

Сравнение статистических моментов уклонов морской поверхности, полученных по данным оптических сканеров и лазерных уклономеров

В.В. Пустовойтенко, Н.Е. Лебедев

Морской гидрофизический институт, Севастополь, Россия
E-mail: nick_leb@mail.ru

Проведен сравнительный анализ статистических моментов вызванных воздействием ветра уклонов морской поверхности, полученных взаимно дополняющими способами: с помощью оптических сканеров или фотоаппаратуры, установленной на аэрокосмических носителях, и при измерениях в натуральных условиях с помощью двумерных лазерных уклономеров со стационарной платформы или медленно движущегося судна. Первый способ основан на отражении солнечного света от взволнованной морской поверхности; второй - на преломлении лучей на границе раздела вода-воздух и на индикации бликов зеркального отражения. Качественно полученные разными способами зависимости дисперсий уклонов поверхности от скорости ветра совпадают. Коэффициенты регрессионных уравнений зависимости дисперсий уклонов от скорости ветра, полученные по изображениям зоны солнечного блика установленными на космических аппаратах оптическими сканерами, совпадают с точностью до 4 % с коэффициентами, полученными по аэрофотографиям. Оценки дисперсий уклонов, полученные в натуральных условиях с помощью лазерных уклономеров, меньше дисперсий уклонов, полученных при дистанционном зондировании с аэрокосмических аппаратов, на 20 - 35 % для скоростей ветра, превышающих 5 м/с. При меньших скоростях ветра расхождения возрастают.

Ключевые слова: уклоны морской поверхности, статистические моменты, оптические сканеры, лазерные уклонометры.

Введение

Широкий круг прикладных проблем, связанных с взаимодействием атмосферы и океана, радиолокацией морских и надводных целей, дистанционным зондированием океана и др., требует детальной информации об уклонах морской поверхности. Основной вклад в формирование уклонов дают короткие гравитационные, гравитационно-капиллярные и капиллярные волны, измерение которых в морских условиях представляет известные технические трудности (Давидан, Трапезников, 1981). Сложность измерения коротких волн связана с тем, что они распространяются по подвижной криволинейной поверхности более длинных волн, обладающих значительно большей энергией.

Для измерения уклонов морской поверхности используются как контактные, так и неконтактные датчики. К контактным датчикам относятся волнографические буи, посредством которых уклоны определяются по наклонам корпуса буя, и струнные уклонометры, посредством которых уклоны определяются по разности возвышений поверхности. Оба этих метода не позволяют получить информацию об уклонах, создаваемых волнами длиной менее 10 см.

При определении статистических характеристик уклонов оптическими средствами используются активные и пассивные методы. К активным относятся измерения лазерными уклономерами (Христофоров и др., 1992), пассивным – посредством фотосъемки (Сох, Munk, 1954) и оптическими сканерами (Bréon, Henriot, 2006). Оба пассивных дают информацию об уклонах, создаваемых волнами всех диапазонов. Принципиальным различием активных и пассивных методов является то, что при использовании лазерных уклономе-

ров получают информацию об изменении уклона в одной точке, а при использовании оптических сканеров (фотографий) – об уклонах, осредненных на значительных по площади участках поверхности.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ статистических характеристик уклонов морской поверхности, полученных оптическими средствами на основе активных и пассивных методов измерений.

1. Модели поля уклонов морской поверхности

Многочисленные натурные эксперименты (см., например, Сох, Munk, 1954; Христофоров и др. 1992; Запевалов, 2005; Bréon, Henriot, 2006) и библиография этих работ), показывают, что в задачах дистанционного зондирования морскую поверхность нельзя рассматривать как строго гауссову. В распределении уклонов поверхности наблюдаются отклонения от распределения Гаусса, которые возрастают с усилением ветра. Это приводит к изменению свойств границы океан-атмосфера, характеризующих ее как отражающую поверхность (Liu et al., 1997; Запевалов, Ратнер, 2002).

