

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
Институт прикладной физики
Российской академии наук

В.В. Баханов, А.А. Демакова,
Э.М. Зуйкова, М.С. Рябкова, В.И. Титов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ
КОРОТКОМАСШТАБНЫХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН
ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Препринт № 814

Нижний Новгород
2017

В ИПФ РАН разработан метод определения двумерных спектров ветрового волнения путем спектрального анализа изображений морской поверхности при наклонном визировании. Разработан оптический спектральный анализатор на некогерентном свете, позволяющий регистрировать двумерные спектры изображений морской поверхности в реальном времени. Этот анализатор обладает большим динамическим диапазоном. Время регистрации одного двумерного спектра составляет одну секунду. При установке на океанографической платформе или на баке корабля регистрируются спектры волн длиной от метра до нескольких сантиметров в зависимости от высоты над уровнем моря и угла визирования. Приводятся результаты измерения спектров волнения оптическим методом с океанографической платформы.

**DETERMINATION OF SHORT WIND WAVES SPECTRA
BY THE OPTICAL TECHNIQUE**

V.V. Bakhanov, A.A. Demakova, E.M. Zuikova, M.C. Ryabkova, V.I. Titov

The technique for remote sensing of two dimensional short wind waves spectra by spectral analysis of sea surface image was developed in IAP of RAS under grazing angles. The optical spectrum analyzer operating under incoherent light for recording of two dimensional spectra of sea surface image in real time with great dynamical range was developed. The time for recording of one spectrum equals to 1 second. The spectrum analyzer permits to record wave spectra from oceanography platform or the ship in wave range from meters to some centimeters depending on height under sea level and angle of observation. A results of short wind wave's spectrum measurements from oceanography platform are given.

Рецензент

к. ф.-м. н. В. Ю. Караев

Как известно, информацию о спектре морских волн можно получать путем спектрального анализа изображения взволнованной поверхности моря в рассеянном свете неба. Изображение поверхности моря можно регистрировать с помощью видеокамеры. Такой путь предполагает дальнейшую компьютерную обработку изображений. Как правило, этот метод определения спектров морских волн реализуется при обработке плановых аэроснимков.

В ИПФ РАН разработан метод определения двумерного спектра ветрового волнения путем спектрального анализа изображений морской поверхности при наклонном визировании. Разработан оптический спектр-анализатор на некогерентном свете, позволяющий регистрировать двумерные спектры изображений морской поверхности в реальном времени. Этот анализатор обладает большим динамическим диапазоном. Время регистрации одного двумерного спектра составляет одну секунду. При установке на океанографической платформе или на баке корабля регистрируются спектры волн длиной от метра до нескольких сантиметров в зависимости от высоты над уровнем моря и угла визирования. Приводятся результаты измерения спектров волнения оптическим методом с океанографической платформы.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме дистанционной диагностики морского волнения в последнее время уделяется большое внимание. Натурные измерения спектров ветровых волн имеют научное и прикладное значение. В частности, данные о спектрах ветровых волн необходимы для развития оптических и РЛ спутниковых методов зондирования океанов. Как известно, до сих пор не существует достаточно полных данных о диаграмме направленности спектра коротких волн, о частотном спектре коротких волн и о трансформации спектров волнения под действием подповерхностных процессов, а также в слайках, обусловленных загрязнениями поверхности океана.

Известны работы [1–7], в которых обсуждаются современные модели спектров поверхностного волнения для задач дистанционного зондирования, приводится обзор популярных моделей спектров и примеры решения задач восстановления характеристик поверхности моря по данным радиолокационного и оптического зондирования.

В работе [5] для определения спектров короткомасштабных ветровых волн используются стереоизображения морских волн, полученные с океанографической платформы. Спектральный анализ изображений морской поверхности позволяет проводить измерения двумерных спектров волнения в широком диапазоне длин поверхностных волн как с океанографической платформы, так и с движущегося носителя (кораблей, вертолетов).

