

Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных слайках по фотографиям морской поверхности

В. А. Дулов, М. В. Юровская ✉

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
✉ *mvkosnik@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.10.2020 г., после доработки – 14.12.2020 г.

Цель. Целью работы является оценка контрастов двумерных спектров коротких ветровых волн между чистой морской поверхностью и поверхностью с тонкой пленкой растительного масла. Особый интерес представляет угловая зависимость контраста, которая на данный момент остается неясной. Работа призвана пополнить эмпирическую базу знаний о подавлении волн на пленках поверхности-активных веществ в натуральных условиях. Ее результаты могут быть интересны как для теоретического моделирования спектров коротких ветровых волн, так и для развития методов дистанционного мониторинга океана.

Методы и результаты. Оценки контрастов были выполнены путем анализа фотографий морской поверхности, сделанных с платформы Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (пгт Кацивели) при проведении специализированных экспериментов с разливом растительного масла для получения искусственных слайков. Реализованный в работе простой метод оценок контрастов основан на предположениях о линейной связи между яркостью и уклоном морской поверхности и о неизменности передаточной функции, связывающей яркость и уклон при переходе от чистой поверхности к слайку. Этот метод, в отличие от примененных ранее, дает возможность получать двумерные распределения спектральных контрастов одновременно по волновому числу и по направлению. Наибольшую техническую трудность представляет получение оценок для коротких волн. В данной работе спектральные контрасты оценены для ветровых волн с длинами от ~20 см до ~1 см.

Выводы. При умеренных ветрах со скоростями 6–8 м/с полученные контрасты монотонно возрастают с ростом волнового числа, достигая значений ~10. При почти штилевых условиях (скорость ветра 0,5 м/с) наблюдается максимум контраста ~30–50 на волновых числах ~100 рад/м, что качественно подтверждается оценками, полученными с помощью струнного волнографа. Эти результаты согласуются с измерениями, проведенными ранее другими авторами. Двумерные распределения контраста анизотропны с максимумом в направлении, перпендикулярном направлению ветра. При умеренных ветрах анизотропия усиливается с ростом волнового числа.

Ключевые слова: поверхностные пленки, короткие ветровые волны, спектр волнения, натурные измерения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 и при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00-752А.

Для цитирования: Дулов В. А., Юровская М. В. Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных слайках по фотографиям морской поверхности // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 373–386. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-373-386

Spectral Contrasts of Short Wind Waves in Artificial Slicks from the Sea Surface Photographs

V. A. Dulov, M. V. Yurovskaya ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ mvkosnik@gmail.com

Purpose. The aim of the work is to evaluate the contrasts between the two-dimensional spectra of the short wind waves on a clean sea surface and on the surface covered by a thin film of vegetable oil. The contrast angular dependence, which is still not understood, is of particular interest. The study is intended to widen the base of empirical notions of wave suppression on the surfactant films in field conditions. Its results may be useful both for theoretical modeling the short wind wave spectra, and for developing the methods for remote monitoring of the ocean.

Method and Results. The contrasts were assessed by analyzing the sea surface photographs taken from the Platform of the Black Sea hydrophysical subsatellite polygon (Katsiveli) during the specialized experiments aimed at obtaining artificial slicks using vegetable oil spills. The applied in the study simple method for estimating the contrasts is based on the assumptions of a linear relationship between the brightness and the sea surface slope, and of the invariability of the brightness – slope transfer function at transition from a clean sea surface to a slick. In contrast to the previously applied methods, this approach makes it possible to obtain the contrasts varying both in wavenumber and direction. Obtaining the estimates of the shortest wave characteristics usually constitutes the utmost technical difficulty. In the work, the spectral contrasts are evaluated for the wind waves whose lengths are from ~ 20 to ~ 1 cm.

Conclusions. At moderate wind speeds (6–8 m/s), the obtained contrasts increase monotonically with the wavenumber up to the values ~ 10. Under calm conditions (wind speed 0.5 m/s), the spectral contrast maximum (~ 30–50) is observed at the wavenumber peak ~ 100 rad/m that is qualitatively confirmed by the estimates from a string wave gauge. These results are consistent with the previous measurements performed by the other authors. The two-dimensional contrast distributions are anisotropic with the maximum in the direction perpendicular to the wind one. At moderate winds, the anisotropy increases with growth of a wavenumber.

Keywords: sea surface slicks, short wind waves, wave spectrum, field measurements

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0005 and at support of the RFBR grant No. 19-05-00-752A.

For citation: Dulov, V.A. and Yurovskaya, M.V., 2021. Spectral Contrasts of Short Wind Waves in Artificial Slicks from the Sea Surface Photographs. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 348-360. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-348-360

Введение

Пленки на морской поверхности остаются явлением, интенсивно исследуемым в морской гидрофизике, биологии и экологии моря [1–5]. Изучение пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) антропогенного происхождения как индикатора загрязнений морской среды необходимо для разработки и совершенствования систем спутникового мониторинга несанкционированных разливов нефтепродуктов, особенно последствий аварий на нефтедобывающих платформах и судах [6–9]. Естественные пленки биологического происхождения интересны как индикаторы биопродуктивности и зон эвтрофикации [2, 10]. Порождаемые ими выглаживания поверхности моря (слики) визуализируют особенности течений, внутренние волны и зоны конвергенции [1, 11–13].