Распределение уклонов можно отнести к классу квазинормальных. Подобные распределения обычно описывают с помощью распределения Грама-Шарлье. В натурных экспериментах, как правило, определяются статистические моменты уклонов не старше четвертого порядка. В этой ситуации, согласно (Сох, Munk, 1954), двумерная плотность вероятностей уклонов описывается усеченным распределением Грама-Шарлье

$$P_{G-c}(\xi_c, \xi_u) = P_G(\xi_c, \xi_u) \left[1 - \frac{1}{2} C_{21} H_2(\tilde{\xi}_c) H_1(\tilde{\xi}_u) - \frac{1}{6} C_{03} H_3(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} C_{40} H_4(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{4} C_{22} H_2(\tilde{\xi}_c) H_2(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} C_{04} H_4(\tilde{\xi}_u) \right], \quad (1)$$

где ξ_u и ξ_c – компоненты уклонов вдоль и поперек направления ветра; $P_G(\xi_c, \xi_u) = (2\pi\sigma_c\sigma_u)^{-1} \exp\left(-\frac{(\tilde{\xi}_c^2 + \tilde{\xi}_u^2)}{2}\right)$ – распределение Гаусса; $H_n(x)$ – полиномы Чебышева–Эрмита, $\tilde{\xi}_u = \xi_u/\sigma_u$; $\tilde{\xi}_c = \xi_c/\sigma_c$; σ_u^2 и σ_c^2 – дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов. Коэффициенты C_{ij} рассчитываются по полученным эмпирически статистическим моментам уклонов. Первый индекс коэффициента C_{ij} соответствует поперечной компоненте уклона, второй – продольной.

Вследствие того, что двумерная модель (1) включает небольшое число членов ряда Грама-Шарлье, она оказывается справедливой только в ограниченной области изменения уклонов (Сох, Munk, 1954), которая определяется условиями

$$-2,5\sigma_u < \xi_u < 2,5\sigma_u, \quad -2,5\sigma_c < \xi_c < 2,5\sigma_c. \quad (2)$$

За пределами области (2) распределение (1) некорректно и даже может иметь отрицательные значения (Tatarskii, 2003; Запевалов, 2005).

Основной характеристикой, описывающей зеркальное отражение солнечного света от морской поверхности, является двулучевая функция отражательной способности, равная отношению отражённой яркости к падающей освещённости на поверхности. Согласно (Cox, Munk, 1954),

$$F = \Phi(\theta_s, \phi_s, \theta_r, \phi_r) Fr(\theta_s, \phi_s, \theta_r, \phi_r) P(\xi_x, \xi_y), \quad (3)$$

где $\Phi(\theta_s, \phi_s, \theta_r, \phi_r)$ – определяемый углами $\theta_s, \phi_s, \theta_r, \phi_r$ геометрический коэффициент; $Fr(\theta_s, \phi_s, \theta_r, \phi_r)$ – коэффициент отражения яркости Френеля; $P(\xi_x, \xi_y)$ – двумерная плотность вероятности уклонов поверхности, ξ_x, ξ_y – проекции уклона ξ на горизонтальные оси OX, OY ; θ_s и ϕ_s – зенитный и азимутальный углы падающего света; θ_r и ϕ_r – зенитный и азимутальный углы света, отраженного в сторону спутника.

Таким образом, построив по оптическим изображениям отраженного морской поверхностью солнечного излучения функцию (3), можно определить двумерную плотность вероятностей ее уклонов $P(\xi_x, \xi_y)$. В то же время условия (2) накладывают ограничения на область, в пределах которой распределение (1) годится для аналитического описания двулучевой функции отражательной способности морской поверхности (Запевалов, Лебедев, 2014). Решить эту проблему можно с помощью предложенной в работе (Zapevalov, Pustovoitenko, 2010) комбинированной модели плотности вероятностей уклонов морской поверхности, которая в области (2) соответствует распределению (1), а за ее пределами приближается к распределению Гаусса.

2. Измерения, основанные на регистрации отраженного солнечного света

До настоящего времени основной моделью уклонов морской поверхности, используемой в приложениях, связанных с рассеянием электромагнитных волн, остается модель Кокса-Манка (Cox, Munk, 1954). Она построена на основе анализа 56 аэрофотографий морской поверхности в зоне солнечного блика.

В начале 2000-х подобные исследования были выполнены с помощью аппаратуры для дистанционного зондирования, установленной на космическом аппарате (КА) (Gréon, Henriot, 2006). Статистические оценки уклонов были получены по анализу 24000 снимков морской поверхности оптическим сканером POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances) КА ADEOS (The Advanced Earth Observing Satellite). Для определения скорости ветра использовался скаттерометр NSCAT (NASA Scatterometer), установленный на борту этого же КА.