Классические работы по спектральному анализу изображений морской поверхности [8] используют линейную модель зависимости яркости поверхности от уклонов волн при освещении поверхности ясным небом (или при сплошной однородной облачности) и вне зоны солнечных бликов. В этом случае спектр изображения морской поверхности будет пропорционален спектру уклонов волн. В ИПФ РАН развиты методы диагностики спектров волнения по оптическим изображениям поверхности моря и разработан ряд некогерентных оптических анализаторов спектра изображения морской поверхности в реальном времени, которые используются в составе корабельного комплекса для исследования трансформации волнения в слайках, поле внутренних волн, над неоднородностями подводного рельефа, в зонах цветения водорослей и т.д. [6,7,9].

МОДЕЛЬ ВИДИМОСТИ ВОЛН

Модель зависимости яркости поверхности I от уклонов волн при освещении ясным небом или однородным пасмурным небом использует в первом приближении линейную зависимость [8]:

$$I(\mathbf{q}) = I_0 + \mathbf{q}\nabla I. \quad (1)$$

Флуктуации яркости пропорциональны произведению градиента яркости поверхности $\nabla I = (\partial I / \partial q_x, \partial I / \partial q_y)$ на вектор уклонов волн $\mathbf{q} = (\partial z / \partial x, \partial z / \partial y)$, где $z(x, y)$ – возвышения волн, I_0 – средняя яркость поверхности моря.

На поверхности моря наибольший оптический контраст будут иметь волны, распространяющиеся в направлении градиента яркости, и не будут видны волны с направлением распространения, перпендикулярным градиенту яркости. Спектр волн в рамках линейной модели можно оценить по спектру изображения поверхности моря G_I :

$$G_I(\mathbf{k}) = (\mathbf{k}\nabla I)^2 G(\mathbf{k}) = (k^2 \nabla I^2 \cos^2 \alpha) G(\mathbf{k}), \quad (2)$$

где $G(\mathbf{k})$ – спектр возвышений поверхности моря, \mathbf{k} – волновой вектор, α – угол между направлением градиента яркости поверхности и направлением распространения поверхностной волны. Выражение $(\mathbf{k}\nabla I / |\nabla I|)^2 G(\mathbf{k})$ называется спектром уклонов волн в направлении градиента яркости поверхности $\nabla I / |\nabla I|$. Спектр изображения морской поверхности будет равен нулю для волн с направлением распространения, перпендикулярным градиенту яркости.

Яркость поверхности моря равна произведению яркости неба на коэффициент отражения света Френеля и видимые контрасты волн будут определяться как угловой зависимостью яркости неба для зеркального участка небосвода, так и зависимостью коэффициента Френеля от локального угла падения света. При наблюдении в противосолнечных направлениях под скользящими углами градиент яркости поверхности будет ориентирован в направлении визирования.

ОПИСАНИЕ ДВУМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА-АНАЛИЗАТОРА (ДОСА)

В ИПФ РАН разработан некогерентный двумерный оптический спектр-анализатор (ДОСА) для спектрального анализа изображения морской поверхности в реальном времени без промежуточной регистрации изображения, использующий принцип модуляции изображения эталоном с гармоническим распределением коэффициента прозрачности [9]. Цикл измерения двумерного спектра изображения анализатором ДОСА занимает 1 с. За это время регистрируется спектр размерностью 140 пространственных частот на 32 направления волн в угловом секторе $120^\circ (\pm 60^\circ$ от направления визирования ДОСА) с угловым разрешением примерно $3,7^\circ$. Диапазон пространственных частот спектра зависит от геометрии наблюдения и фокусного расстояния объектива.

Разработан метод восстановления спектров ветровых волн по спектрам изображений в рамках линейной модели (1).

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ВОЛНЕНИЯ

В дальнейшем перейдем к безразмерному спектру насыщения Филлипса [11] или, как его еще называют, к спектру кривизны: $B = k^4 G(\mathbf{k})$.

