

УДК 551.463.5

© Н. А. Богатов, А. А. Мольков*, 2021

Институт прикладной физики РАН, 603950, ул. Ульянова, д. 46, г. Нижний Новгород, Россия

*E-mail: a.molkov@inbox.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВЫХ ВОЛН В АТЛАНТИКЕ ПО ДАННЫМ СУДОВОЙ СТЕРЕОСЪЕМКИ

Статья поступила в редакцию 26.04.2021, после доработки 17.05.2021

Стереосъемка взволнованной водной поверхности — один из наиболее результативных инструментов дистанционной оценки характеристик взволнованной поверхности. Как правило, этот метод реализуется с палуб стационарных океанографических платформ или береговых сооружений посредством двух или более откалиброванных камер. От качества калибровки камер, традиционно реализуемой путем фотосъемки тест-объекта (шахматной доски) с разных ракурсов, напрямую зависит точность восстанавливаемой по стереопарам топографии объекта. При отлаженной процедуре восстановления морской поверхности по данным калиброванной стереосистемы, значительный интерес представляет получение данных с близкой точностью с помощью некалиброванных систем. Исследованию этого вопроса на примере судовой стереосъемки в Атлантике посвящена настоящая работа. Рассматривается процесс обработки изображений с некалиброванных камер, приводятся результаты восстановления рельефов морской поверхности и пространственных спектров ветровых волн при нескольких скоростях ветра, а также анализируется практическая применимость некалиброванных систем.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, стереосъемка морской поверхности, калибровка стереоизображений, рельеф морской поверхности, ветровое волнение, спектр волнения.

© N. A. Bogatov, A. A. Molkov*, 2021

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, 603950, Ulyanov Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

*E-mail: a.molkov@inbox.ru

RETRIEVAL OF WIND-DRIVEN WAVES IN THE ATLANTIC OCEAN BY STEREO IMAGERY

Received 26.04.2021, in final form 17.05.2021

Stereo imagery of the roughness sea surface is one of the most effective tools for remote sensing wave characteristics. Typically, this method is implemented from the decks of fixed oceanographic platforms or onshore structures using two or more calibrated cameras. The topography accuracy from stereopairs directly depends on the quality of camera calibration. With a well-functioning procedure for reconstructing the sea surface from the data of a calibrated stereo system, considerable interest is associated with data obtaining with close accuracy using uncalibrated systems. This work is devoted to the study of this issue using the example of ship stereo survey in the Atlantic. The paper considers the process of image processing from uncalibrated cameras, presents the results of reconstructing the sea surface reliefs at several wind speeds and spatial spectra of long surface waves, and analyzes the practical applicability of uncalibrated systems.

Key words: remote sensing, stereo vision, sea surface stereo image, sea roughness, wind driven waves, wave spectra.

1. Введение

Восстановление характеристик ветрового волнения является классической океанологической задачей, интерес к которой не ослабевает с течением времени. Тому есть множество причин фундаментального и прикладного значений, локального и планетарного масштабов, а также влияние технологического прогресса. Возможности охвата больших площадей, быстрой смены рабочей акватории, и получение довольно полного набора данных с требуемой регулярностью безоговорочно выдвинули дистанционные методы зондирования водной поверхности в класс наиболее востребованных и динамически развивающихся. Среди них особое внимание заслуживает стереофотограмметрический метод, устанавливающий связь

Ссылка для цитирования: Богатов Н.А., Мольков А.А. Восстановление характеристик ветровых волн в Атлантике по данным судовой стереосъемки // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 4. С. 90–97. doi: 10.7868/S2073667321040080

For citation: Bogatov N.A., Molkov A.A. Retrieval of Wind-Driven Waves in the Atlantic Ocean by Stereo Imagery. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 4, 90–97. doi: 10.7868/S2073667321040080

характеристик объекта с его изображением с разных ракурсов [1, 2]. Являясь основой современного машинного зрения [3–5] в приложении к множеству задач, этот подход успешно применяется и для диагностики ветрового волнения [6–9], а точнее его длинноволновой части. Для разрешения соответствующих волн в изображении должны присутствовать маркеры меньших масштабов, которыми выступают гравитационно-капиллярные и капиллярные волны, проявляющиеся в изображении как наиболее контрастные объекты. Регистрируемый контраст формируется за счет зеркального отражения иного по яркости участка небосвода за счет значительных уклонов короткомасштабных волн по сравнению длинными, а также за счет зависимости коэффициента отражения от угла наклона поверхности. В ряде работ, например [10–14], представлены примеры успешного восстановления спектров ветровых волн с длинами порядка десятка сантиметров. Вместе с тем более мелкомасштабных естественных маркеров на водной поверхности нет, что вынуждает исследователей для восстановления спектральных характеристик капиллярного волнения применять подходы, основанные на восстановлении уклонов водной поверхности через характеристики яркости отраженного [15–17] или преломленного [18, 19] водной поверхностью света.