Полученные в этих двух работах регрессионные уравнения, описывающие связь статистических характеристик уклонов со скоростью ветра W , а также средние значения не зависящих от скорости ветра характеристик уклонов (рис. 1 и табл. 1), оказались близки между собой. Расхождения между регрессионными зависимостями дисперсий уклонов от скорости ветра полученными двумя методами примерно в три раза мень-

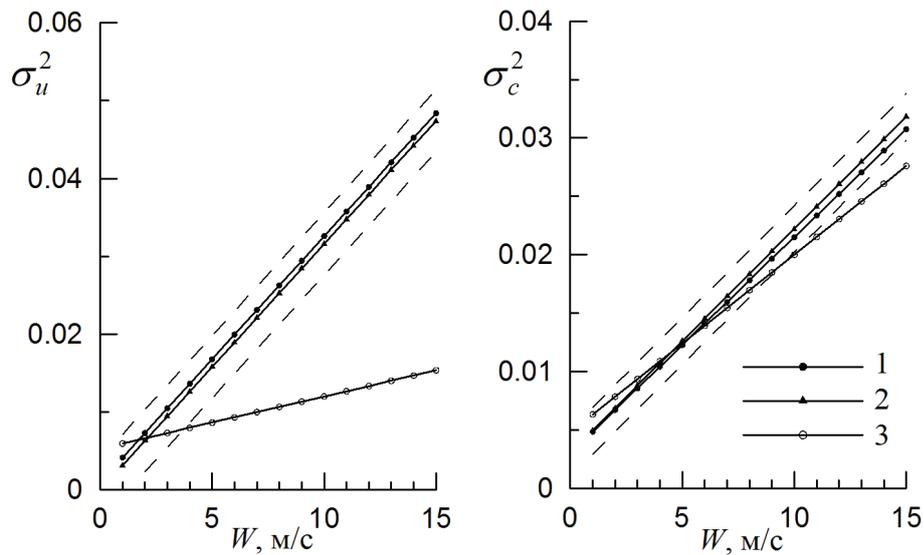


Рис. 1. Зависимости дисперсий уклонов от скорости ветра: 1 – (Bréon, Henriot, 2006); 2 – (Cox, Munk, 1954); 3 – (Ebuchi, Kizu, 2002). Штриховые линии – область среднеквадратических отклонений от регрессий (Cox, Munk, 1954)

ше, чем среднеквадратические отклонения отдельных оценок дисперсий в эксперименте (Cox, Munk, 1954).

В работе (Ebuchi, Kizu, 2002) распределение уклонов исследовалось по данным измерений сканирующего радиометра VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) с геостационарной орбиты. Полученные зависимости дисперсий компонент уклонов от скорости ветра, как видно из рис. 1, резко отличаются от аналогичных зависимостей, полученных другими авторами (Cox, Munk, 1954; Bréon, Henriot, 2006; Kay et al., 2013).

Скорость ветра авторами (Cox, Munk, 1954) измерялась на высоте 12,5 м от поверхности, тогда как в измерениях (Bréon, Henriot, 2006), (Ebuchi, Kizu, 2002) она относилась к 10-метровой высоте.

Обращает на себя внимание то, что разброс всех включенных в табл. 1 параметров, при измерениях с борта КА, значительно ниже, чем при измерениях с самолета. Вероятно, это связано с тем, что площадь, по которой проводится осреднение при расчете статистических характеристик уклонов, в первом случае больше, чем во втором.

Таблица 1. Статистические характеристики уклонов морской поверхности по данным оптических измерений с авиа и космических аппаратов

Параметр	(Cox, Munk, 1954)	(Bréon, Henriot, 2006)
σ_c^2	$0,003 + 0,00192W \pm 0,002$	$0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$
σ_u^2	$0,000 + 0,00316W \pm 0,004$	$0,001 + 0,00316W \pm 0,0005$
C_{21}	$0,01 - 0,0086W \pm 0,03$	$-0,0009W^2 \pm 0,01$
C_{03}	$0,04 - 0,033W \pm 0,12$	$-0,45 [1 + \exp(7 - W)]^{-1} \pm 10^{-2}$
C_{40}	$0,40 \pm 0,23$	$0,3 \pm 0,05$
C_{22}	$0,12 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,03$
C_{04}	$0,23 \pm 0,41$	$0,4 \pm 0,1$

Характер зависимостей статистических моментов третьего порядка от скорости ветра различен (см. *табл. 1*). Согласно результатам (Cox, Munk, 1954), они линейно меняются с изменением скорости ветра, тогда как по результатам (Bréon, Henriot, 2006) эта зависимость является нелинейной. Статистические моменты четвертого порядка от ветра не зависят, их средние значения совпадают с точностью до среднеквадратического отклонения.