Первые измерения спектров волнения с помощью ДОСА проводились на Черном море в г. Феодосия с мола [6]. Высота установки ДОСА над уровнем моря составляла 8 м, угол визирования 25° . Направление ветра – вдоль мола к берегу. Направление длинной волны – около направления ветра.

Для данной геометрии наблюдения ДОСА регистрировал спектр волн длиной от 84,3 см до 2,2 см в угловом диапазоне примерно $\pm 50^\circ$ относительно направления наблюдения ДОСА.

На рис. 1 представлен усредненный спектр до ветрового фронта (усреднялись спектры ДОСА с 10:30:56 по 10:32:59,6). Это так называемый спектр кривизны, или спектр насыщения (saturation spectra), $B(\mathbf{k})$ [11] в условных единицах (спектр возвышений, восстановленный из спектра ДОСА по модели (1), умноженный на k^4). Спектр изображен в координатах пространственная частота $\nu = k / 2\pi$ в 1/см от 0,01186 1/см до 0,45 1/см, всего 200 спектральных точек в линейном масштабе (длина волны от 84,3 см до 2,2 см) – угол направления волны относительно направления ветра (всего 33 направлений волн с угловым разрешением примерно $3,4^\circ$). Выбросы по краям спектра на низких частотах – отклик на среднюю яркость, и их надо отбрасывать. Спектр имеет “выемку” на

высоких частотах в середине – это связано с перспективными искажениями изображения при наблюдении под скользящими углами.

На рис. 2 и 3 представлены угловые и частотные спектры для разных длин волн и направлений волн. Здесь происходит увеличение спектров для волн, распространяющихся по ветру. Спектр кривизны сантиметровых волн с уменьшением длины волны (увеличением пространственной частоты) сначала спадает, а потом растет. Минимум спектра наблюдается для волн длиной 3–4 см [1, 6].

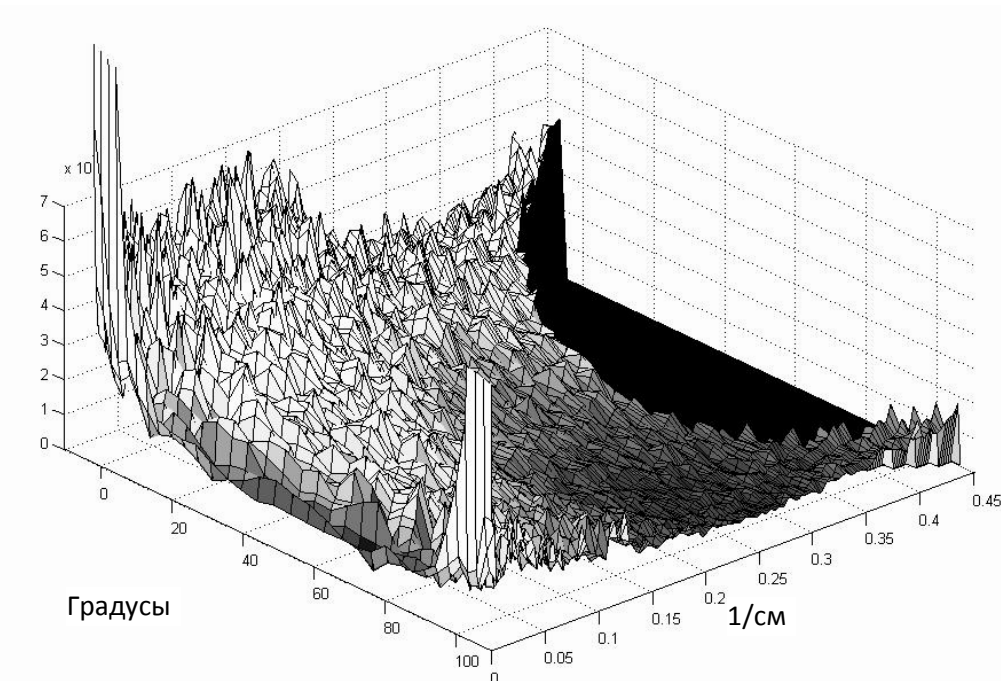


Рис. 1. Спектр кривизны в условных единицах до ветрового фронта.

