

Наилучшие результаты сравнения как модуля, так и направления ветра следует ожидать при использовании данных измерений, значительно удаленных от берега (от 20 км). Именно таким условиям удовлетворяют измерения, проводимые в настоящее время на морских стационарных газодобывающих платформах, расположенных в Каркинитском заливе. Анализ этих измерений планируется провести в следующих работах.

Список литературы

1. Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование / Д.А. Яровая, В.В. Ефимов, М.В. Шокуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. — 2008. — № 3. — С. 41–55.
2. Температурные контрасты суша–море в Черноморском регионе и их связь с изменчивостью приводного ветра / А.А. Кубряков, М.В. Шокуров, С.В. Станичный, А.Е. Анисимов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 50. — С. 3–16.
3. Толокнов Ю.Н. Система сбора гидрометеорологической информации / Ю.Н. Толокнов, А.И. Коровушкин // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. — Вып. 10. — С. 50–53.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 751 с.
5. Соловьев Ю.П. Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем / Ю.П. Соловьев, В.А. Иванов // Морской гидрофизический журнал. — 2007. — № 3. — С. 42–61.
6. Ricciardulli L. Reprocessed QuikSCAT (V04) Wind Vectors With Ku-2011 Geophysical Model Function / L. Ricciardulli, F.J. Wentz: Report # 043011, Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA, 2011. — 8 p.
7. Jaruwatanadilok S. Cross calibration between QuikSCAT and OceanSAT-2 / S. Jaruwatanadilok, B.W. Stiles, A.G. Fore // Submitted to IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2013.
8. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5.n / J.A. Verspeek, A. Stoffelen, M. Portabella [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 48, 1. — P. 386–395, doi:10.1109/TGRS.2009.2027896.

УДК 551.465.5 + 551.466

ПОДСПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АСИММЕТРИИ УКЛОНОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ГРАВИТАЦИОННОГО ДИАПАЗОНА

Д.С. Сазонов, младший научный сотрудник, аспирант Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва

В.А. Дулов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины, г. Севастополь

И.Н. Садовский, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИКИ РАН, г. Москва

Е.В. Чечина, ведущий инженер МГИ НАН Украины, г. Севастополь

А.В. Кузьмин, заведующий лабораторией ИКИ РАН, г. Москва



Д.С. Сазонов



В.А. Дулов



И.Н. Садовский



Е.В. Чечина



А.В. Кузьмин

Представлена методика подспутниковых измерений статистических характеристик уклонов морской поверхности в различных диапазонах длин волн, основанная на использовании решеток струнных волнографов. Показано, что результаты измерений вектора уклона морской поверхности, выполненных на подспутниковом полигоне МГИ НАН Украины “Кацивели”, согласуются с известными научными представлениями и содержат

новую информацию о статистических характеристиках уклонов. Получены и обсуждены натурные данные о коэффициенте асимметрии уклонов в различных диапазонах длин волн для скоростей ветра от 2 до 13 м/с.

The method of sub-satellite measurements of statistical characteristics of the sea surface slopes in various ranges of wavelengths is presented. It is shown that the results

of measurements of the sea surface slope vectors made on the MHI NASU sub-satellite testing site “Katsiveli” are consistent with the known scientific knowledge and provide new information on the statistical characteristics of the sea surface slopes. Field data on the coefficient of slope asymmetry in various ranges of wavelengths for wind speeds from 2 up to 13 m/s are obtained and discussed.

Морской подспутниковый полигон “Кацивели” существует более 30 лет на базе Экспериментального отделения Морского гидрофизического института НАН Украины. Центральным элементом полигона является Стационарная океанографическая платформа, расположенная в полукилометре от берега, где глубина моря около 30 м. В наше время перспективы возобновления подспутниковых измерений на полигоне обсуждались в ряде статей (см., например, [1]). Крупный украинско-российский научно-технологический проект “Мониторинговые исследования состояния прибрежной экосистемы при использовании Черноморского экспериментального подспутникового полигона (Полигон, 2012–2013)” имел одной из основных целей совершенствование и разработку новых методик подспутниковых измерений. Данная статья представляет одну из возможностей выполнения подспутниковых измерений нового типа, востребованных как для мониторинга поверхности моря из космоса, так и для исследований процессов формирования ветровых волн.