3. Сравнение характеристик уклонов, полученных разными методами

Сравним результаты дистанционных измерений статистических характеристик уклонов морской поверхности и измерений *in situ*, выполненных с помощью лазерных уклономеров. Принцип действия лазерного уклономера основан на измерении угла отклонения лазерного луча от вертикали при прохождении из-под воды взволнованной границы раздела вода-воздух.

Рассмотрим результаты, полученные при измерениях с борта медленно движущегося судна (Hughes et al., 1977) и при позиционных измерениях, проведенных на океанографической платформе (Христофоров и др., 1992). Статистические характеристики уклонов, полученные в этих работах, представлены в *табл. 2*. Несмотря на различие методик измерений, коэффициенты регрессий и средние значения коэффициентов C_{ij} оказались достаточно близки между собой.

Таким образом, в оценках дисперсий уклонов, полученных по данным измерений оптическим сканером и лазерным уклономером, существуют заметные отличия. Чтобы сравнить дисперсии уклонов, определенные разными способами, рассмотрим отношения $K1_u(W) = \sigma_{uB}^2 / \sigma_{uX}^2$, $K1_c(W) = \sigma_{cB}^2 / \sigma_{cX}^2$, $K2_u(W) = \sigma_{uB}^2 / \sigma_{uH}^2$ и $K2_c(W) = \sigma_{cB}^2 / \sigma_{cH}^2$ (*рис. 2*), где нижние индексы B , X и H , указывают на то, что расчет дисперсий проводится по результатам работ (Bréon, Henriot, 2006), (Христофоров и др., 1992) и (Hughes et al., 1977), соответственно.

Дисперсии компонент уклонов, полученные с помощью лазерных уклономеров, на 20 % и более отличаются от дисперсий, рассчитанных по данным оптического сканера. Исключением являются оценки дисперсии продольной компоненты уклонов, полученные при скоростях ветра менее 5 м/с.

Таблица 2. Статистические характеристики уклонов морской поверхности, полученные по данным измерений лазерным уклономером

Параметр	(Hughes et al., 1977)	(Христофоров и др., 1992)
σ_c^2	$0,0008 + 0,00166W \pm 0,002$	$0,00136 + 0,00162W \pm 0,004$
σ_u^2	$0,0015 + 0,00231W \pm 0,002$	$0,00410 + 0,00205W \pm 0,005$
C_{21}	$0,0086 \pm 0,003$	$0,0005 \pm 0,09$
C_{03}	$0,224 - 0,039W \pm 0,06$	$0,106 - 0,032W \pm 0,23$
C_{40}	$0,51 \pm 0,29$	$0,33 \pm 0,43$
C_{22}	$0,15 \pm 0,08$	$0,17 \pm 0,27$
C_{04}	$0,40 \pm 0,15$	$0,43 \pm 0,46$

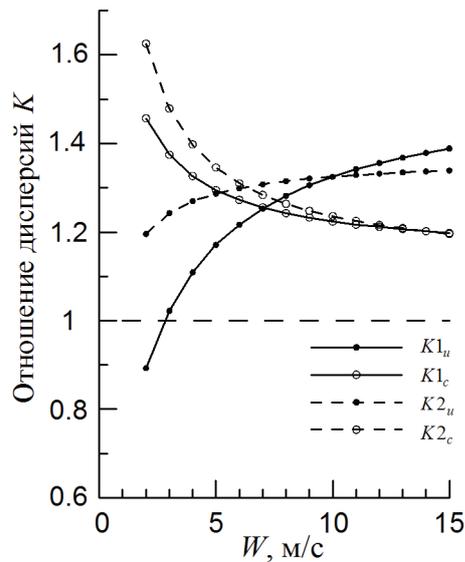


Рис. 2. Отношения дисперсий компонент уклонов, полученных разными методами

Попытка количественного сравнения спектров уклонов морской поверхности, полученных по оптическим изображениям и по данным измерений двумерным лазерным уклономером, была предпринята в работе (Lubard et al., 1980). Исследования проводились на океанографической платформе с помощью цифровой оптической системы и лазерного уклономера. Было выявлено существование систематических расхождений между спектрами, полученными разными способами.