По осям пространственная частота волн в 1/см и направление волны относительно ветра в градусах

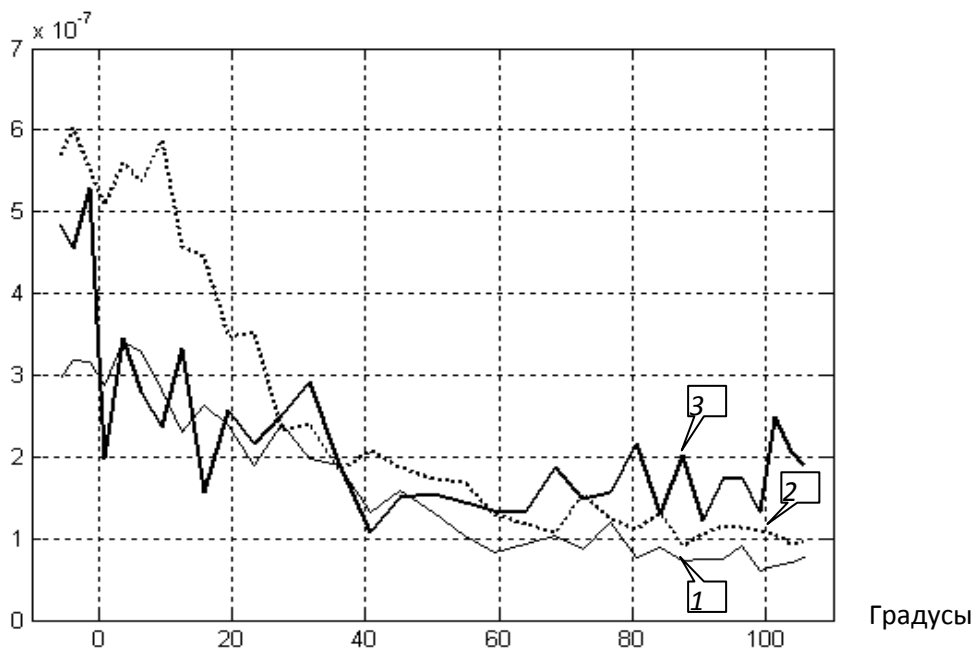


Рис. 2. Угловые спектры волн различной длины: 1 – длина волны 3,7 см, 2 – длина волны 6,1 см, 3 – длина волны 31,6 см. Углы отсчитываются в градусах относительно направления ветра.