Пленки ПАВ изменяют поверхностное натяжение воды и упругость морской поверхности, поэтому их можно применять как инструмент для исследо-

вания явлений на поверхности раздела вода – воздух. Поскольку термодинамические свойства пленок таких веществ, как, например, рыбий жир, растительное масло, олеиновая кислота, изучены в лабораторных условиях, их используют для создания искусственных слик в море и волновых лотках, чтобы ставить целенаправленные эксперименты по исследованию процесса растекания пленки, механизмов формирования коротких волн и их обрушений, влияния шероховатости морской поверхности на воздушный поток и т. д. [1, 5, 14–17].

Важную информацию в этих экспериментах несут спектральные контрасты $K(\mathbf{k})$ – отношение спектров коротких волн в отсутствие пленки и в слике в зависимости от волнового вектора \mathbf{k} . Простая теоретическая модель, связывающая $K(\mathbf{k})$ с затуханием коротких волн, вызванным пленкой, предложена в работах [1, 18, 19]. Натурные измерения спектральных контрастов с помощью оптического спектрального анализатора описаны в [18, 19]. Радиолокационные измерения спектральных контрастов на искусственных сликах в море, созданных с помощью различных ПАВ, выполнялись с самолетов [20], спутников [4, 21–23], судов и платформ [1, 4, 24, 25]. В результате экспериментальных и теоретических исследований был установлен характерный вид зависимости спектральных контрастов от волнового числа [1, 24, 25], в то время как их зависимость от азимута \mathbf{k} относительно направления ветра остается не вполне ясной. Знание азимутальной зависимости особенно важно для интерпретации радиолокационных изображений пленок [4, 22, 23, 25].

Данная работа продолжает натурные исследования спектральных контрастов на искусственных сликах. Оценки контрастов были выполнены на основе обработки фотографий морской поверхности. Этот метод по отношению к перечисленным ранее обладает тем преимуществом, что позволяет сразу получить двумерную картину контрастов – их зависимость и от волнового числа, и от азимута.

Метод оценки спектральных контрастов

Согласно многочисленным исследованиям [14, 26–29], для морской поверхности выполняется предположение о линейном соотношении между яркостью и уклоном поверхности. Поэтому спектр возвышений морской поверхности S_H можно получить умножением спектра яркости фотоснимка S_B на модуляционную передаточную функцию (МПФ) [28–32]:

$$S_H = S_B \frac{1}{(G_x k_x + G_y k_y)^2}, \quad (1)$$

где G_x, G_y – константы, для нахождения которых требуется калибровка метода. Такая калибровка, например, в работах [28, 29, 32] выполнялась путем анализа сглаженного поля яркости солнечного блика, в работах [33, 34] – путем итерационной подгонки поля яркости спутникового изображения и его полной физической модели.

Несмотря на широкую практику успешного применения метода в научных исследованиях, теоретический анализ его ошибок, выполненный в [35–37],

указывает на ряд существенных ограничений, связанных с нелинейными эффектами и неоднородностью констант G_x, G_y , в пределах рассматриваемого изображения морской поверхности. Для целей настоящего исследования важно, что в работах [31, 38], выполненных с использованием фотографий, сделанных с платформы Черноморского гидрофизического подспутникового полигона (пгт Кацивели), метод был применен для оценки пространственных спектров коротких волн при различных скоростях ветра. Аналогичные оценки пространственных спектров коротких волн вблизи Калифорнии [39], полученные с помощью видеозаписи поляриметрической камерой в рамках принципиально иного подхода к оценке уклонов поверхности [40], полностью подтвердили выводы [38] об уровне спектра коротких волн и его зависимости от модуля и азимута волнового вектора \mathbf{k} , поэтому в данной работе мы применим уравнение (1) для оценки спектральных контрастов сликков.

В работах [31, 38] для калибровки метода использовались данные стереофотосъемки. Стереообработка изображений морской поверхности возможна лишь при наличии на ней маркеров – пакетов коротковолновой ряби. Рябь подавляется пленкой в области слика, поэтому в данной работе методика [31, 38] не может быть применена полностью. В то же время МПФ определяется главным образом условиями освещенности и геометрией съемки (см., напр., [26, 35]). Если считать, что они одинаковы для слика и чистой поверхности, тогда остается неизменной и величина МПФ. В этом случае, как следует из формулы (1), МПФ не будет входить в искомую величину спектрального контраста, которая может быть найдена с использованием только спектров яркости:

$$K(\mathbf{k}) = (S_H(\mathbf{k}))_0 / (S_H(\mathbf{k}))_{\text{slick}} = (S_B(\mathbf{k}))_0 / (S_B(\mathbf{k}))_{\text{slick}}, \quad (2)$$

где индексы $_0$ и $_{\text{slick}}$ относятся соответственно к чистой морской поверхности и поверхности, покрытой пленкой.

Формула (2) позволяет восстанавливать спектральные контрасты по фотографиям морской поверхности. Однако, как следует из формулы (1), МПФ сингулярна на направлениях волнового вектора, удовлетворяющих условию $G_x k_x + G_y k_y = 0$. Для этих направлений спектр яркости формируется нелинейными механизмами [31, 35]. Соответственно, изложенный метод не может дать спектральные контрасты в окрестности этих направлений.