Традиционно стереосъемка ведется с палуб стационарных океанографических платформ или прибрежных сооружений с помощью двух или более калиброванных камер. Для калибровки стереосистемы, как правило, применяют разлинованный под шахматную доску экран, съемку которого проводят под разными ракурсами каждой камерой. Задача калибровки заключается в устранении дисторсии объективов и коррекции неточностей позиционирования одной камеры относительно другой. От качества калибровки камер напрямую зависит точность восстанавливаемой по стереопарам топографии объекта. Однако важно отметить, что согласно работе [20], лабораторная калибровка не всегда является залогом успешного применения стереофотограмметрического метода в натурных условиях. С одной стороны, трудно перенести из лаборатории на судно базу с нетронутой геометрией камер относительно друг друга. С другой стороны, трудно учесть вибрации от двигательных установок и генераторов, передающиеся на свободные элементы конструкций (рейлинги, поручни, мачтовые конструкции и т.д.), где обычно крепится стереоаппаратура, а также колебания, связанные с ветровыми порывами и прочее. Один из практически реализованных методов калибровки, использующий для этого только сами стереоизображения без привлечения вспомогательной информации или выполнения дополнительных механических манипуляций, представлен, например, в работе [21].

При отлаженной процедуре восстановления морской поверхности по данным калиброванной стереосистемы, значительный интерес представляет получение данных с близкой точностью с помощью некалиброванных систем, которые могут быть сформированы, например, на базе двух квадрокоптеров или на судах, геометрия верхних палуб которых не позволяет провести калибровку в натурных условиях. Вообще потенциал дистанционной диагностики с регулярных морских рейсов, в том числе на удаленных, но экономических важных маршрутах (например, Северный морской путь), как нам кажется, должен стимулировать развитие судовой стереофотограмметрии морской поверхности и, возможно, ледовых образований [22]. Однако при работе с подвижного раскачивающегося основания меняется область визирования морской поверхности и углы ее наблюдения, что приводит к трудности расчета положения плоскости среднего уровня моря, относительно которого восстанавливается рельеф морской поверхности. Сегодня для решения этой проблемы предложены два подхода: первый с использованием линии горизонта или навигационных судовых данных [23]; второй, самодостаточный, — путем специальной обработки тех же стереопар [21].

Базируясь на процитированных работах и располагая данными судовой стереосъемки в Атлантике, мы решили продолжить исследования возможностей применения некалиброванных стереосистем, размещенных на борту судна, для восстановления спектров ветрового волнения.

2. Методы и подходы

2.1. Регистрация стереоизображений

Стереоизображения, задействованные в настоящей работе, были получены в ходе съемки морской поверхности во время атлантического перехода на научно-исследовательском судне «Академик Вавилов» в 2012 г. Пара синхронизированных фотокамер Nikon D700 с объективами 85 мм (угол зрения 28.5°) размещалась на штативах у носовой кромки пеленгаторной палубы справа по борту на высоте 15.4 м над уровнем моря. Стереобаза (расстояние между камерами) составляла 0.9 м. Камеры были установлены параллельно друг другу и ориентированы под углом 90° к главной оси судна (плоскости борта). Зенитный угол варьировался в зависимости от качки таким образом, чтобы горизонт всегда попадал в поле зрения. Корабельная и отбойная волны в поле зрения отсутствовали.

Стереосъемка осуществлялась по ходу движения судна на скорости 12 узлов при следующих параметрах: частота съемки — 1 кадр/мин, диафрагма — F8 и F9, время экспозиции — 1/1600 и 1/2000 соответственно, ISO 800, разрешение изображения — 4256×2832 пикселей. Для съемки использовалась некалиброванная стереосистема, при установке которой обязательным условием было попадание уровня горизонта в кадр. Вследствие качки положение визируемого участка поверхности постоянно менялось, что учитывалось при выборе области обработки. В результате был определен участок поверхности размером 32×80 м, на удалении 90 м от борта. Пространственное разрешение, соответствующее одному пикселю на выбранном участке, варьировалось от 0.01×0.05 м при малых дальностях и до 0.03×0.2 м при больших. Метеоусловия в период съемки были изменчивы: от ясного неба до сплошной облачности при скорости ветра от 4 до 12 м/с (скорость ветра регистрировалась с помощью судовой метеостанции). Для восстановления рельефа водной поверхности были отобраны три серии стереопар, соответствующих трем скоростям ветра 4.9 м/с, 6 м/с и 11.6 м/с.

