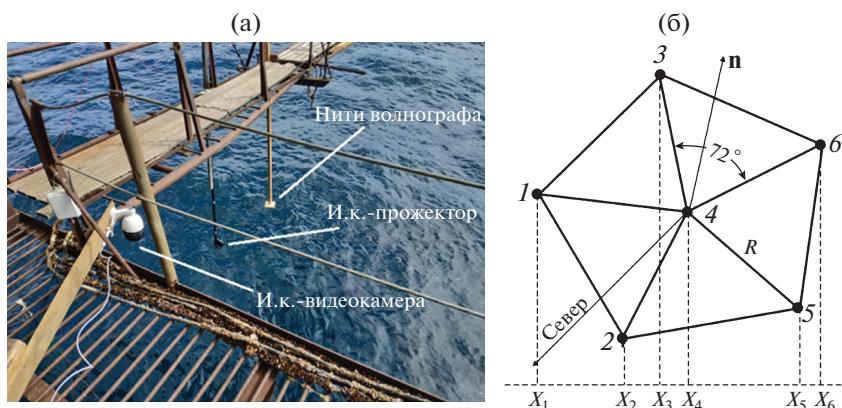


Рис. 2. а – расположение приборов на морской платформе при проведении суточных измерений 19.09.2019–20.09.2019 г.; б – ориентация 6 струн волнографа по отношению к видеокамере, расстояние от нити 3 до остальных нитей составляло 80 мм.

ность измерения высоты в реализованном макете волнографа.

Следует отметить и ограничения предложенного метода. Так, не представляется возможным проводить измерения при условии, что солнце находится напротив видеокамеры или вблизи этого направления. Яркость бликов оказывается сравнимой или выше яркости нитей. Однако выбором ориентации видеокамеры это ограничение может быть снято. Очевидно, что появление пены или плавающих предметов на морской поверхности вблизи нитей не позволит проводить корректные измерения. Трудностью программной обработки является горизонтальное периодическое перемещение нитей при сильном волнении. Решение этой проблемы заключалось в усложнении программы обработки и слежении за положением каждой нити на каждом кадре.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для регистрации границ каждой нити потребовалось создание специальной программы, которая, во-первых, следила за горизонтальным смещением нитей под влиянием течения и волн, во-вторых, аппроксимировала положение каждой нити в кадре уравнением прямой, а, в-третьих, суммировала интенсивность засветки вдоль каждой нити. Типичные зависимости интенсивности засветки вдоль нитей от номера пикселя на видеокдрах приведены на рис. 4. За положение границы раздела принимался уровень половины скачка интенсивности засветки вдоль каждой нити. В результате такой обработки получался массив аппликат всех шести нитей в виде номеров пикселей границ нитей на каждом кадре (рис. 5).

Следующим шагом была калибровка видеок кадров и перевод пикселей в высоту над уровнем