Эксперименты

Эксперименты выполнялись с океанографической платформы Морского гидрофизического института (пгт Кацивели) в 2009–2011 гг. путем формирования искусственных сликков с помощью тонкой пленки растительного масла. Разлив растительного масла с лодки либо с платформы осуществлялся с учетом направления ветра и течения так, чтобы пятно слика с характерным размером 20–30 м прошло через поле наблюдения расположенного на платформе фотоаппарата. Для фотосъемки использовалась цифровая камера *SONY DSC-R1*. Измерительная серия, продолжающаяся 10–15 мин при неподвижной камере, включала в себя по несколько десятков фотографий морской поверхности в сликке и вне его (таблица). Настройки камеры исключали автоматическую

коррекцию яркости, цвета и контраста изображений. По известным параметрам съемки (высота и угол визирования, фокусное расстояние и физические размеры матрицы) впоследствии осуществлялась привязка изображений к средней плоскости морской поверхности. Поле обзора камеры, расположенной на высоте 4,3 м, имело вид трапеции с характерными размерами оснований 2,3 и 3,3 м. Разрешение камеры составляло 3888×2592 пикселей, что при высоте съемки ~ 4 м и угле к горизонту 30° соответствует среднему разрешению на морской поверхности 1–2 мм. Одновременно выполнялись измерения возвышений морской поверхности с помощью струнного волнографа, расположенного в 10–15 м от области наблюдения камеры, а также измерения скорости и направления ветра на мачте платформы на высоте 21 м. Более детальная информация о методике формирования снимков приведена в работах [15, 17], о физических свойствах тонкой пленки растительного масла – в [1, 17], об использованных средствах измерения ветра и волн – в [17, 41].

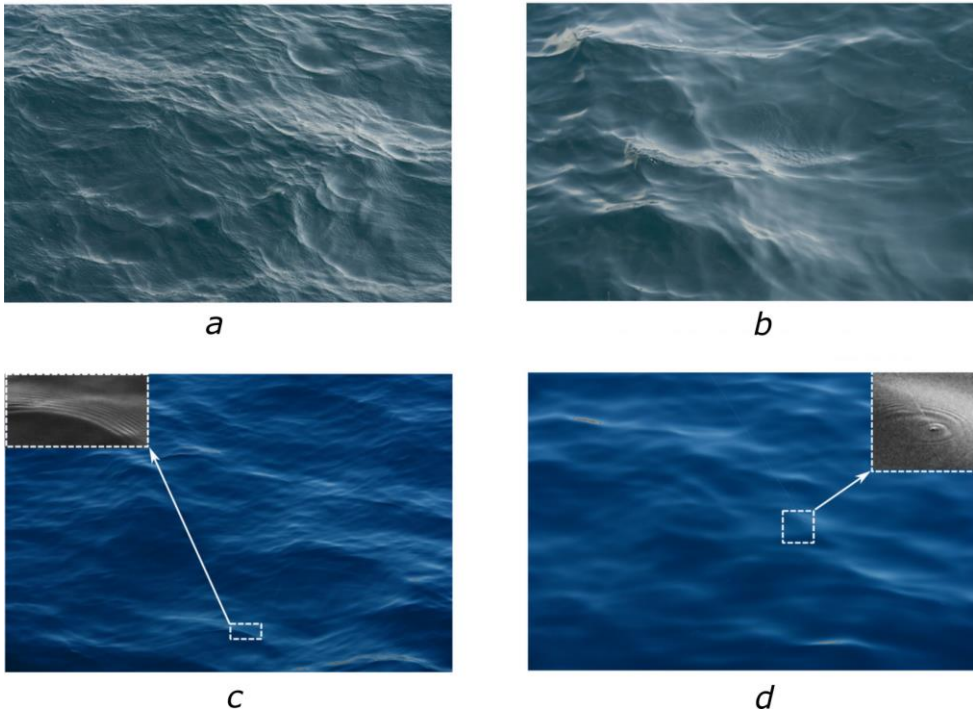
В таблице приведена информация об условиях экспериментов, включая среднюю скорость ветра (U) и значительную высоту волн (H_s); также охарактеризована стабильность ветровых условий за время эксперимента, необходимая для корректного сравнения спектров на чистой воде и в слике, полученных со сдвигом по времени на 10–20 мин, для чего указаны стандартные отклонения скорости (δU) и направления ветра ($\delta\varphi_w$).

Условия экспериментов Experimental conditions

Номер эксперимента / Experiment number	Дата, время / Date, time	U , м/с / U , m/s	δU , м/с / δU , m/s	$\delta\varphi_w$, °	H_s , м / H_s , m	Число снимков (фон/слик) / Number of images (background/ slick)
1	13.10.2009, 10:05–10:22	7,8	0,3	2,2	0,49	68/28
2	13.10.2009, 10:24–10:42	7,9	0,2	2,5	0,53	46/29
3	24.08.2010, 15:48–16:24	0,5	0,1	9,8	0,42	18/60
4	01.10.2011, 11:55–12:30	7,4	0,5	3,8	0,27	72/69
5	07.10.2011, 11:30–12:10	6,7	0,3	9,4	0,30	74/63

Примеры фрагментов снимков чистой морской поверхности и поверхности, покрытой пленкой, для умеренной скорости ветра (эксперимент 1) и почти штилевых условий (эксперимент 3) приведены на рис. 1. На чистой поверхности наблюдаются рябь и многочисленные системы капиллярных волн, в то время как поверхность в слике более сглаженная. Отдельные пакеты капиллярных волн встречаются на многих изображениях слика в эксперименте 1, однако их количество значительно меньше, чем на снимках чистой поверхности. При малой скорости ветра короткие волны в слике практически отсутствуют. На врезках показаны увеличенные фрагменты изображений – пакет паразитных капиллярных волн (рис. 1, с), подтверждающий наличие таких волн при

слабой скорости ветра, и концентрически расходящиеся капиллярные волны от случайно попавшей в кадр лески (рис. 1, *d*), подтверждающие, что отсутствие ряби в кадре не вызвано расфокусировкой камеры.