2.2. Обработка данных

Аналитическая связь между направлениями визирования водной поверхности с соответствующими пикселями на изображении определялась общепринятой моделью камеры-обскуры [24]. Это модель идеальной камеры, которая не учитывает дисторсию объектива. Для аккуратного описания реальной камеры такой учет необходим. Мы исправили дисторсию объектива путем применения фирменного калибровочного профиля объектива и камеры, что с учетом фокусного расстояния объектива в 85 мм дало хороший результат без применения стандартного процесса внутренней калибровки. Ввиду отсутствия процесса внешней калибровки (калибровки, связанной с определением внешних (extrinsic) параметров) стереосистем, мы не располагали информацией о точном положении камер с учетом возможных неточностей позиционирования. Поэтому следующим шагом была процедура ректификации изображений для некалиброванных систем. Для этого на каждой паре стереоизображений с использованием корреляционной функции изображений производился поиск особых точек (соответствующих одному и тому же объекту, сфотографированному с разных ракурсов), и осуществлялось их сопоставление. На основе набора пар особых точек с лучшим совпадением рассчитывалась фундаментальная матрица, которая описывает связь соответствующих точек на стереопарах. После ее определения проводился процесс ректификации изображений, т.е. перенос обоих пар стереоизображений в единую плоскость так, чтобы эпиполярные линии были параллельны горизонтальной оси (рис. 1). На ректифицированных изображениях осуществляется поиск точек совпадения в стереопарах. Для каждого i -го элемента изображения с координатами (p_{xi}, p_{yi}) в заданной строке в левом изображении выполнялся поиск элемента в той же строке правого изображения. В этом случае координаты искомого элемента имеют вид $(p_{xi} - d, p_{yi})$, где d — величина смещения. Последняя величина вычислялась путем поиска максимума функции отклика, а именно корреляционной функции яркости изображения. Характерный размер элемента изображения составлял 19 точек. По окончании этой процедуры формировалась карта смещений, где каждому пикселю соответствовало свое смещение d . Далее, используя связь $Z = fb/d$, рассчитывалась карта глубин (расстояний до элементов морской поверхности Z), где f — фокусное расстояние, b — стереобаза. Восстановленный рельеф пересчитывался на уровень горизонтальной плоскости, соответствующей среднему уровню моря, исходя из геометрии визирования и положения горизонта. Заключительным шагом для удобства представления результатов и последующего расчета спектров волнения осуществлялся переход к регулярной координатной сетке. Все перечисленные шаги были реализованы с помощью открытых кодов OpenCV [25] и Mathworks Computer Vision Toolbox [26].

Восстановленные случайные реализации поля возвышений морской поверхности использовались для расчета спектров возвышений посредством Фурье-преобразования от корреляционной функции возвышений.

3. Результаты

В качестве примера рабочего материала на рис. 1 представлена стереопара изображений морской поверхности при ветре 4.9 м/с. Соответствующая ей карта смещений в цветовой маске приведена на рис. 2. Здесь красный и зеленый цвета соответствуют гребням волн, синий и фиолетовый — впадинам. Стоит отметить, что при небольших амплитудах волн, когда отсутствует эффект затенения, отсутствуют проблемные участки при расчете карты смещений. Для случая волн больших амплитуд приходилось использовать дополнительную фильтрацию проблемных мест на карте смещений. Результат восстановления рельефа изображен на рис. 3, а, где ось абсцисс сонаправлена с судном, ось ординат направлена от судна в сторону

горизонта. Для сравнения на рис. 3, б, в представлены результаты восстановления рельефа морской поверхности для двух других ветров 6 и 11.6 м/с. В последнем случае отчетливо видно, что длина энергонесущей волны составляет примерно 40 м, а амплитуда — 1.5 м.



Рис. 1. Ректифицированная стереопара изображений морской поверхности при ветре 4.9 м/с (ось x сонаправлена с бортом судна, ось y направлена к горизонту перпендикулярно борту судна, ось z — вверх).

Fig. 1. Rectified Stereo pair of images of the sea surface at 4.9 m/s wind (x -axis is aligned with the side of the vessel, y -axis is directed to the horizon perpendicular to the side of the vessel, z -axis is up).

