

Физические ограничения точности альтиметрического определения скорости ветра над океаном

А.С. Запевалов¹, В.В. Пустовойтенко¹, К.В. Показеев²

¹*Морской гидрофизический институт, Севастополь, 299000, Россия
E-mails: sevzepter@mail.ru, v2pust@mail.ru*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: sea@phys.msu.ru*

Рассмотрены ошибки альтиметрического определения скорости ветра, вызванные воздействием на морскую поверхность разных физических процессов, непосредственно не связанных со скоростью ветра. Эти процессы приводят к неоднозначной зависимости между характеристиками структуры морской поверхности и скоростью ветра, что определяет предельную точность альтиметрических измерений. Анализ ограничений точности определения скорости ветра проведен на основе данных измерений уклонов морской поверхности и скорости ветра, выполненных с космического аппарата (Bréon, Henriot, 2006), а также на основе измерений с самолета при контроле скорости ветра с судна (Cox, Munk, 1954). Обсуждается влияние масштабов осреднения на разброс статистических оценок уклонов. Показано, что ошибки измерения скорости ветра, обусловленные неоднозначной зависимостью энергии коротких поверхностных волн от локальной скорости составляют 0,2 м/с. Эти ошибки не зависят от средней скорости ветра. Другой вид ошибок – ошибки, обусловленные изменением асимметрии и эксцесса распределений уклонов морской поверхности. Эти ошибки меняются в пределах от 0,05 м/с при средней скорости ветра 1 м/с до 0,4 м/с при средней скорости ветра 15 м/с.

Ключевые слова: морская поверхность, спутниковый альтиметр, отражение радиоволн, измерение скорости ветра.

Введение

В основе альтиметрического измерения скорости приводного ветра лежит связь характеристик коротких поверхностных волн и скорости приводного ветра (Moore, Pierson, 1966). Калибровка альтиметров, как измерителей скорости ветра, осуществляется путем сопоставления данных дистанционного зондирования с результатами *in situ* измерений с океанографических буев. Точность альтиметрического измерения скорости приводного ветра равняется 1,5-1,6 м/с (Лаврова и др., 2011). Факторы, приводящие к погрешности измерений, можно разделить на несколько групп. К первой группе отнесем аппаратные шумы. Ко второй группе отнесем не синхронность измерений и отклонения траектории космического аппарата (КА) от местоположения буя. Третья группа – это физические факторы, являющиеся результатом неоднозначности связи характеристик поверхностных волн и скорости ветра. В настоящей работе мы ограничимся анализом погрешности, обусловленной третьей группой, которая и определяет предельную точность альтиметрических измерений.

На топографическую структуру морской поверхности влияет большое число разных по своей физической природе физических механизмов (Монин, Красицкий, 1985), что приводит к разбросу характеристик поверхностных волн при фиксированной скорости ветра (Христофоров и др., 1993). Разброс волновых характеристик зависит от масштабов

осреднения. Принципиальным физическим различием между контактными и дистанционными (в нашем случае альтиметрическими) измерениями является то, что в первом случае измерения скорости ветра и волновых характеристик проводятся в «точке» с осреднением по времени порядка 10 мин, а во втором случае измерения проводятся на площади в несколько десятков квадратных километров и практически мгновенно (время осреднения 1 с) (Пустовойтенко, Запевалов, 2012).

Погрешность определения скорости локального ветра, создаваемая неоднозначностью связи уровня шероховатости морской поверхности и скорости воздушного потока над ней оценивалась в работах (Христофоров и др., 1987; Запевалов и др., 2006). Было показано, что она ограничивает предельную точность скаттерометрического и альтиметрического измерения скорости приводного ветра на уровне 1,7 м/с. Расчет проводился на основе данных измерений характеристик волнового поля, полученных с помощью двумерного лазерного уклономера и струнных волнографов, и контроле поля ветра с помощью анеморумбометра (Бабий и др., 2004).

В настоящей работе анализ предельной точности определения скорости ветра проведен на основе данных спутниковых измерений (Bréon, Henriot, 2006). Для анализа влияния масштаба осреднения на связь уклонов морской поверхности со скоростью ветра использованы данные, полученные с помощью аэрофотосъемки при контроле скорости ветра с судна (Cox, Munk, 1954).