По вертикали – спектральная плотность кривизны в условных единицах

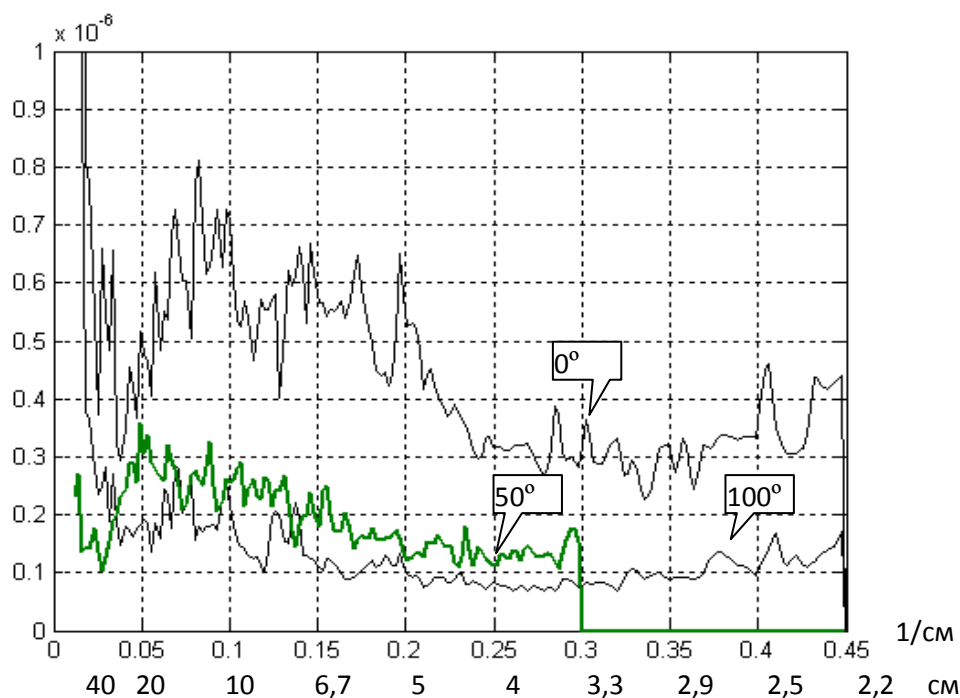


Рис. 3. Сечения спектров кривизны по пространственной частоте для трех направлений волн. По горизонтали – пространственная частота 1/см в линейном масштабе (длина волны от 84,3 см до 2,2 см). Выноски показывают угол между направлением волны и направлением ветра

Новые интересные результаты по спектрам короткомасштабным ветровых волн были получены с океанографической платформы в Кацивели в 2016г. ДОСА был установлен на нижнем выносном мостике на высоте 4,5 м над уровнем моря. Направление визирования – на восток вдоль морской стороны платформы. При обработке данных ДОСА была применена разработанная методика восстановления абсолютных значений спектров насыщения.

На рис. 4 представлен двумерный спектр волн B в координатах волновое число на поверхности моря в рад/м и угол между направлением распространения волн и направлением визирования ДОСА. Спектр получен 06.10.2016 примерно в 16:10. Скорость ветра составляла около 8 м/с на высоте 17 м над уровнем моря. Ветер дул на восток почти вдоль платформы. Часть спектра отсутствует (значения спектра положены равными нулю), что обусловлено перспективными искажениями изображения при наклонном визировании. Спектр получен усреднением 200 спектров, т.е. усреднением за 200 с.

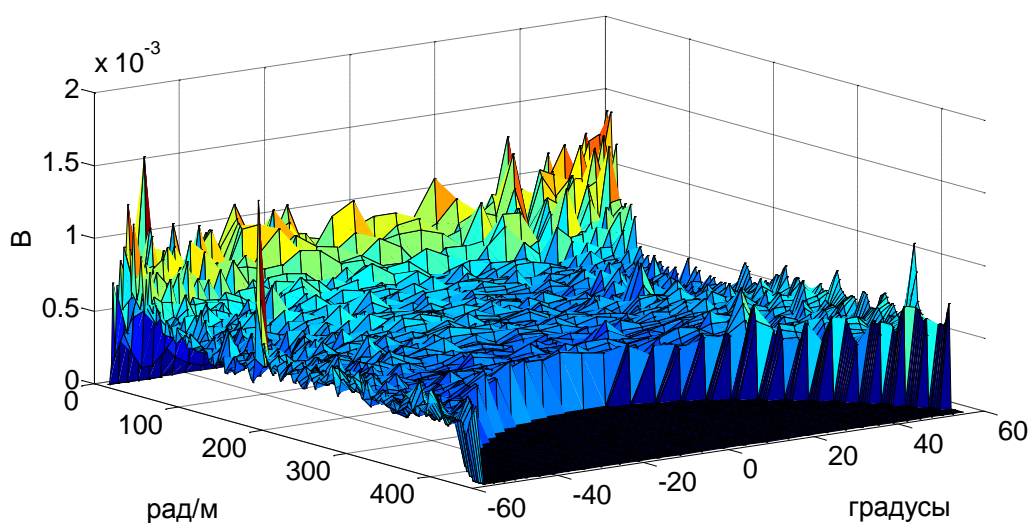


Рис. 4. Двумерный спектр волн B . По левой оси отложено волновое число в рад/м. По правой оси - направления волн в градусах относительно направления визирования ДОСА