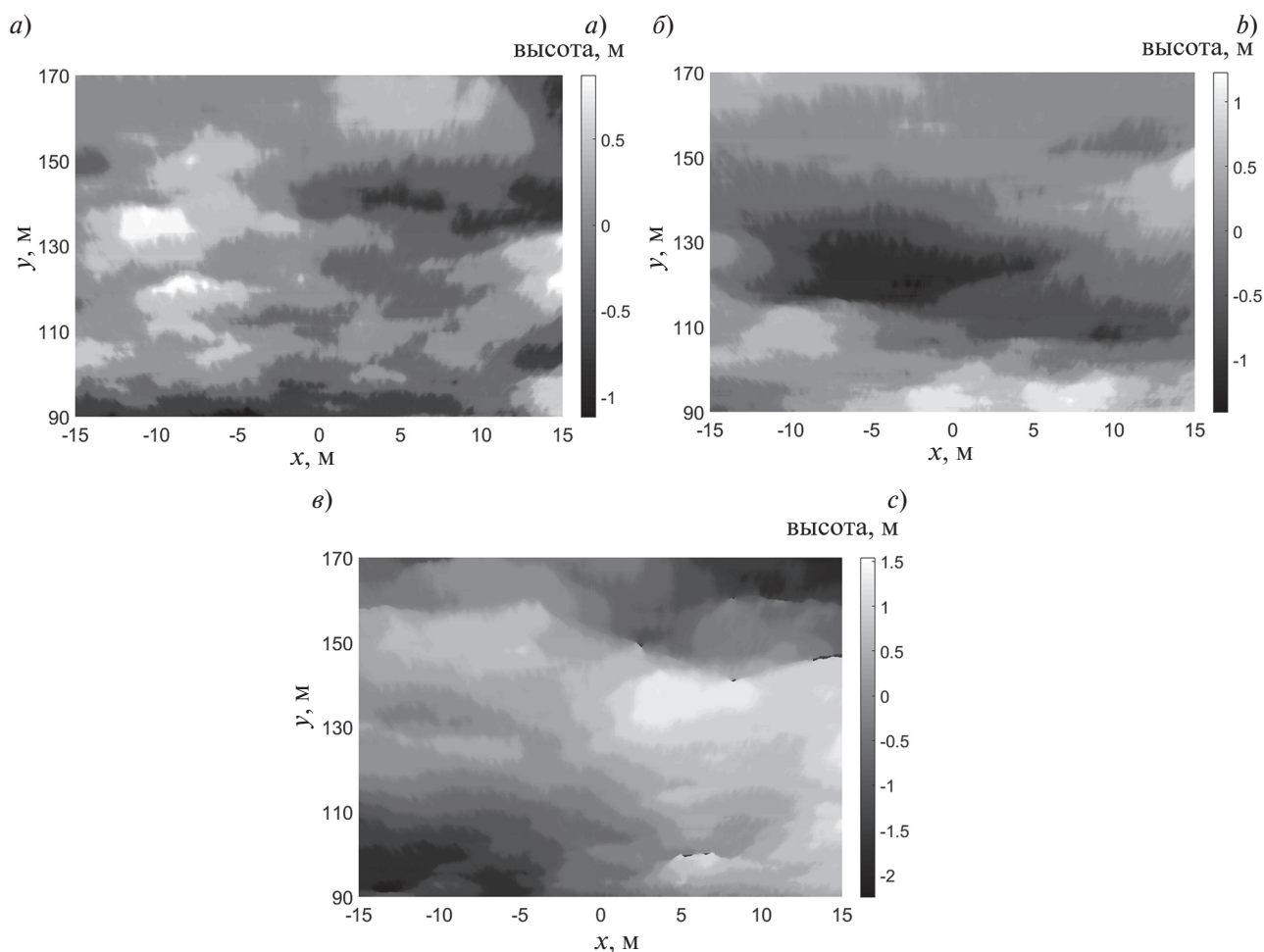


Рис. 3. Восстановленный по стереоизображениям рельеф морской поверхности для скоростей ветра: 4.9 м/с (а), 6 м/с (б) и 11.6 м/с (в).

Fig. 3. The sea surface relief reconstructed from stereo images for wind speeds of 4.9 m/s (a), 6 m/s (b) and 11.6 m/s (c).

Примеры восстановления двумерных спектров волнения для трех рассматриваемых скоростей ветра приведены на рис. 4, а одномерные — на рис. 5. Двумерные спектры представлены в линейном масштабе. Из них видно, что при ветрах 11.6 и 6 м/с четко выделяется направление длинной волна, распространяющейся в направлении от судна под небольшим углом к нему, в то время как при ветре 4.9 м/с проявляются более короткие волны с различными направлениями. Полученные спектры близки к спектрам аналогичных судовых измерений [7], полученным при схожей геометрии и параметрах стереосистемы, однако уступают результатам, например, [14], полученным при зондировании поверхности со стационарной платформы под углом порядка 45° стереосистемой с базой 2.5 м. Именно большая база при прочих схожих параметрах позволила авторам [14] достичь большего разрешения по дальности, и, как результат, детальнее восстановить структуру волнения, чего не хватило нам.

Перейдем к анализу одномерных, всенаправленных спектров. Для сравнения на рис. 5 представлены результаты расчета модельного спектра Эльфохейли [27] при бесконечном разгоне. Обоснованием такого сравнения является соответствие районов проведения измерений открытому океану, а ветро-волновые условия были довольно стабильны в момент проведения измерений и вблизи него. Как видно, при слабых ветрах (4.9 м/с и 6 м/с) на интервале волновых чисел от 1 рад/м (длина волны порядка 6 м) до 20 рад/м (длина волны порядка 30 см) между модельным и восстановленным спектрами наблюдается хорошее соответствие. Причина расхождения данных для сильных ветров может заключаться в длине волны соизмеримой с областью наблюдения и наличием эффекта затенения волны, который корректировался регулярными методами интерполяции.