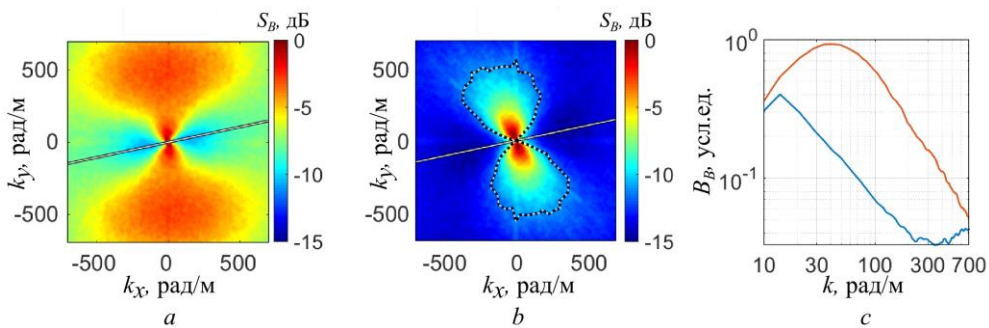
Р и с. 1. Фотографии чистой морской поверхности (*a, c*) и поверхности в области слика (*b, d*) для умеренной (*a, b*, эксперимент 1) и слабой (*c, d*, эксперимент 3) скоростей ветра

Fig. 1. Photographs of a clean sea surface (*a, c*) and a slick-covered surface (*b, d*) for moderate (*a, b*, experiment 1) and low (*c, d*, experiment 3) wind speeds

Спектральные контрасты

Фотографии каждой измерительной серии были разделены на *RGB*-составляющие. Ниже рассмотрим изображения зеленого канала, наименее подверженные аппаратным шумам, поскольку в матрицах большинства современных фотоаппаратов используется фильтр Байера, состоящий из 25% красных, 25% синих и 50% зеленых элементов [42]. После попиксельной привязки к координатам на горизонтальной плоскости на уровне невозмущенной морской поверхности выполнялось двумерное преобразование Фурье для полей яркости трех частично пересекающихся квадратных областей размером $1,5 \times 1,5$ м, перекрывающих область обзора. Спектры яркости были оценены стандартным образом: $S_B(\mathbf{k}) = \langle b(\mathbf{k})b^*(\mathbf{k}) \rangle$ (см., напр., [43]), где $b(\mathbf{k})$ – фурье-компоненты яркости; звездочка означает комплексное сопряжение, а усреднение выполнялось по этим областям и всем изображениям, относящимся к слику либо к чистой поверхности.

На рис. 2 приведен пример двумерных спектров яркости, полученных внутри и вне области слайка. Показаны спектры $B_B = k^2 S_B$, которые дают яркостное отображение спектра насыщения Филлипса $B = k^4 S_H(\mathbf{k})$. Спектры построены в децибельной шкале $10 \cdot \log_{10}(B_B/B_{\max})$, где B_{\max} – максимум по обоим спектрам. При использовании МПФ спектр насыщения оказывается умноженным на $\cos^2(\varphi - \varphi_G)$, где φ и φ_G – направления векторов \mathbf{k} и \mathbf{G} (см. формулу (1)). Как известно (см., напр., [38]), вне слайка уровень спектра насыщения принимает визуально сравнимые значения во всем рассматриваемом диапазоне волновых чисел. Именно это можно видеть на рис. 2, *a*. В слайке коротковолновая часть спектра подавляется пленкой, что ясно показывает сравнение рис. 2, *a*, *b*. На этих рисунках также выделяется характерная угловая форма спектров яркости, связанная с $\cos^2(\varphi - \varphi_G)$. Минимальные значения яркости достигаются при $\varphi - \varphi_G = \pm\pi/2$ (показаны сплошными линиями на рис. 2, *a*, *b*). Ориентация картины одинакова вне слайка и в его области, что подтверждает предположение о неизменности МПФ.



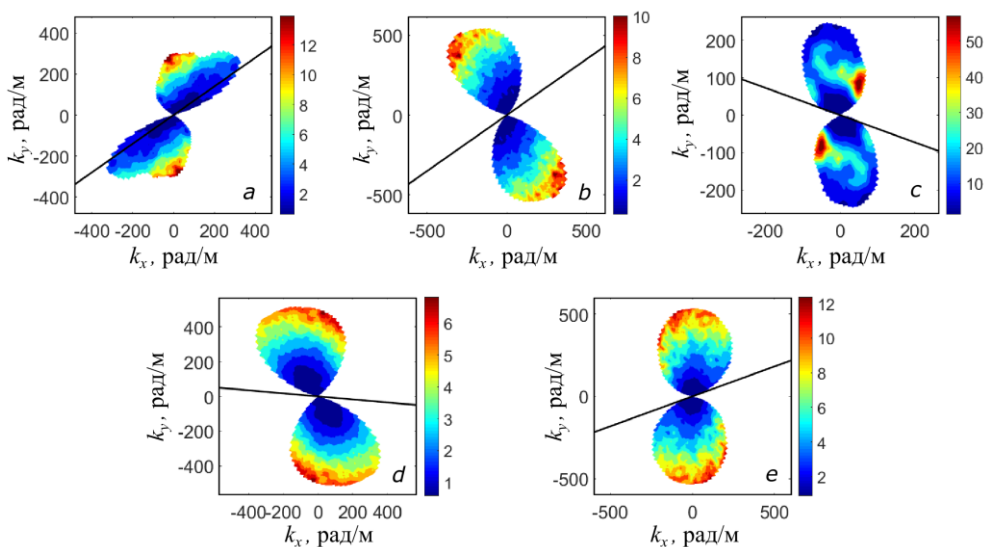
Р и с. 2. Яркостные спектры насыщения в эксперименте 4: *a* – фон; *b* – слик; *c* – спектры $kB_B(k, \varphi)$ в слайке при $\varphi = \varphi_G + \pi/2$ (синий) и $\varphi = \varphi_G$ (красный). Сплошные прямые линии показывают направление $\varphi - \varphi_G = \pm\pi/2$, прерывистая кривая (*b*) – рабочую область