На рис. 5 представлены угловые спектры волн для этого двумерного спектра. Выноски показывают длину волны. Направление ветра лежит вблизи крайних углов спектра: спектры возрастают к крайним углам. Угловые спектры демонстрируют анизотропию: они возрастают к направлению ветра. С уменьшением длины волны угловая анизотропия спектров уменьшается.

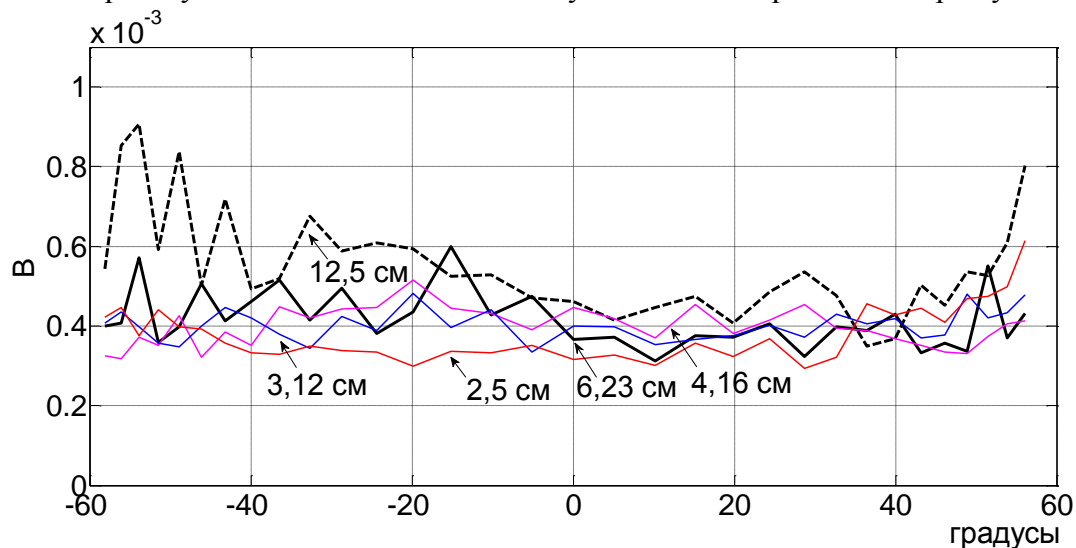


Рис. 5. Угловые спектры волн. Выноски показывают длину волны $\lambda = 2\pi / k$

На рис. 6 представлен двумерный спектр волн B , полученный 07.10.2016 в 15:30, когда ДОСА был установлен на восточном углу верхней палубы на высоте 14 м над морем. Ветер имел восточное направление и около восточного угла платформы, где был установлен ДОСА, образовался слик (область выглаживания волн). Очертания и границы слика менялись случайным образом. На рис. 6 видно выглаживание волн (уменьшение спектра) для волн с волновым числом около 20–25 рад/м и направлением распространения от -20° до 40° , обусловленное этим сликом. Спектр получен путем усреднения 200 спектров, т. е. усреднением спектров за время 200 с.