4. Заключение

В работе представлены предварительные результаты восстановления спектров развитого ветрового волнения с помощью некалиброванной стереосистемы с борта движущегося судна. Нам удалось восстановить спектры возвышений развитого ветрового волнения в диапазоне 0.1–20 рад/м, типичном для стереосъемки морской поверхности. Исключая область спектральных пиков, восстановленные спектры при умеренных ветрах хорошо согласуются с модельным спектром Эльфохейли для развитого волнения, характерного для района измерений. При ветре 11.6 м/с наблюдаемая длина волны соизмерима с размерами области визирования, что приводит к погрешности определения среднего уровня моря и расчета спектра. Для более точного определения параметров волнения необходимо увеличить рабочую область стереосистемы и базу между камерами. Применение более широкоугольной оптики приведет к необходимости калибровать каждую камеру, но, в отличие от калибровки стереосистем данную процедуру необходимо выполнить один раз для каждой связки камера + объектив на любом этапе работы.

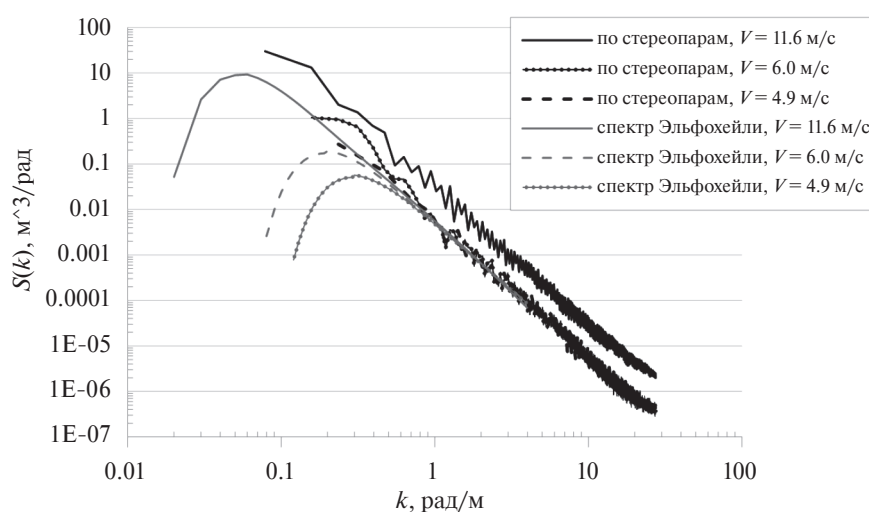


Рис. 5. Пространственный спектр ветрового волнения для трех скоростей ветра (4.9 м/с, 6.0 м/с и 11.6 м/с) в сравнении с модельным спектром Эльфохейли.

Fig. 5. Omnidirectional spatial spectrum of wind-driven waves for three wind speeds (4.9 m/s, 6.0 m/s and 11.6 m/s) in comparison with the Elfouhaily spectrum.

Рассмотренную проблему в будущем можно устранить за счет применения гиростабилизированных платформ с одной «зажатой» степенью свободы, отвечающей за вращение по азимутальному углу. Остальные две степени свободы смогут компенсировать крен и качку (как продольную, так и бортовую).

Представленные результаты подтверждают возможность применения некалиброванных систем. Идея их использования на базе, например, двух квадрокоптеров или маломерного флота, где конструкция надстройки затрудняет проведение предварительной калибровки, все чаще находит реализацию в прикладных исследованиях. Этот тренд, вероятно, будет стимулировать дальнейшее развитие алгоритмов получения данных некалиброванными системами с точностью не хуже, чем у калиброванных систем.

5. Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 20–77–10081.