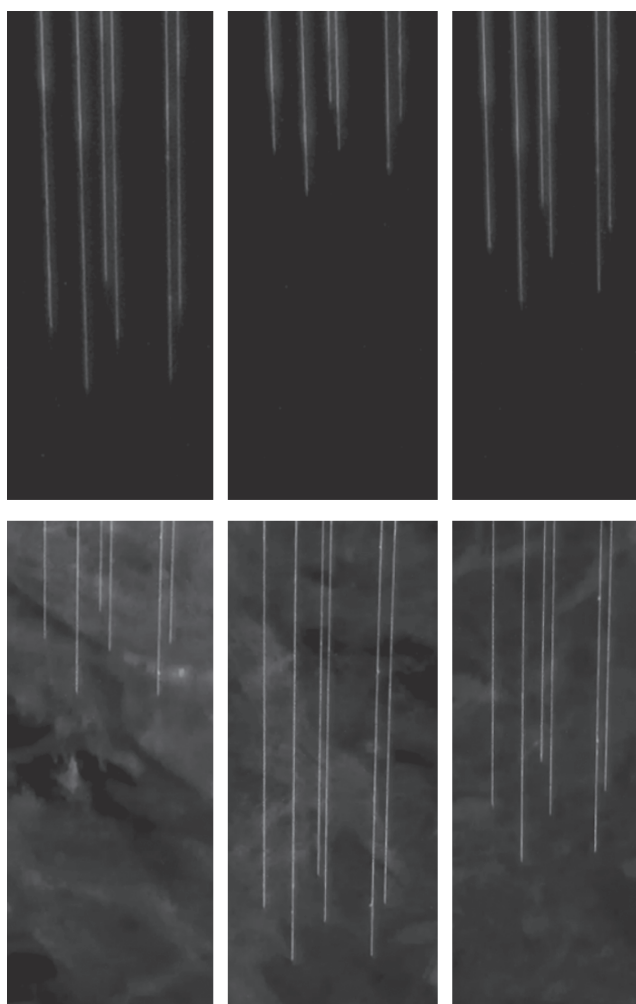


Рис. 3. Вверху – видеоизображения нитей волнографа, полученные на морской платформе 19.09.2019 в 04.16 мск, внизу – три кадра видеоряда, полученные и.к.-волнографом 19.09.2019 в дневное время 14:47 мск. Блики неба слабы по сравнению с сигналами от нитей.

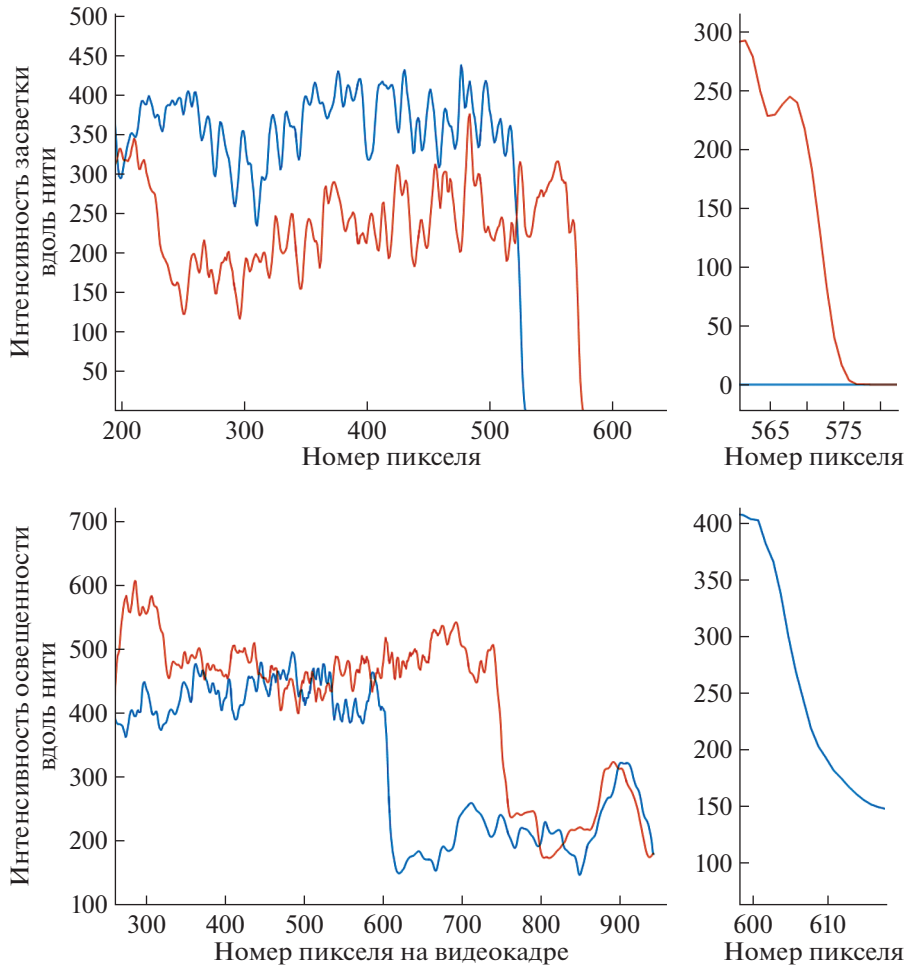


Рис. 4. Слева — зависимость интенсивности засветки вдоль двух соседних нитей от номера пикселя (высоты) для ночного (сверху) и дневного (снизу) видеокadra. Граница перехода имеет протяженность 1–2 пикселя. Справа — фрагменты графиков в увеличенном масштабе.

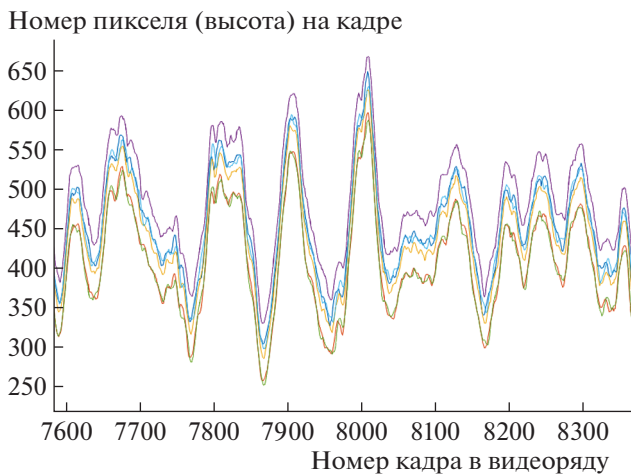


Рис. 5. Небольшой участок записи высот всех 6 нитей в видеоряду. Частота кадров 25 Гц. Точность определения высот 1 пиксель или 1.5 мм.