Основной проблемой сопоставления спектральных характеристик поверхности, рассчитанных по ее оптическим изображениям и по измерениям лазерным уклономером, является переход от частотных характеристик к характеристикам, определенным в пространстве волновых чисел. Для длинных гравитационных волн этот переход осуществляется на основе дисперсионного уравнения. Подобная процедура для коротких волн, которые и определяют уклоны поверхности, сопряжена со значительными ошибками, поскольку их скорость определяется не только собственной фазовой скоростью, но и орбитальными скоростями длинных волн, по поверхности которых они распространяются.

Сравнивая оценки статистических моментов третьего порядка, приведенные в табл. 1 и 2, можно отметить, что, в отличие от данных дистанционных измерений, коэффициент C_{21} , полученный по измерениям лазерным уклономером, оказался независимым от скорости ветра. Статистические моменты четвертого порядка в обоих случаях не зависят от скорости ветра.

Заключение

Проведен сравнительный анализ статистических моментов уклонов морской поверхности, определенных с помощью оптических сканеров и лазерных уклономеров. Показано, что полученные разными методами зависимости дисперсий уклонов от скорости ветра каче-

ственно совпадают. Оценки дисперсий уклонов, полученные с помощью лазерных уклономеров, меньше дисперсий уклонов, полученных при дистанционном зондировании аэро- и космических аппаратов, на ~ 20 % для скоростей ветра, превышающих 5 м/с. При скорости ветра менее 5 м/с, расхождения возрастают.

Полученные разными методами оценки третьего момента продольной компоненты уклонов (C_{03}) показывают общую тенденцию усиления асимметрии распределения уклонов с усилением ветра. Статистические моменты четвертого порядка от ветра не зависят. Расхождения имеют место для коэффициента C_{21} , который по данным измерений оптическим сканером меняется с усилением ветра, а по данным измерений лазерным уклономером от ветра не зависит.

Литература

1. Давидан И.Н., Трапезников Ю.Л. Проблемы исследования высокочастотной области спектра ветровых волн // Гидрометеорология. Сер. Океанология. Вып. 1. Обнинск, 1981. 46 с.
2. Запевалов А.С. Изменчивость характеристик локальных уклонов морской поверхности // Прикладная гидромеханика. 2005. Т. 7(79). № 1. С. 17–21.
3. Запевалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 28–33.
4. Запевалов А.С., Ратнер Ю.Б. Эффекты квазигaussianого характера распределения уклонов морской поверхности при лазерном зондировании // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 958–928.
5. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В. Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология. 1992. Т.32. Вып. 3. С. 452–459.
6. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. No. C6. pp. C06005.
7. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44. No. 11. P. 838–850.
8. Ebuchi N., Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using Sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers // J. Oceanogr. 2002. V. 58. P. 477–486.
9. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W.A. A fast response surface–wave slope meter and measured wind–wave components // Deep–Sea Res. 1977. V.24. No. 12. P. 1211–1223.
10. Kay S., Hedley J., Lavender S. Sun glint estimation in marine satellite images: a comparison of results from calculation and radiative transfer modeling // Applied Optics. 2013. V. 52. No. 23. P. 5631–5639.
11. Liu Y., Yan X.–H., Liu W.T., Hwang P.A. The probability density function of ocean surface slopes and its effects on radar backscatter // J. of Physical. Oceanogr. 1997. V. 27. P. 782–797.
12. Lubard S.C., Krimmel J. E., Thebaud L. R., Evans D.D., Shemdin O.H. Optical image and laser slope meter inter-comparisons of high-frequency waves // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. No. C9. P. 4996–5002.
13. Tatarskii V.I. Multi–Gaussian representation of the Cox–Munk distribution for slopes of wind–driven waves // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. P. 1697–1705.
14. Zapevalov A.S., Pustovoitenko V.V. Modeling of the probability distribution function of sea surface slopes in problems of radio wave scattering // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. V. 53. No. 2. P. 100–110.