Fig. 2. Brightness saturation spectra in experiment 4: *a* – background; *b* – slick; *c* – spectra $kB_B(k, \varphi)$ in a slick along $\varphi = \varphi_G + \pi/2$ (blue) and $\varphi = \varphi_G$ (red) transects. Solid straight lines indicate the direction $\varphi - \varphi_G = \pm\pi/2$, dotted line (*b*) – the working area

Существенное ограничение рассматриваемого подхода к оценке контрастов связано с наличием шума, который при понижении спектральной плотности волн в условиях слайка оказывается сравнимым по уровню с полезным сигналом. Источниками шума, кроме аппаратных, являются пространственные неоднородности освещенности, обрушения волн и их последствия в виде плавающих пузырьков, солнечные зайчики, а также эффекты, связанные с отклонением от линейного закона (формула (1)) при формировании яркости поверхности уклонами волн. Для минимизации шума фотосъемка всегда выполнялась в области, отдаленной от зоны солнечного блика, а снимки, на которые попали фрагменты обрушений, отбраковывались при визуальном контроле. Чтобы по-

лучить представление о спектральном уровне шума, рассмотрим разрез спектра яркости в слике вдоль направления $\varphi - \varphi_G = \pm\pi/2$, где, согласно формуле (1), отсутствует полезный сигнал. Пример сечения спектра $kB_B(k, \varphi)$ вдоль линии, показанной на рис. 2, *b*, приведен на рис. 2, *c*, где также показано сечение спектра в перпендикулярном направлении. С ростом волнового числа уровень шума становится сравнимым с уровнем полного сигнала. Поэтому дальнейший анализ будет относиться только к областям спектра в слике, где полный сигнал превышает уровень шума не менее чем в два раза. Далее будем называть такие области доверия к сигналам рабочими. Пример рабочей области показан на рис. 2, *b*. Отметим, что подобный анализ для синей и красной составляющих *RGB*-изображения дал рабочие области существенно меньшего размера, чем для зеленой составляющей.

На рис. 3 представлены спектральные контрасты (формула (2)) в рабочих областях для всех экспериментов. При умеренных скоростях ветра контрасты растут с ростом волнового числа, достигая значений ~ 10 на границах рабочих областей при $k \sim 500$ рад/м. В условиях, близких к штилевым (эксперимент 3, рис. 3, *c*), максимум контраста локализован не только по углу, но и по длине волн, и достигает значений в несколько десятков. Эксперименты 1 и 2 проведены при практически одинаковых условиях волнения, но сдвинуты по времени, что привело к изменению условий освещенности и соответствующему развороту вектора \mathbf{G} в МПФ. В результате рабочие области в этих случаях дополняют друг друга, проясняя угловую зависимость контраста. Как следует из всей совокупности рисунков, максимальные контрасты достигаются на направлениях волн, примерно перпендикулярных направлению ветра.

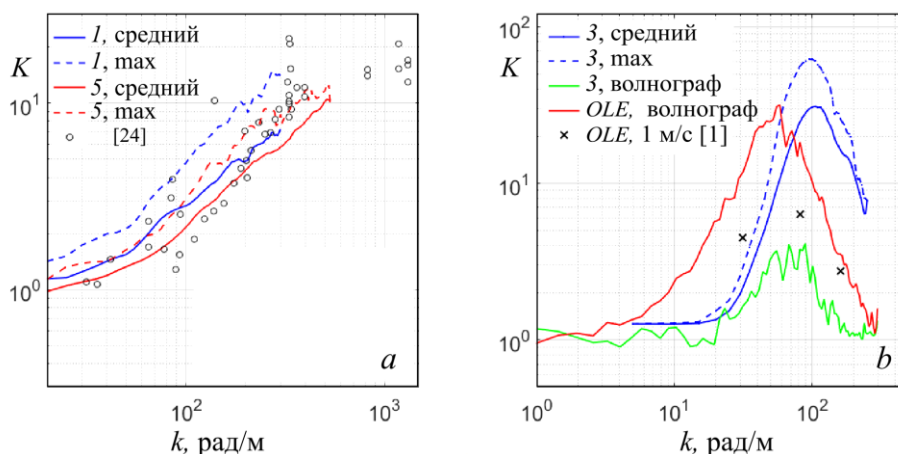


Р и с. 3. Спектральные контрасты в рабочих областях для экспериментов 1–5 (*a* – *e* соответственно). Линии показывают среднее направление ветра

Fig. 3. Spectral contrasts in the working areas for experiments 1–5 (*a* – *e*, respectively). Lines indicate the average wind direction

Обсуждение

На рис. 4, *a* приведены зависимости контрастов от волнового числа при умеренных скоростях ветра для экспериментов 1 и 5. Показаны средние по азимуту и максимальные контрасты полей $K(k, \varphi)$, определенные в пределах рабочих областей. На рисунке также приведен обобщенный массив различных данных о контрастах на пленке растительного масла при скоростях ветра 6–8 м/с. Эти данные взяты из рис. 7 и 9 работы [24]. Кривые для экспериментальных серий 1 и 5 согласуются с известной эмпирической информацией. Однако аналогичные кривые для экспериментов 2 и 4 (не приведенные на рисунке) демонстрируют примерно в два раза меньшие контрасты. Возможной причиной этого является упомянутый выше шум, который суммируется со спектром флуктуаций яркости, вызванных волнами, что может приводить к существенному завышению спектра в слике и, соответственно, – к занижению контраста.