невозмущенной морской поверхности. Это было сделано на основе калибровочных меток на одной из нитей, которые располагались на расстоянии 20 см друг от друга. В результате были получены зависимости аппликат для 6 струн с частотой кадров 25 Гц. Длительность одного файла измерений обычно составляла 600–1000 с, что давало последовательность из 15000–25000 кадров. Последующая обработка данных может проводиться традиционными методами. На рис. 6 представлен спектр возвышений, усредненный по 20480 кадрам с разбиением на реализации по 2048 точек. По форме спектра видно, что даже на высоких частотах отношение сигнал/шум таково, что позволяет оценивать наклон бимогарифмического спектра. В частности, на частотах выше 40 рад/с наблюдается появление капиллярной составляющей волнения, которая отмечается изменением наклона кривой. Очевидно, что для регистрации капиллярной составляющей необходимо увеличить частоту видеосъемки, например, до 100 Гц.

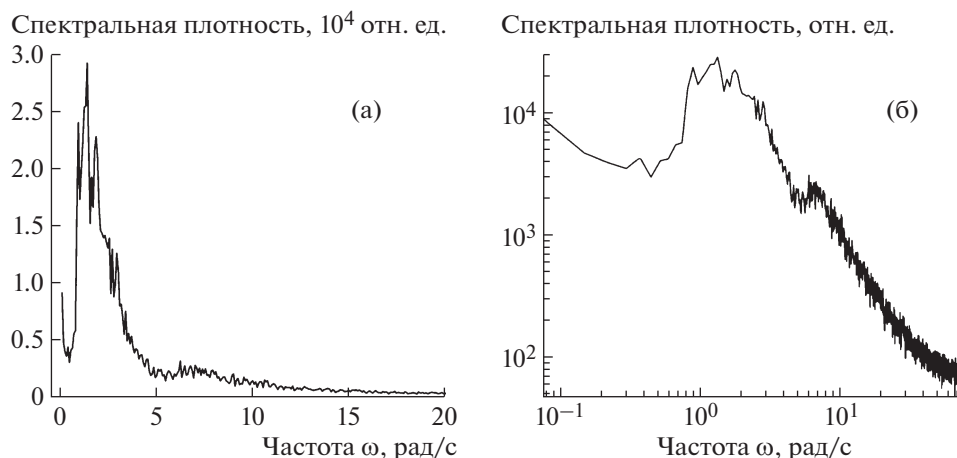


Рис. 6. Частотный спектр возвышений в относительных единицах в линейном (а) и билогарифмическом (б) масштабах.

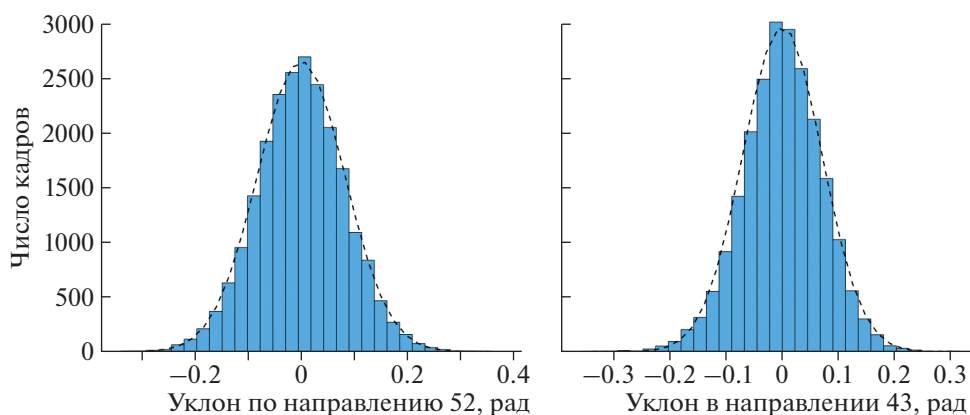


Рис. 7. Распределение уклонов для направления 52 и в ортогональном направлении 43. Огибающая – аппроксимация распределений гауссовой зависимостью $\sigma_{52} = 0.083$, $\sigma_{43} = 0.076$.