Асимметрия распределения уклонов морской поверхности, обнаруженная в пионерской работе Кокса и Манка [2] (КМ), свидетельствует, прежде всего, о нелинейных взаимодействиях между волнами. Лонге-Хиггинс [3], выполнив анализ возможных механизмов нарушения симметрии, заключил, что доминирующий вклад в асимметрию уклонов дает модуляция коротких волн длинными. Однако оценки, сделанные в работе [4], показали, что укрупнения волн перед их обрушением также могут объяснить данные КМ. По-видимому, при различных состояниях поверхности моря или различных скоростях ветра доминирующий вклад в асимметрию уклонов могут давать различные механизмы. С другой стороны, сигналы практически всех приборов, работающих сегодня на спутниках над океаном, зависят от статистических характеристик геометрии морской поверхности. Для сигналов радиолокаторов эти характеристики являются определяющими. Учет высших моментов распределения уклонов в моделях радиолокационного рассеяния морской поверхностью является насущной задачей в развитии спутникового мониторинга океана [4–7]. Таким образом, асимметрия уклонов морской поверхности оказывается информативным параметром, важным как для верификации физических моделей, так и для дистанционного мониторинга поверхности моря.

Данные КМ описывают “интегральную” асимметрию уклонов, относящуюся к волнам всех длин. Однако интересно изучать асимметрию уклонов

в различных диапазонах длин волн с целью извлечения полезной информации о нелинейных процессах и их механизмах для конкретного диапазона. Это можно сделать, определяя уклон морской поверхности по разности возвышений в двух точках, где размещены датчики [8]. При этом подавляются вклады от наиболее коротких волн, так что измерения охватывают диапазон волн с длинами, большими определенного масштаба. Чем больше база установки (расстояние между датчиками), тем больше граничная длина волны исследуемого диапазона. Применение трех датчиков дает не только величину уклона, но и азимут, на котором уклон максимален. Иными словами, дает вектор уклона $(\partial\zeta / \partial x, \partial\zeta / \partial y)$, где ζ – возвышение поверхности [9]. Такие измерения были выполнены с самолета с помощью трех лазерных альтиметров, с базой около метра [6]. В результате были получены обнадеживающие результаты, несмотря на специфические трудности, связанные с вариациями ориентации лучей при самолетных измерениях.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день существует ряд методов исследования геометрии морской поверхности в натуральных условиях (см. обзор в [7]), а наиболее детальное описание статистических свойств поверхности может быть получено с помощью стереофотографий с высоким пространственным разрешением [7]. Однако стереофотосъемка требует специальных условий освещения, достигаемых в наших широтах в полуденные часы при безоблачном небе. Поскольку подспутниковые измерения необходимо выполнять именно в момент пролета спутника (зачастую, в утренние и вечерние часы), нужен более надежный подход. Поэтому ниже представлена методика проведения подспутниковых измерений статистических характеристик уклонов морской поверхности в различных диапазонах длин волн, основанная на использовании неподвижных решеток струнных волнографов. Цель сообщения – показать, что результаты измерений вектора уклона, полученные нами с платформы в Кацивели, согласуются с известными научными представлениями и содержат новую информацию о статистических характеристиках уклонов, включая их асимметрию.

Измерения уклонов морской поверхности в различных диапазонах длин волн были выполнены в рамках совместных работ МГИ НАН Украины и ИКИ РАН в 2007 и 2009 гг. Регистрация волнения проводилась одновременно двумя волнографическими решетками. Первая из них была специально разработана в ИКИ РАН и представляла собой пять струнных волнографов, один из них был помещен в вершину прямого угла, а по 2 датчика – на стороны угла на расстояниях 5 и 15 см от вершины [1]. Во второй решетке из шести струнных волнографов, традиционно используемой при волнографических исследо-

ваниях МГИ [7, 10], датчики были расположены в вершинах и центре правильного пятиугольника с внешним радиусом 25 см. Запись волнограмм выполнялась с частотой 10 Гц. Процедуры расчета уклонов и контроля качества волнографических данных детально описаны в работе [10]. Скорость и направление ветра регистрировались с платформы на нескольких уровнях (от 4 до 21 м), а в данной статье использована скорость ветра, приведенная к стандартному горизонту 10 м.