Р и с. 4. Зависимость среднего и максимального спектральных контрастов от волнового числа при умеренных (*a*) и слабых (*b*) скоростях ветра в экспериментах 1, 3, 5. Сопоставление с данными волнографа и работ [1, 24]

Fig. 4. Dependence of the mean and maximum spectral contrasts on a wavenumber at moderate (*a*) and low (*b*) wind speeds in experiments 1, 3, 5. Comparison with the data from the wave gauge and [1, 24]

На рис. 4, *b* приведены зависимости среднего и максимального контрастов от волнового числа для околоштилиевых условий (эксперимент 3), демонстрирующие хорошо выраженный пик. В работе [1] отмечается, что подобный пик контраста наблюдался при слабом ветре для пленки олеиновой кислоты (OLE, черные крестики на рис. 4, *b*). В настоящей работе зависимость в виде пика получена для пленки растительного масла. На рис. 4, *b* приведены также контрасты, рассчитанные исходя из волнограммы, которая была получена во время эксперимента 3. По волнограмме были оценены частотные спектры волн для чистой воды и слика. Пересчет частотных спектров $S_H(\omega)$ в спектры по волновым числам $S_H(k) = S_H(\omega)(d\omega/dk)$ был выполнен с помощью дисперсионного соотношения для линейных гравитационно-капиллярных волн

$$\omega = \sqrt{gk + Tk^3/\rho},$$

где ω – круговая частота; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воды; T – коэффициент поверхностного натяжения, равный $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м для чистой воды, $32 \cdot 10^{-3}$ Н/м – для использованного растительного масла [17]. Приведенный на рис. 4, *b* спектральный контраст, который был оценен непосредственно по измерениям волн, также демонстрирует зависимость в виде пика. Подобные пики мы неоднократно получали по записям волнографа в наших натуральных экспериментах с пленками олеиновой кислоты при почти штилевых условиях. К сожалению, в таких пленках на поверхности воды образуются белые хлопья, которые препятствуют оценке контрастов с помощью фотографий. Необходимо отметить, что неподвижный волнограф, как правило, не применяется для оценки спектров столь коротких волн в связи с возможными доплеровскими смещениями частоты на течениях и в поле орбитальных скоростей длинных волн. Кроме того, для использованной конструкции волнографа уровень шума на частотах выше 1 Гц, по-видимому, оказывается сравнимым с уровнем спектра волн в слике [41], что должно так же, как и при использовании фотографий, приводить к существенно заниженной оценке контраста. Таким образом, полученный с помощью волнографа спектральный контраст подтверждает фотографические данные лишь на качественном уровне.

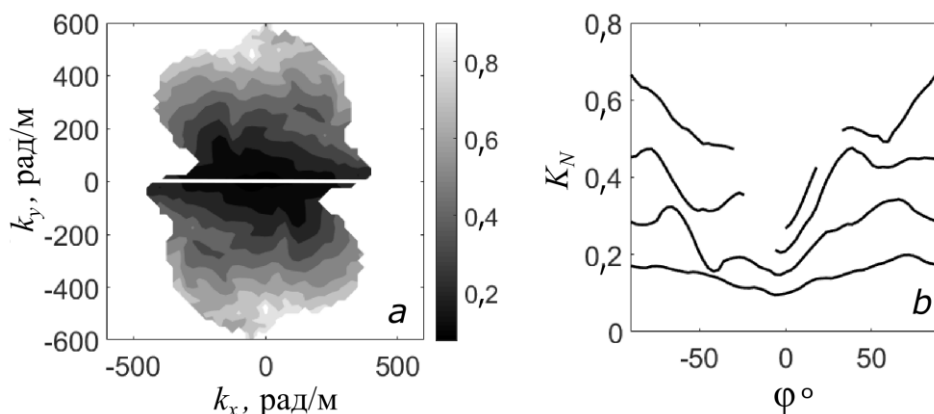


Рис. 5. Азимутальная зависимость спектральных контрастов: *a* – поле усредненного нормированного контраста K_N (белая линия соответствует направлению ветра); *b* – сглаженные угловые профили K_N для волновых чисел (снизу вверх) 100, 200, 300, 400 рад/м
Fig. 5. Azimuthal dependence of the spectral contrasts: *a* – field of the averaged normalized contrast K_N (white line corresponds to the wind direction); *b* – smoothed angular profiles K_N for the wave-numbers (from bottom to top) 100, 200, 300 and 400 rad/m

Азимутальную зависимость контраста при умеренных ветрах, следующую из четырех полей спектральных контрастов (эксперименты 1, 2, 4, 5 на рис. 3), трудно определить, так как рабочие области в каждом эксперименте не охватывают все азимуты. Чтобы явно показать эту зависимость, поля контрастов, нормированные на свои максимальные значения, были совмещены и развернуты таким образом, чтобы направление ветра в каждом случае соответство-

вало азимуту $\varphi = 0$. Нормированный контраст K_N в точках перекрытия рабочих областей принимался равным среднему по перекрывающимся данным. Результирующее поле K_N приведено на рис. 5, *a*, на рис. 5, *b* для детализации картины показаны сглаженные зависимости $K_N(\varphi)$ для фиксированных волновых чисел. Этот рисунок демонстрирует явную азимутальную анизотропию контраста с минимумом на направлении ветра и повышением контраста на поперечных направлениях. Угловой перепад контраста растет с ростом волнового числа.