Литература

1. *Schumacher A., Defant A.* Stereophotogrammetrische wellenaufnahmen, Volume 7. W. de Gruyter: Hamburg, Germany, 1939. 86 p.
2. *Лобанов А.Н.* Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.
3. *Hartley R., Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, 2004. 700 p. doi: 10.1017/CBO9780511811685
4. *Shapiro L.G., Stockman G.C.* Computer Vision. 3-ed edition. Prentice Hall: New Jersey, 2015. 763 p.
5. *Prince S.J.D.* Computer vision: models, learning, and inference. Cambridge University Press, 2012. 600 p.
6. *Holthuijsen L.H.* Observations of the directional distribution of ocean wave energy // J Phys Oceanogr. 1983. V. 13. P. 816–827. doi: 10.1175/1520–0485(1983)013<0191: OOTDDO>2.0.CO;2
7. *Barstow S.F., Bidlot J.-R., Caires S., Donelan M.A., Drennan W.M.* et al. Measuring and analysing the directional spectrum of ocean waves. COST 714. COST Office, 2005. 465 p.
8. *Benetazzo A., Fedele F., Gallego G., Shih P.-C., Yezzi A.* Offshore stereo measurements of gravity waves // Coast Eng. 2012. V. 64. P. 127–138. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.01.007
9. *Guimaraes P.V., Ardhuin F., Bergamasco F., Leckler F., Filipot J.-F., Shim J.-S., Dulov V., Benetazzo A.* A data set of sea surface stereo images to resolve space-time wave fields // Sci Data. 2020. V. 7. P. 145. doi: 10.1038/s41597–020–0492–9
10. *Shemdin O.H., Tran H.M., Wu S.C.* Directional measurements of short ocean waves with stereography // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 13891–13901.
11. *Banner M.L., Jones S.F., Trinder J.C.* Wavenumber spectra of short gravity waves // J. Fluid Mech. 1989. V. 198. P. 321–344. doi: 10.1017/S0022112089000157
12. *Shemdin O.H., Tran H.M.* Measuring short surface waves with stereography // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1992. V. 58. P. 311–316.
13. *Benetazzo A.* Measurements of short water waves using stereo matched image sequences // Coastal Engineering. 2006. V. 53, N 12. P. 1013–1032. doi: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.012
14. *Косник М.В., Дулов В.А., Малиновский В.В., Смолов В.Е., Погребной А.Е.* Оценка двумерных пространственных спектров коротких волн с помощью стереофото съемки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 19. С. 401–414.
15. *Косник М.В., Дулов В.А.* Двумерные пространственные спектры коротких ветровых волн в натурных условиях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 21. С. 103–116.
16. *Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N.* Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography // J. Geophys. Res. 2013. V. 118, N 9. P. 4380–4394.
17. *Баханов В.В., Демакова А.А., Кориненко А.Е., Рябкова М.С., Титов В.И.* Оценка спектров ветровых волн с длинами волн от сантиметров до метра по изображениям поверхности моря // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 192–205. doi: 10.22449/0233–7584–2018–3–192–205
18. *Jähne B., Schmidt M., Rocholz R.* Combined optical slope/height measurements of short wind waves: principle and calibration // Measurement Science and Technology. 2005. V. 16, N10. P. 1937–1944. doi: 10.1088/0957–0233/16/10/008
19. *Мольков А.А., Долин Л.С.* Определение характеристик ветрового волнения по подводному изображению морской поверхности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 617–630.
20. *Jähne B., Klink J., Waas S.* Imaging of short ocean wind waves: a critical theoretical review // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. 11. P. 2197–2209. doi: 10.1364/JOSAA.11.002197

21. Campbell A.J., Bechle A.J., Wu C.H. Observations of surface waves interacting with ice using stereoimaging // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2014. V. 119. P. 3266–3284. doi: 10.1002/2014JC009894
22. Guimarães P.V., Ardhuin F., Sutherland P., Accensi M., Hamon M., Pérignon Y., Thomson J., Benetazzo A., Ferrant P. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave–current interaction studies // *Ocean Sci.* 2018. V. 14. P. 1449–1460. doi: 10.5194/os-14-1449-2018
23. Benetazzo A., Barbariol F., Bergamasco F., Torsello A., Carniela S., Sclavo M.A. Stereo wave imaging from moving vessels: Practical use and applications // *Coast. Eng.* 2016. V. 109. P. 114–127. doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.12.008
24. Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Shankar Sastry S. An invitation to 3-D vision: from images to geometric models. Springer-Verlag New York, 2004. doi: 10.1111/j.0031-868x.2004.295_2.x
25. Open Source Computer Vision Library (OpenCV) URL: <http://opencv.org/> (дата обращения: 24.04.2021).
26. MathWorks Computer Vision Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html> (дата обращения: 24.04.2021).
27. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N 15. P. 781–796.