Система из двух решеток позволяет выполнять одновременные измерения в четырех диапазонах длин волн, которые далее будем обозначать их номерами: 1 – задействованы 3 датчика решетки ИКИ, расположенные в вершине прямого угла и по его сторонам на расстоянии 5 см от вершины; 2 – та же конфигурация из трех датчиков, но использованы датчики на расстоянии 15 см от вершины; 3 – задействован центральный датчик решетки МГИ и два смежных периферийных датчика; 4 – задействованы все датчики решетки МГИ. Соответствующие базы измерительных систем равнялись 5, 15, 25 и 50 см. Результаты для третьего диапазона получены объединением данных по возможным пяти комбинациям датчиков. Вектор уклона для четвертого диапазона получен методом наименьших квадратов путем построения плоскости, приближающей шесть возвышений поверхности на всех датчиках решетки.

Чтобы конкретизировать исследуемые диапазоны волн, рассмотрим передаточные функции измерительных систем $T(\lambda)$, где λ – длина волны. Определим $T(\lambda)$ как отношение измеряемого модуля уклона к модулю уклона гармонической волны, падающей на установку. Передаточная функция для диапазона, полученная прямым компьютерным моделированием, показана на

рис. 1. В общем случае она зависит от направления распространения волны (рис. 1а). Для диапазона 3 эта зависимость выражена в меньшей степени, а для диапазона 4 она практически исчезает. На рис. 1б приведена передаточная функция, усредненная по направлениям волн. Выбирая для T предельный уровень $1/\sqrt{2}$ (показанный на рис. 1б прерывистой линией), получим, что 0,1 м является границей диапазона волн, регистрируемых установкой без существенного подавления. Аналогичные рассуждения дают граничные длины волн для других диапазонов: 2...0,29 м, 3...0,5 м и 4...0,97 м.

В результате измерений были получены двумерные плотности распределения векторов уклона $p(\zeta_x, \zeta_y)$ для четырех диапазонов волн при различных скоростях ветра. Полученные азимутальные распределения уклонов соответствуют традиционным представлениям, а именно, дисперсия уклонов в заданном направлении имеет максимум на азимуте, близком к направлению ветра, и минимум в перпендикулярном направлении [9, 2]. Эти направления были выбраны в качестве главных осей распределения [9]. Далее будем использовать обозначения, введенные КМ. Координату в направлении на максимум будем обозначать через y , а в перпендикулярном направлении – через x . Рассмотрим следующие характеристики распределений: дисперсию уклонов в направлении ветра $\sigma_u^2 = \int \zeta_y^2 p(\zeta_x, \zeta_y) d\zeta_x d\zeta_y$, дисперсию уклонов в направлении, перпендикулярном ветру, $\sigma_c^2 = \int \zeta_x^2 p(\zeta_x, \zeta_y) d\zeta_x d\zeta_y$ и коэффициент асимметрии уклонов $c_{03} = \int \zeta_y^3 p(\zeta_x, \zeta_y) d\zeta_x d\zeta_y / \sigma_u^3$. Эти величины мы вычислили по двадцатиминутным отрезкам записей.

На рис. 2 приведены зависимости полной дисперсии уклонов $\sigma^2 = \sigma_u^2 + \sigma_c^2$ и отношения $\gamma = (\sigma_c / \sigma_u)^2$