Отмеченные закономерности распределения спектральных контрастов соответствуют известным теоретическим представлениям. Рост контрастов с ростом волнового числа при умеренных ветрах предсказывается простейшей теоретической моделью подавления коротких волн в сликах [1, 25]. Локализованный максимум контраста при слабых ветрах отражает теоретические выводы, следующие из рассмотрения эффекта Марангони [1]. Анизотропное распределение контрастов, возможно, объясняется следующими общими соображениями. Приток энергии от ветра к волнам осуществляется главным образом на направлениях, близких к направлению ветра [44]. Соответственно, на этих направлениях наблюдаются максимальные значения спектральной плотности коротких волн (см., напр., [38]). Волны, распространяющиеся в направлениях поперек ветра, могут порождаться только нелинейными механизмами взаимодействия волн: резонансными взаимодействиями [45], генерацией коротких волн при обрушениях более длинных волн [46], генерацией паразитной ряби на гребнях коротких волн – и, возможно, другими эффектами. При понижении уровня спектра в слике интенсивность нелинейных процессов спадает в большей степени, чем линейная ветровая накачка, т. е. подавляется генерация волн на направлениях, примерно перпендикулярных направлению ветра, поэтому для таких направлений имеет место наибольший спектральный контраст.

Заключение

Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных пленках растительного масла были оценены в натуральных условиях по сериям фотографий морской поверхности. Метод оценки предполагает линейную связь между флуктуациями яркости и уклонами поверхности, откуда следует идейно простой способ получения контрастов с применением лишь стандартной спектральной обработки фотографий. Метод реализует идею одновременного получения спектральных контрастов в широком диапазоне модулей и направлений волновых векторов коротких волн.

Обработка фотографий, сделанных в натуральных экспериментах с пленками растительного масла, показала, что при умеренных ветрах зависимость контраста от волнового числа монотонна и соответствует известным данным, а при слабых ветрах она имеет резонансный характер с пиком на волновых числах ~ 100 рад/м. При этом была выявлена анизотропия распределения контрастов: контрасты минимальны при углах, близких к направлению ветра, и растут при отклонении от него. При умеренных ветрах анизотропия усиливается с ростом волнового числа.

Описанный метод оценки спектральных контрастов может найти применение в специализированных гидрофизических экспериментах, в частности для получения экспресс-оценок контрастов при их измерениях по более тонким методикам. Полученные экспериментальные результаты могут представлять интерес для теоретического моделирования спектров коротких ветровых волн и определения оценки влияния на них пленок поверхностно-активных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2010. 165с.
2. О возможностях радиолокационной диагностики зон эвтрофирования водоемов / С. А. Ермаков [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 336–343. doi:10.7868/S000235151303005X
3. *Cox C. S., Zhang X., T. F. Duda T. F.* Suppressing breakers with polar oil films: Using an epic sea rescue to model wave energy budgets // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, iss. 3. P. 1414–1421. doi:10.1002/2016GL071505
4. Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X / S. A. Ermakov [et al.] // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, iss. 7. 1097. doi:10.3390/rs10071097
5. Analysis of the effect of fish oil on wind waves and implications for air–water interaction studies / A. Benetazzo [et al.] // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15. P. 725–743. <https://doi.org/10.5194/os-15-725-2019>
6. *Bondur V. G.* Aerospace methods and technologies for monitoring oil and gas areas and facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47. P. 1007–1018. <https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
7. Joint sun-glitter and radar imagery of surface slicks / V. Kudryavtsev [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 123–132. doi:10.1016/j.rse.2011.06.029
8. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М. : ИКИ РАН, 2016. 335 с. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2016lavrova.pdf> (дата обращения: 22.04.2021).
9. *Fingas M., Brown C. E.* A Review of Oil Spill Remote Sensing // *Sensors*. 2018. Vol. 18, iss. 1. 91. doi:10.3390/s18010091
10. Новые идеи в океанологии. Т. 1: Физика. Химия. Биология. М. : Наука, 2004. 351 с. URL: http://www.aerocosmos.info/pdf/2006/Von_aero_2004.pdf (дата обращения: 22.04.2021).
11. Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика / М. В. Юровская [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 4. С. 68–82.
12. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 43–60.
13. On Capabilities of Tracking Marine Surface Currents Using Artificial Film Slicks / I. A. Kapustin [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 7. 840. doi:10.3390/rs11070840
14. *Cox C., Munk W.* Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun’s Glitter // *Journal of the Optical Society of America*. 1954. Vol. 44, iss. 11. P. 838–850. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000838>
15. Field investigations of the drift of artificial thin films on the sea surface / V. V. Malinovsky [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2007. Vol. 43. P. 103–111. doi:10.1134/S0001433807010124
16. *Munk W.* An Inconvenient Sea Truth: Spread, Steepness, and Skewness of Surface Slopes // *Annual Review of Marine Science*. 2009. Vol. 1. P. 377–415. doi:10.1146/annurev.marine.010908.163940
17. *Korinenko A. E., Malinovsky V. V.* Field study of film spreading on a sea surface // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56, iss. 3. P. 461–475. doi:10.5697/oc.56-3.461