Определение скорости ветра

В приближении геометрической оптики удельная эффективная площадь рассеяния радиоволн при падении на шероховатую поверхность с конечной проводимостью описывается выражением (Пустовойтенко, Запевалов, 2012)

$$\sigma^0 = \pi \sec^4 \theta |R_0|^2 P_{2D}(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp}) \Big|_{\xi_{\uparrow} = \operatorname{tg} \theta, \xi_{\perp} = 0} \quad (1)$$

где R_0 – коэффициент Френеля; P_{2D} – двумерная плотность вероятностей уклонов; ξ_{\uparrow} – уклон морской поверхности в плоскости зондирования; ξ_{\perp} – уклон морской поверхности в ортогональной плоскости. При альтиметрических измерениях зондирование осуществляется в надир, и можно принять $\xi_{\uparrow} = 0$. Зеркальное отражение происходит, если выполняется условие: длина поверхностной волны много больше длины радиоволны. Волны, которые не удовлетворяют этому условию, вызывают диффузное рассеяние, что приводит к уменьшению мощности отраженного радиолокационного сигнала. Чтобы учесть это яв-

ление в выражении (1) коэффициент Френеля заменяют эффективным коэффициентом отражения, величина которого меняется на 10% при изменении скорости ветра от 1,5 м/с до 15 м/с (Показеев и др., 2013).

Плотность вероятностей продольной ξ_u (относительно направления ветра) и поперечной ξ_c компонент уклонов описывается выражением (Cox, Munk, 1954; Bréon, Henriot, 2006)

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

где $P_G(\xi_c, \xi_u) = (2\pi d_c d_u)^{-1} \exp(-(\tilde{\xi}_c^2 + \tilde{\xi}_u^2)/2)$ – плотность вероятностей распределение Гаусса; $\tilde{\xi}_u = \xi_u/d_u$; $\tilde{\xi}_c = \xi_c/d_c$; d_u^2 и d_c^2 – дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов; H_i – полиномы Чебышева-Эрмита i -го порядка. Первый индекс коэффициента C_{ij} соответствует поперечной компоненте уклона, второй продольной. Выражение (2) получено в рамках предположения, что распределение уклонов в поперечном к направлению ветра направлении является симметричным.

Регистрируемый на КА сигнал альтиметра формируют площадки морской поверхности, удовлетворяющие условию $\xi_u \approx \xi_c \approx 0$. Полиномы H_1 и H_3 являются нечетными функциями уклонов, поэтому в выражении (2) вкладом членов пропорциональных этим полиномам можно пренебречь. Учитывая, что $H_2(0) = -1$, $H_4(0) = 3$, получаем

$$P_{2D}(0,0,W) = \frac{1}{2\pi d_c(W) d_u(W)} \left[1 + \frac{C_{40}}{8} + \frac{C_{22}}{4} + \frac{C_{04}}{8} \right], \quad (3)$$

где W – скорость ветра на высоте 10 м. Из (1) и (3) следует, что зависимость σ^0 от скорости ветра определяется изменением энергии коротких поверхностных волн, дающих основной вклад в дисперсию уклонов. Коэффициенты C_{40} , C_{22} и C_{04} от скорости ветра не зависят. Это означает, что отклонения реальных распределений уклонов от распределения Гаусса являются фактором, приводящим к погрешности альтиметрических измерений.

Таким образом, погрешность альтиметрического определения скорости ветра можно представить в виде суммы двух составляющих. Первая составляющая обусловлена сто-

хастическим характером связи энергии коротких поверхностных волн со скоростью ветра. Вторая составляющая определяется разбросом коэффициентов C_{40} , C_{22} и C_{04} .

Оценка погрешности определения скорости ветра

В настоящей работе для количественного анализа точности определения скорости ветра используются данные измерений уклонов морской поверхности и скорости ветра, представленные в работах (Bréon, Henriot, 2006) и (Cox, Munk, 1954). В работе (Bréon, Henriot, 2006) статистические характеристики уклонов морской поверхности рассчитались по оптическим изображениям, полученным с помощью сканера POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances). Скорость ветра определялась с помощью скаттерометра NSCAT (NASA Scatterometer). Сканер и скаттерометр установлены на космическом аппарате ADEOS-1. В работе (Cox, Munk, 1954) характеристики уклонов определялись по аэрофотографиям морской поверхности в зоне блика. Скорость ветра контролировалась анемометром, установленным на мачте судна. Параметры распределения (3), полученные в указанных работах, представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Статистические характеристики уклонов морской поверхности

(Bréon, Henriot, 2006)	(Cox, Munk, 1954)
$d_u^2 = 0,001 + 0,00316W \pm 0,0005$	$d_u^2 = 0,000 + 0,00316W \pm 0,004$
$d_c^2 = 0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$	$d_c^2 = 0,003 + 0,00192W \pm 0,002$
$C_{40} = 0,3 \pm 0,05$	$C_{40} = 0,40 \pm 0,23$
$C_{22} = 0,12 \pm 0,03$	$C_{22} = 0,12 \pm 0,06$
$C_{04} = 0,4 \pm 0,1$	$C_{04} = 0,23 \pm 0,41$

Полученные разными методами регрессионные зависимости, описывающие связь дисперсий компонент уклонов со скоростью ветра, совпадают с точностью до среднеквадратического отклонения (СКО). Однако разброс статистических оценок дисперсий уклонов, полученных по аэрофотографиям, значительно больше (в 4-8 раз), чем по данным спутниковых измерений. Также при близких средних значениях коэффициентов C_{ij} значения СКО коэффициентов, определенных по аэрофотографиям, в несколько раз превышают значения СКО, полученные по данным спутниковых измерений.