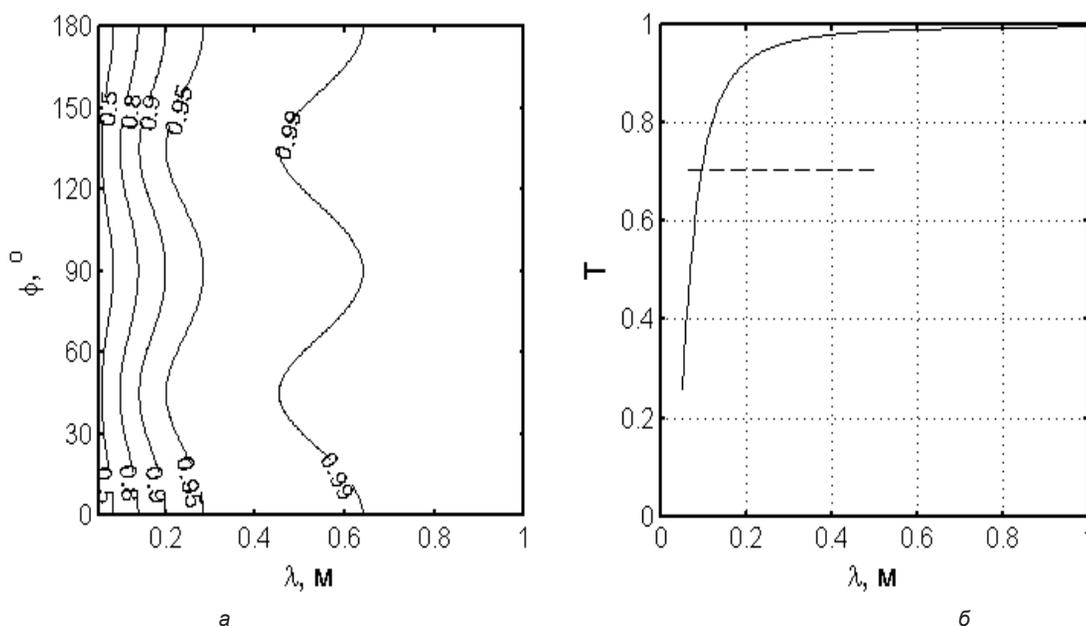


Рис. 1. Передаточная функция для диапазона 1: а – зависимость от длины и направления распространения волны; б – усредненная по направлениям передаточная функция

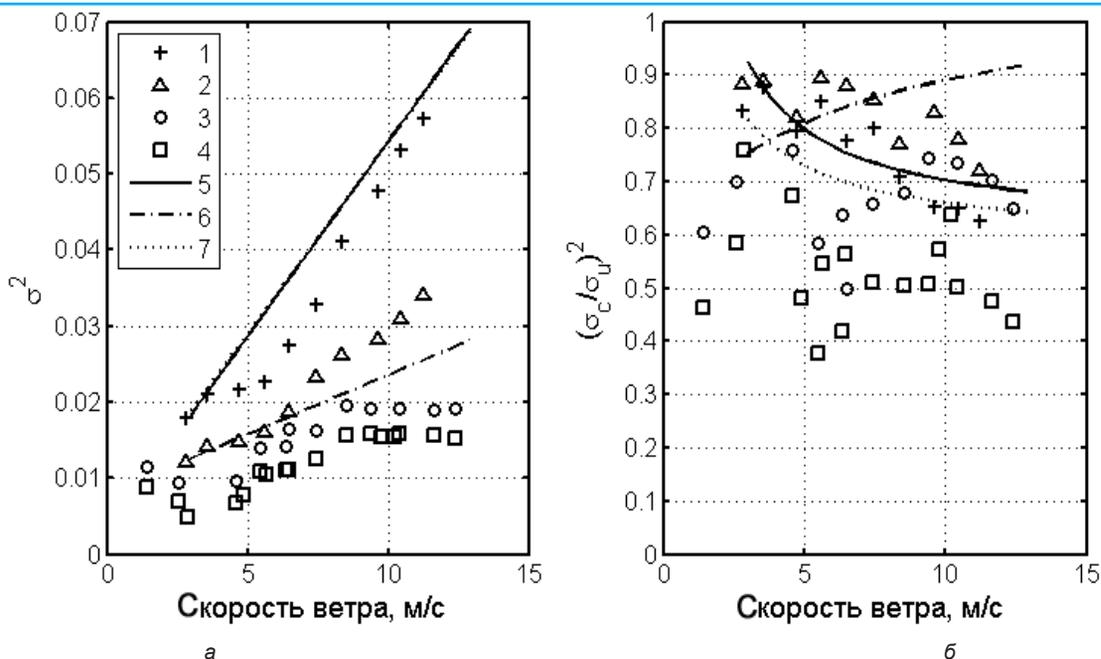


Рис. 2. Характеристики уклонов морской поверхности в зависимости от скорости ветра: а – полная дисперсия уклонов; б – отношение дисперсий в направлениях перпендикулярно ветру и вдоль ветра

от скорости ветра для исследуемых диапазонов волн. На рисунке символы – экспериментальные точки, линии – литературные данные. В легенде, относящейся к обеим вкладкам, 1...4 – диапазоны измерений, 5 – чистое море [2], 6 – чистое море [11], 7 – слик [2]. Средние относительные стандартные ошибки измеренных σ^2 и γ составляют 12 и 24 %. КМ получили зависимость характеристик уклонов от скорости ветра для двух случаев – чистого моря и слика (моря, покрытого искусственной пленкой). В недавней работе [11] исследование КМ для чистого моря было повторено на основе гораздо более обширного массива спутниковых данных. Эти результаты также показаны на графиках.