18. *Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талинова Т. Г.* О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектров ветрового волнения под действием внутренних волн // *Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана.* 1980. Т. 16, № 10. С. 1068–1076.
19. *Ermakov S. A., Salashin S. G., Panchenko A. R.* Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation // *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* 1992. Vol. 16, iss. 3–4. P. 279–304. doi:10.1016/0377-0265(92)90010-Q
20. On the Reduction of the Radar Backscatter by Oceanic Surface Films: Scatterometer Measurements and Their Theoretical Interpretation / M. Gade [et al.] // *Remote Sensing of Environment.* 1998. Vol. 66, iss. 1. P. 52–70. doi:10.1016/S0034-4257(98)00034-0
21. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR / M. Gade [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 1998. Vol. 103, iss. C9. P. 18,851–18,866. <https://doi.org/10.1029/97JC01915>
22. Comparing Near-Coincident C- and X-band SAR Acquisitions of Marine Oil Spills / S. Skrunes [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2015. Vol. 53, iss. 4. P. 1958–1975. doi:10.1109/TGRS.2014.2351417
23. Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements / M. W. Hansen [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2016. Vol. 9, iss. 11. P. 4929–4940. doi:10.1109/JSTARS.2016.2587840
24. *Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Гуцин Л. А.* Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 86–98. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=231> (дата обращения: 22.04.2021).
25. Оценка контрастов спектра ветровых волн в снимках, вызванных биогенными и нефтяными пленками / В. Н. Кудрявцев [и др.]. Н. Новгород, 2008. 30 с. (Препринт № 765 / ИПФ РАН).
26. *Stilwell D.* Directional energy spectra of the sea from photographs // *Journal of Geophysical Research.* 1969. Vol. 74, iss. 8. P. 1974–1986. <https://doi.org/10.1029/JB074i008p01974>
27. *Ермаков С. А., Зуйкова Э. М., Салашин С. Г.* Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных снимках // *Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана.* 1987. Т. 23, № 7. С. 707–715.
28. Двумерные спектры возвышений поверхностных волн по данным аэрофотосъемки / А. Н. Большаков [и др.] // *Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана.* 1990. Т. 26, № 6. С. 652–658.
29. Определение спектра энергонесущих поверхностных волн по изображению солнечного блика. Сопоставление с контактными данными / А. Н. Большаков [и др.] // *Исследование Земли из космоса.* 1990. № 1. С. 20–27.
30. *Лузян Е. А.* Восстановление углового распределения энергии в двумерном спектре возвышений морской поверхности по ее оптическому изображению // *Исследование Земли из космоса.* 1988. № 3. С. 31–35.
31. *Kosnik M. V., Dulov V. A.* Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // *Measurement Science and Technology.* 2011. Vol. 22, iss. 1. 015504. doi:10.1088/0957-0233/22/1/015504
32. Sun glitter imagery of ocean surface waves: Part 1. Directional spectrum retrieval and validation / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2017. Vol. 122, iss. 2. P. 1369–1383. doi:10.1002/2016JC012425
33. *Мурынин А. Б.* Восстановление пространственных спектров морской поверхности по оптическим изображениям в нелинейной модели поля яркости // *Исследование Земли из космоса.* 1990. № 6. С. 60–70.
34. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным / В. Г. Бондур [и др.] // *Исследование Земли из космоса.* 2016. № 1–2. С. 7–24. doi:10.7868/S0205961416010048

35. *Monaldo F. M., Kasevich R. S.* Daylight Imagery of Ocean Surface Waves for Wave Spectra // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 2. P. 272–283. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0272:DIOOSW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0272:DIOOSW>2.0.CO;2)
36. *Chapman R. D., Irani G. B.* Errors in estimating slope spectra from wave images // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 20. P. 3645–3652. <https://doi.org/10.1364/AO.20.003645>
37. *Сергиевская И. А.* О возможностях использования оптического спектрального анализа для оценки характеристик волнения в присутствии пленок на морской поверхности // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46, № 1. С. 131–137.
38. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography / M. V. Yurovskaya [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 9. P. 4380–4394. doi:10.1002/jgrc.20296
39. Spectral Characteristics of Gravity-Capillary Waves, With Connections to Wave Growth and Microbreaking / N. J. M. Laxague [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2018. Vol. 123, iss. 7. P. 4576–4592. <https://doi.org/10.1029/2018JC013859>
40. Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging. / C. J. Zappa [et al.] // *Measurement Science and Technology*. 2008. Vol. 19. 055503. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/5/055503>
41. *Yurovsky Yu. Yu., Dulov V. A.* MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 217. 108043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108043>
42. *Jähne B.* Digital Image Processing. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2002. 528 p. doi:10.1007/3-540-27563-0
43. *Bendat J. S., Piersol A. G.* Random Data: Analysis and Measurement Procedures. New York : Wiley, 2010. 640 p.
44. *Plant W. J.* A relation between wind stress and wave slope // *Journal of Geophysical Research: Oceans* 1982. Vol. 87, iss. C3. P. 1961–1967. <https://doi.org/10.1029/JC087iC03p01961>
45. *Дулов В. А., Косник М. В.* Эффекты трехволновых взаимодействий в гравитационно-капиллярном интервале ветровых волн // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45, № 3. С. 408–419.
46. *Kudryavtsev V., Johannessen J.* On effect of wave breaking on short wind waves // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31, iss. 20. L20310. doi:10.1029/2004GL020619

Об авторах:

Дулов Владимир Александрович, заведующий лабораторией прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0038-7255**, **ResearcherID: F-8868-2014**, dulov1952@gmail.com

Юровская Мария Владимировна, старший научный сотрудник, лаборатория прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук; научный сотрудник Лаборатории спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79), **ORCID ID: 0000-0001-6607-4641**, **ResearcherID: F-8957-2014**, mvkosnik@gmail.com