Comparison of sea surface slope statistical moments obtained by means of optical scanners and laser inclinometers

V.V. Pustovoitenko, N.E. Lebedev

Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, Russia
E-mail: nick_leb@mail.ru

A comparative analysis is presented of statistical moments of the wind-driven sea surface slopes obtained by complementary ways: using aerospace optical scanners or photographic equipment and measurements *in situ* by two-dimensional laser inclinometer from a fixed platform or slow-moving vessel. The first method is based on the reflection of sunlight by the sea surface; the second - on the refraction across the water-air boundary and on indication of reflected glints. The dependencies of the slope dispersions on wind speed obtained by the different ways are qualitatively the same. Quantitatively, the regression coefficients for the dependencies of slope dispersions on wind obtained by satellite optical scanners and aerial photographs of the sun glint zone coincide up to 4%. Estimations of slope dispersions obtained by laser inclinometer are less than those obtained by means of aerospace optical measurements by 20 - 35% for wind speeds exceeding 5 m/s. At lower wind speeds this discrepancy increases.

Keywords: sea surface slopes, statistical moments, optical scanners, laser inclinometers.

References

1. Davidan I.N., Trapeznikov Yu.L., Problemy issledovaniya vysokochastotnoi oblasti spektra vetrovykh voln (Problems of high-frequency part of the wind-generated waves spectrum research), *Gidrometeorologiya. Ser. Okeanologiya*, No. 1. Obninsk, 1981, 46 p.
2. Zapevalov A.S. Izmenchivost' kharakteristik lokal'nykh uklovov morskoi poverkhnosti (Variability of the sea surface local slopes characteristics), *Prikladnaya gidromekhanika*, 2005, Vol. 7(79), No. 1, pp. 17–21.
3. Zapevalov A.S., Lebedev N.E. Modelirovanie statisticheskikh kharakteristik poverkhnosti okeana pri distantsionnom zondirovanii v opticheskom diapazone (Simulation of the sea surface statistical characteristics at the remote sensing in the optical range), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 1, pp. 28–33.
4. Zapevalov A.S., Ratner Yu.B. Effekty kvazigaussovogo kharaktera raspredeleniya uklovov morskoi poverkhnosti pri lazernom zondirovanii (The effects of the quasi Gaussian distribution of sea surface slopes under laser sensing), *Optika atmosfery i okeana*, 2002, Vol. 15, No. 10, pp. 958–928.
5. Khristoforov G.N., Zapevalov A.S., Babii M.V. Statisticheskie kharakteristiki uklovov morskoi poverkhnosti pri raznykh skorostyakh vetra (Statistical characteristics of the sea surface slopes at different wind speeds), *Okeanologiya*, 1992, Vol. 32, Issue 3, pp. 452–459.
6. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions, *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, No. C6, pp.C06005.
7. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter, *J. Optical. Soc. America*, 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838–850.
8. Ebuchi N., Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using Sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers, *J. Oceanogr.*, 2002, Vol. 58, pp. 477–486.
9. Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W.A. A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave components, *Deep-Sea Res.*, 1977, Vol. 24, No. 12, pp. 1211–1223.
10. Kay S., Hedley J., Lavender S. Sun glint estimation in marine satellite images: a comparison of results from calculation and radiative transfer modeling, *Applied Optics*, 2013, Vol. 52, No. 23, pp. 5631–5639.
11. Liu Y., Yan X.-H., Liu W.T., Hwang P.A. The probability density function of ocean surface slopes and its effects on radar backscatter, *J. of Physical. Oceanogr.*, 1997, Vol. 27, pp. 782–797.
12. Lubard S.C., Krimmel J. E., Thebaud L. R., Evans D.D., Shemdin O.H. Optical image and laser slope meter intercomparisons of high-frequency waves, *J. Geophys. Res.*, 1980, Vol. 85, No. C9, pp. 4996–5002.
13. Tatarskii V.I. Multi-Gaussian representation of the Cox-Munk distribution for slopes of wind-driven waves, *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, pp. 1697–1705.
14. Zapevalov A.S., Pustovoitenko V.V. Modeling of the probability distribution function of sea surface slopes in problems of radio wave scattering, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2010, Vol. 53, No. 2, pp. 100–110.