При штилевом состоянии моря, когда скорость ветра ниже 3 м/с, сильный вклад в уклоны поверхности дают волны зыби, не связанные с локальной скоростью ветра. Поэтому в области малых ветров на графиках не наблюдается закономерностей. На рис. 2а величины σ^2 для диапазона 1, включающего наиболее короткие волны, соответствуют результатам КМ для чистого моря, хотя большинство точек лежит несколько ниже. Это отражает тот факт, что диапазон 1, в отличие от данных КМ, не охватывает короткие волны с длинами меньше 10 см. Данные для других диапазонов закономерно лежат ниже зависимости Кокса и Манка, сохраняя рост с ростом скорости ветра и монотонно понижаясь с ростом длины волны, ограничивающей диапазон. Ветровая зависимость КМ для слика лежит между группами точек диапазонов 1 и 3 с граничными длинами волн 29 и 50 см. Случай слика аналогичен нашим измерениям в том смысле, что пленка подавляет самые короткие ветровые волны, и вклад в измеряемые характеристики дают лишь волны с длинами, боль-

шими некоторого масштаба. Хотя величина этого масштаба остается не вполне определенной, КМ предполагали, что этот масштаб близок к 30 см [2]. Как следует из рисунка, наши данные подтверждают это предположение.

На рис. 2б ветровая зависимость γ для диапазона 1 соответствует данным КМ и [11], данные для диапазона 2 лежат выше, а для диапазонов 3 и 4 – существенно ниже. Остается неясной причина расхождения наших данных с результатами КМ для слика, однако общий ход зависимости γ от длины волны, ограничивающей диапазон, по-видимому, правилен. Параметр γ характеризует степень анизотропии волнения. Как показано в работе [12], спектр коротких волн с длинами меньше нескольких сантиметров определенно анизотропен, а в дециметровом диапазоне угловое распределение волн существенно шире. При этом спектр метровых и более длинных волн, как известно, явно анизотропен. Немонотонное поведение степени анизотропии спектров волн при изменении длины волны, возможно, объясняет немонотонное поведение γ в зависимости от номера диапазона, которое следует из рис. 2б.

На рис. 3 приведены ветровые зависимости коэффициента асимметрии уклонов c_{03} для различных диапазонов. Обозначения на рис. 3 те же, что и на рис. 2. Средняя относительная стандартная ошибка данных составляет 63 %. Отметим, что эта нелинейная характеристика волн не может быть получена с помощью спектрального анализа волнограмм, поэтому эмпирическая информация об асимметрии волн в натуральных условиях весьма ограничена. КМ для случая слика дают значение $c_{03} = 0,02 \pm 0,05$. На графике эта величина показана серой заливкой, учитывающей погрешность

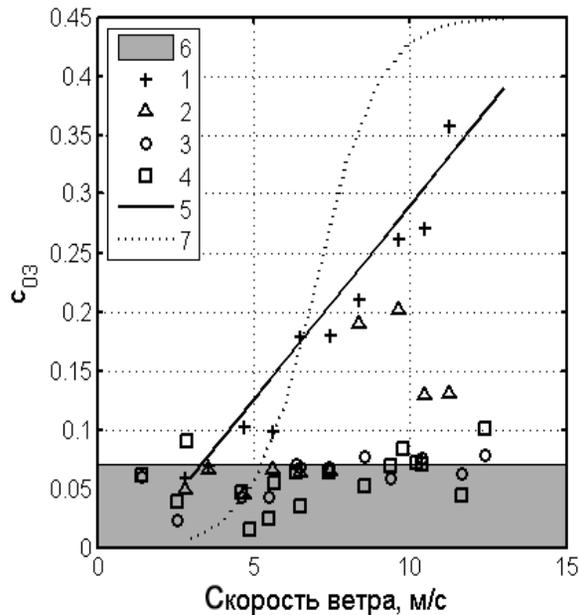


Рис. 3. Коэффициент асимметрии волн в зависимости от скорости ветра

ее определения. Результаты КМ и [11] для чистого моря заметно различаются, демонстрируя степень неопределенности современных представлений об асимметрии уклонов волн.