References

1. Schumacher A., Defant A. Stereophotogrammetrische Wellenaufnahmen, Volume 7. W. de Gruyter: Hamburg, Germany, 1939, 86 p.
2. Lobanov A.N. Fotogrammetriya. Moscow, Nedra, 1984, 552 p. (in Russian).
3. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2004, 700 p. doi: 10.1017/CBO9780511811685
4. Shapiro L.G., Stockman G.C. Computer Vision. 3-ed edition. Prentice Hall, New Jersey, 2015, 763 p.
5. Prince S.J.D. Computer Vision: Models, Learning, and Inference. Cambridge University Press, 2012, 600 p.
6. Holthuijsen L.H. Observations of the directional distribution of ocean wave energy. *J. Phys. Oceanogr.* 1983, 13, 816–827. doi: 10.1175/1520-0485(1983)013<0191:OOTDDO>2.0.CO;2
7. Barstow S.F., Bidlot J.-R., Caires S., Donelan M.A., Drennan W.M. et al. Measuring and analysing the directional spectrum of ocean waves. COST 714. COST Office, 2005. 465 p.
8. Benetazzo A., Fedele F., Gallego G., Shih P.-C., Yezzi A. Offshore stereo measurements of gravity waves. *Coast. Eng.* 2012, 64, 127–138. doi: 10.1016/j.coastaleng.2012.01.007
9. Guimaraes P.V., Ardhuin F., Bergamasco F., Leckler F., Filipot J.-F., Shim J.-S., Dulov V., Benetazzo A. A data set of sea surface stereo images to resolve space-time wave fields. *Sci. Data*. 2020, 7, 145. doi: 10.1038/s41597-020-0492-9
10. Shemdin O.H., Tran H.M., Wu S.C. Directional measurements of short ocean waves with stereography. *J. Geophys. Res.* 1988, 93, 13891–13901.
11. Banner M.L., Jones S.F., Trinder J.C. Wavenumber spectra of short gravity waves. *J. Fluid. Mech.* 1989, 198, 321–344. doi: 10.1017/S00222112089000157
12. Shemdin O.H., Tran H.M. Measuring short surface waves with stereography. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1992, 58, 311–316.
13. Benetazzo A. Measurements of short water waves using stereo matched image sequences. *Coastal Engineering*. 2006, 53(12), 1013–1032. doi: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.012
14. Kosnik M.V., Dulov V.A., Malinovskij V.V., Smolov V.E., Pogrebnoj A.E. Estimation of two-dimensional spatial spectra of short waves using stereo photography. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoj i Shel'fovoj Zon i Kompleksnoe Ispol'zovaniye Resursov Shel'fa*. 2009, 19, 401–414 (in Russian).
15. Kosnik M.V., Dulov V.A. Two-dimensional spatial spectra of short wind waves in natural conditions. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoj i Shel'fovoj Zon i Kompleksnoe Ispol'zovaniye Resursov Shel'fa*. 2010, 21, 103–116.
16. Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Chapron B., Kudryavtsev V.N. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography. *J. Geophys. Res.* 2013, 118 (9), 4380–4394. doi: 10.1002/jgrc.20296
17. Bakhanov V.V., Demakova A.A., Korinenko A.E., Ryabkova M.S., Titov V.I. Estimation of the wind wave spectra with centimeters-to-meter lengths by the sea surface images. *Phys. Oceanogr.* 2018, 25(3), 177–190. doi: 10.22449/1573-160X-2018-3-177-190
18. Jähne B., Schmidt M., Rocholz R. Combined optical slope/height measurements of short wind waves: principle and calibration. *Measurement Science and Technology*. 2005, 16 (10), 1937–1944. doi: 10.1088/0957-0233/16/10/008
19. Molkov A.A., Dolin L.S. Determination of wind roughness characteristics based on an underwater image of the sea surface. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48, 552–564.
20. Jähne B., Klink J., Waas S. Imaging of short ocean wind waves: a critical theoretical review. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1994, 11, 2197–2209. doi: 10.1364/JOSAA.11.002197

21. Campbell A.J., Bechle A.J., Wu C.H. Observations of surfacewaves interacting with ice using stereoimaging. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2014, 119, 3266–3284. doi: 10.1002/2014JC009894
22. Guimarães P.V., Ardhuin F., Sutherland P., Accensi M., Hamon M., Pérignon Y., Thomson J., Benetazzo A., Ferrant P. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave–current interaction studies. *Ocean Sci*. 2018, 14, 1449–1460. doi: 10.5194/os-14-1449-2018
23. Benetazzo A., Barbariol F., Bergamasco F., Torsello A., Carniela S., Sclavo M.A. Stereo wave imaging from moving vessels: Practical use and applications. *Coast. Eng.* 2016, 109, 114–127. doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.12.008
24. Ma Y., Soatto S., Kosecka J., Shankar Sastry S. An invitation to 3-D vision: from images to geometric models. *Springer-Verlag New York*, 2004. doi: 10.1111/j.0031-868x.2004.295_2.x
25. Open Source Computer Vision Library (OpenCV) URL: <http://opencv.org/> (date of access: 24.04.2021).
26. MathWorks Computer Vision Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/computer-vision.html> (date of access: 24.04.2021).
27. Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves. *J. Geophys. Res.* 1997, 102 (15), 781–796.

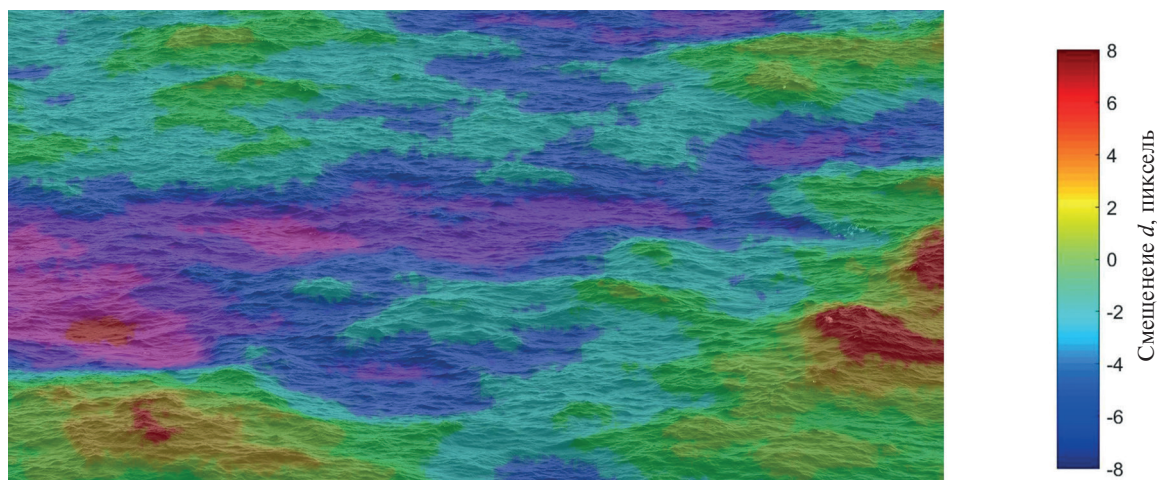


Рис. 2. Карта смещения для стереопары из предыдущего рисунка.