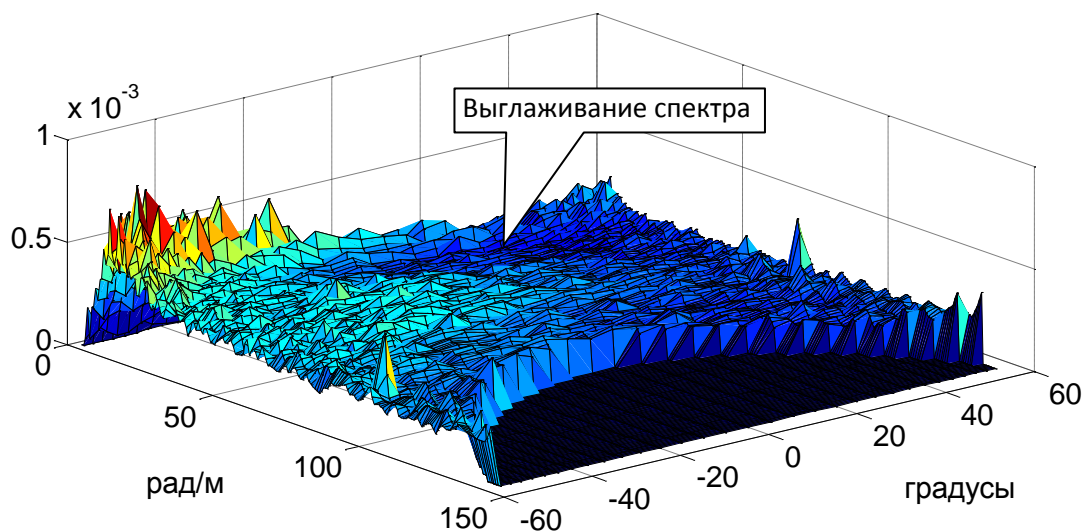


Рис. 6. Двумерный спектр волн B . По левой оси отложено волновое число в рад/м, по правой оси – направления волн в градусах относительно направления визирования ДОСА

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 16-05-00858а, 15-05-07726а, 15-45-02610 р_поволжье_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Elfouhaily, T., Chapron, B. and Katsaros, A. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // Journ. of Geophys. Res. 1997. V.102. NO C7. P.15,781 – 15,796.
2. Караев В.Ю., Баландина Г.Н. Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 1-12
3. Karaev, V., Kanevsky, M., Meshkov, E. The effect of sea surface slicks on the doppler spectrum width of a backscattered microwave signal // Sensors, 2008, 8, 3780-3801, DOI:10.3390/s8063780
4. Ryabkova, M. S., Karaev, V. Y. Titchenko, Y. A. and Meshkov, E. M. Experimental study of the microwave radar Doppler spectrum backscattered from the sea surface at low incidence angles // 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Montreal, QC, Canada, 2017, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105008
5. Kosnik, Mariya V. and Dulov, Vladimir A. Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface// Meas. Sci. Technol. **22** (2011). 015504 (9pp). doi:10.1088/0957-0233/22/1/015504
6. Титов, В.И., Баханов, В.В., Зуйкова, Э.М., Лучинин, А.Г., Троицкая, Ю.И. Исследование динамики двумерных спектров морского волнения // Сборник научных статей "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". М.: ООО "ДоМира", 2010. Т 7, № 1. С.273 – 285.
7. Титов, В.И., Зуйкова, Е.М., Лучинин, А.Г. Исследование пространственно – временных спектров короткомасштабного волнения оптическим методом // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Сб. науч. тр. НАН Украины: Севастополь: МГИ, 2010. Вып. 21. С. 197-206.
8. Chapman R.D. and Irani G.B. Errors in estimating slope spectra from wave images // Applied Optics, 1981. V. 20. № 20. P.3645-3652.
9. Устройство оптической спектральной обработки изображения шероховатой поверхности: пат. 2400705 Рос. Федерация / Зуйкова Э.М., Титов В.И., Троицкая Ю.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН. № 2009103024; заявл. 30.01.2009; опубл. 27.09.2010.
10. Brunger, Alfred P. and Hooper, Frank C. Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance // Solar Energy 1993. V. 51, № 1. P. 53-64.
11. Филлипс, О.М. Динамика верхнего слоя океана // Л. : Гидрометеиздат, 1980. 319 с.