Для любого из 15 возможных направлений может быть определено одномерное распределение уклонов (рис. 7). Аналогично, для любых трех точек поверхности нетрудно получить двумерное распределение уклонов (рис. 8). На основе полученных распределений легко определяются направление волн, анизотропия и другие параметры волнения.

Целью данной работы была отработка метода измерения параметров волнения с точностью определения аппликат на уровне 1–2 мм и высокой частотой оцифровки данных. Поставленная цель была достигнута. Геометрическое расположение нитей-струн может зависеть от поставленной задачи. Принципиально не представляет трудности расположение струн на расстояниях от 8 мм до десятков сантиметров. Дальнейшая автоматизация измерений позволит проводить комплексные исследования влияния волнения на рассеяние микроволнового излучения взволно-

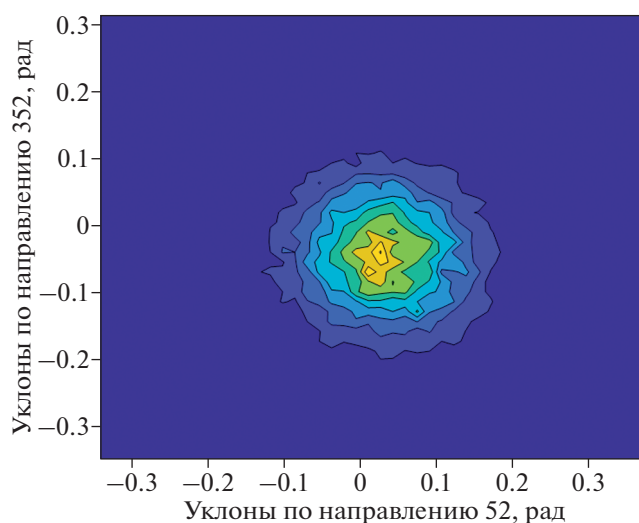


Рис. 8. Изолинии двумерного распределения уклонов.

ванной морской поверхностью, получать связь радиометрического портрета морской поверхности со скоростью и направлением ветра, с другими метеорологическими параметрами системы океан–атмосфера.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан новый способ определения аппликат взволнованной морской поверхности (волнограф), основанный на освещении вертикально расположенных хлопковых струн в инфракрасном диапазоне длин волн и регистрации границы раздела с помощью видеокамеры. Способ запатентован [12]. В процессе проведения натуральных измерений показано наличие четкой границы раздела вдоль освещенных струн, которая надежно регистрируется как в ночное, так и в дневное время. Представлена геометрия измерений с морской платформы Морского гидрофизического института в поселке Кацивели, Крым. Точность измерения высоты поверхности (аппликаты) была равна размеру одного пикселя цифровой видеокамеры (1.5 мм) и может быть повышена при увеличении размеров матрицы и использовании трансфокатора с большим увеличением. Частота измерений определялась частотой кадров и составляла 25 Гц. При увеличении частоты видеосъемки возможна регистрация капиллярной составляющей волнения. Приведены результаты измерений, выполненных 19–20 сентября 2019 г. Предложенный метод может быть адаптирован для измерения уклонов на пространственном масштабе от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов В.В., Садовский И.Н. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. № 1. С. 254.
2. Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурьин А.Б., Юровский Ю.Ю. // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 7. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
3. Cox S., Munk W. // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44. № 11. P. 838.
4. Юровская М.В., Кудрявцев В.Н., Широков А.С., Надоль И.Ю. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 245. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257>
5. Gatebe C.K., King M.D., Lyapustin A.I., Arnold G.T., Redemann J. // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. Issue 4. P. 1072. <https://doi.org/10.1175/JAS33861>
6. Заневалов А.С. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2008. 290 с.
7. Караев В.Ю., Мешков Е.М. Патент на изобретение RU 2448324 C2 // Оpubл. 20.04.2012. Бюл. № 11.
8. Филлис О.М. Динамика верхнего слоя океана М.: Мир, 1980.
9. Лебедев Н.Е., Алескерова А.А., Плотников Е.М. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 136. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-136-149>
10. Bréon F.M., Henriot N. // J. Geoph. Res. 2006. V. 111. № 6. P. C06005. <https://doi.org/10.1029/2005JC003343>
11. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеопиздат, 1985.
12. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Лихачева М.В. Патент на изобретение 2711585 РФ // Оpubл. 17.01.2020. Бюл. № 2.