Fig. 2. Disparity map for stereopair from the previous figure.

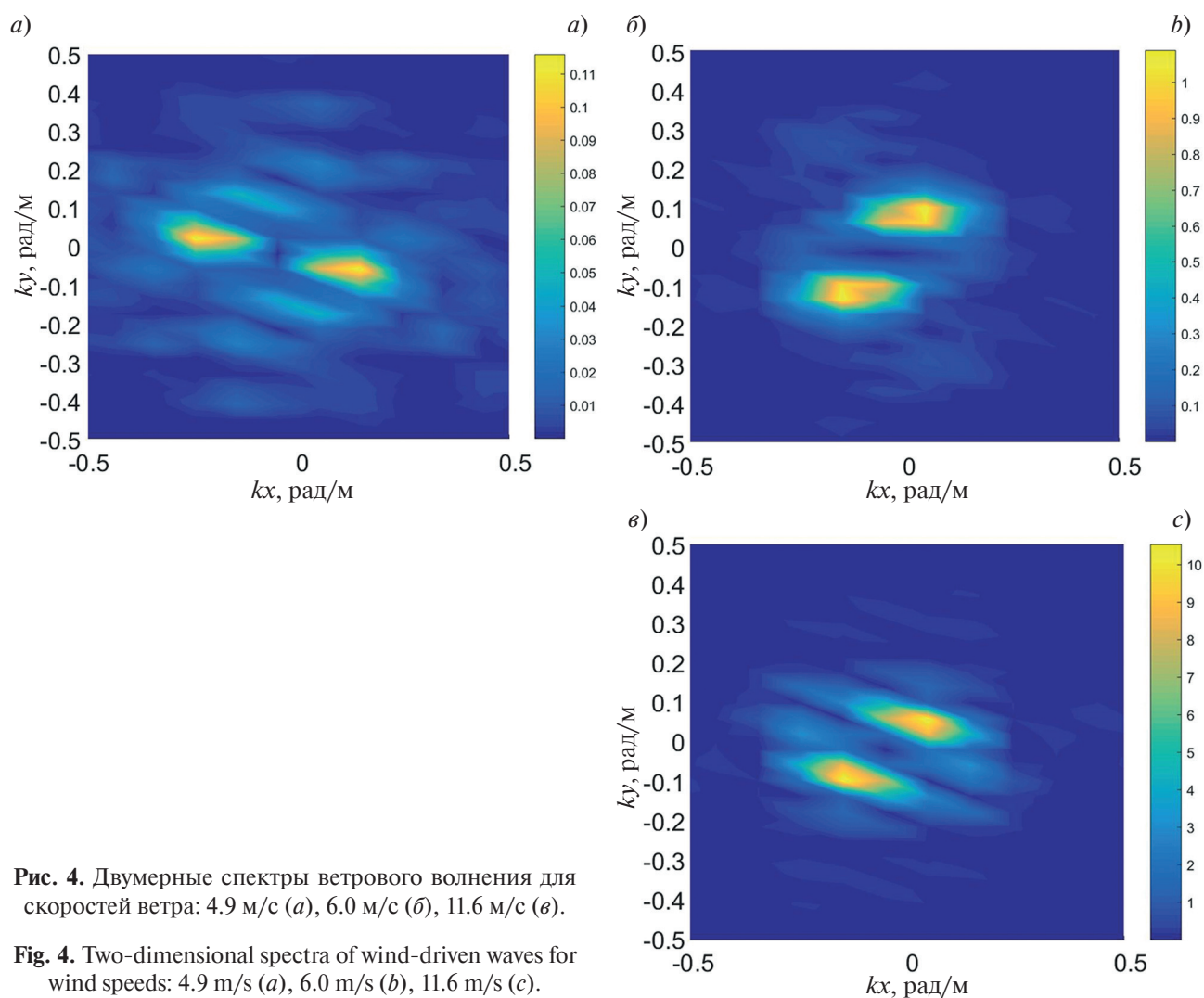


Рис. 4. Двумерные спектры ветрового волнения для скоростей ветра: 4.9 м/с (а), 6.0 м/с (б), 11.6 м/с (в).

Fig. 4. Two-dimensional spectra of wind-driven waves for wind speeds: 4.9 m/s (a), 6.0 m/s (b), 11.6 m/s (c).