Данные для первого диапазона хорошо согласуются с результатами КМ. Коэффициент асимметрии уклонов для всех диапазонов растет с ростом скорости ветра и монотонно понижается с увеличением длины волны, ограничивающей диапазон. Данные для третьего и четвертого диапазонов оказываются, главным образом, лежащими в области значений, которые были предложены КМ для случая слика.

Приведенные графики демонстрируют соответствие между полученными результатами и имеющимися представлениями об уклонах ветровых волн. Они также демонстрируют возможности обсуждаемого метода измерений для изучения статистических характеристик уклонов в различных диапазонах длин волн. Особенно важно, что в рамках подхода можно оценивать нелинейные характеристики, такие как коэффициент асимметрии уклонов. Представленная методика может быть использована в подспутниковых полигонных экспериментах.

Работа выполнена в рамках проекта Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации (ДАПНИ) Украины “Полигон-2” (договор № М/281-2013 от 18 июня 2013 г.) при частичной поддержке ДАПНИ Украины по проекту “Короткі хвилі” (№ Ф53.6/051) и Седьмой рамочной программы ЕС по проекту “Coconet” (Grant Agreement № 287844, FP7/2007-2013).

Список литературы

1. Морская гидрографическая платформа “Кацивели” как подспутниковый полигон на Черном море / А.В. Кузьмин, Ю.А. Горячкин, Д.М. Ермаков [и др.] // Исследование Земли из космоса. — 2009. — № 1. — С. 31–44.
2. Cox C. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun’s glitter / C. Cox, W. Munk // J. Opt. Soc. Am. — 1954. — 44 (11). — P. 838–850.
3. Longuet-Higgins M.S. On the skewness of sea surface slopes / M.S. Longuet-Higgins // J. Phys. Oceanogr. — 1982. — 12. — P. 1283–1291.
4. Chapron B. On the skewness of the sea slope probability / B. Chapron, D. Vandemark, T. Elfouhaily // Geophysical Monograph — Gas Transfer at Water Surfaces. — 2002. — 127, AGU. — P. 59–63.
5. Importance of peakedness in sea surface slope measurements and applications / B. Chapron, V. Kerbaol, D. Vandemark, T. Elfouhaily // J. Geophys. Research. — 2000. — Vol. 105, N C7. — P. 17195–17202.
6. Ocean wave slope observations using radar backscatter and laser altimeters / D. Vandemark, B. Chapron, J. Sun [et al.] // J. Phys. Oceanogr. — 2004. — Vol. 34, N 12. — P. 2825–2842.
7. Statistical characterization of short wind waves from stereo images of the sea surface / A.S. Mironov, M.V. Yurovskaya, V.A. Dulov [et al.] // J. Geophys. Research. — 2012. — Vol. 117, N C00J35. — 16 p.
8. Запезалов А.С. Передаточная функция дифференциального волнографа / А.С. Запезалов, Г.Н. Христофоров // Морской гидрофизический журнал. — 1991. — № 2. — С. 14–21.
9. Лонге-Хиггинс М. Статистический анализ случайной движущейся поверхности / М. Лонге-Хиггинс // Ветровые волны: сб. / под ред. Ю.М. Крылова. — М.: ИИЛ, 1962. — С. 125–218.
10. Чечина Е.В. База волнографических данных, полученных со Стационарной океанографической платформы ЭО МГИ НАН Украины. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сб. научн. тр. / Е.В. Чечина. — НАН Украины. МГИ, 2013. — № 27. — С. 215–220.
11. Bréon F.M. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions / F.M. Bréon, N. Henriot // J. Geophys. Research. — 2006. — 111, C06005. — P. 1–10.
12. Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography / M.V. Yurovskaya, V.A. Dulov, B. Chapron, V.N. Kudryavtsev // J. Geophys. Research: Oceans. — 2013. — 118. — P. 1–15.