Чтобы определить погрешность измерения скорости ветра, учитывая уравнение (1), связывающее удельную эффективную площадь рассеяния радиоволн с плотностью вероятностей уклонов морской поверхности, решим относительно переменной dW уравнение

$$P_0(\xi_c, \xi_u, W + dW) - P_\Delta(\xi_c, \xi_u, W) = 0,$$

где P_0 – функция плотности вероятностей (2), построенная при средних значениях, определяющих ее параметров; P_Δ – функция плотности вероятностей (2), построенная при параметрах, отклоняющихся от своего среднего на величину СКО. Сначала определим, к каким ошибкам приводит разброс дисперсий уклонов морской поверхности при фиксированной скорости ветра (погрешность dW_d), затем оценим влияние отклонений распределений уклонов от распределения Гаусса (погрешность dW_C). Примем, что $\xi_u = \xi_c = 0$.

Результаты расчета абсолютной величины погрешности dW_d по статистическим характеристикам уклонов морской поверхности, приведенным в работах (Bréon, Henriot, 2006, Cox, Munk, 1954) (они обозначены соответственно $dW_d^{(B)}$ и $dW_d^{(C)}$), представлены на рис. 1. Расчеты проведены для ситуации, когда дисперсии компонент уклонов d_u^2 и d_c^2 одновременно отклоняются от среднего на величину СКО в сторону больших или меньших значений; значения коэффициентов C_{ij} равны их средним величинам.

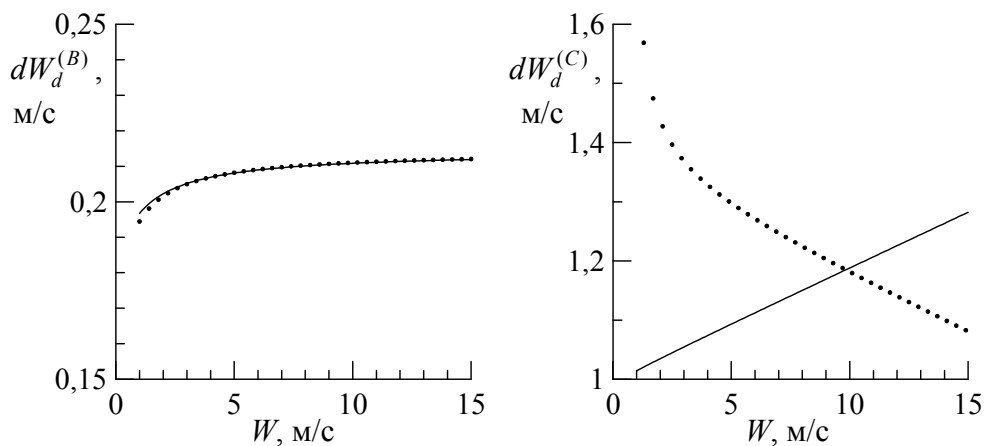


Рис. 1. Погрешность измерения скорости ветра, создаваемая неоднозначностью связи энергии коротких волн и локальным ветром. Сплошная линия соответствует большим значениям дисперсии уклонов, пунктирная – меньшим

Величина погрешности $dW_d^{(B)}$ практически не зависит от средней скорости ветра. Учитывая классы геофизических и океанологических задач, которые в настоящее время решаются с помощью средств дистанционного зондирования океана, можно принять

$dW_d^{(B)} = 0,2$ м/с. Погрешность $dW_d^{(C)}$ заметно превосходит погрешность $dW_d^{(B)}$. В зависимости от средней скорости ветра эти параметры различаются в 5-8 раз.

Погрешность, обусловленная разбросом коэффициентов ряда Грама-Шарлье C_{ij} , показана на рис. 2. Как и при анализе погрешности dW_d рассмотрены два случая, когда статистические характеристики взяты из работы (Bréon, Henriot, 2006) (погрешность $dW_C^{(B)}$) и из работы (Cox, Munk, 1954) (погрешность $dW_C^{(C)}$). Предполагалось, что входящие в выражение (3) коэффициенты C_{ij} одновременно отклоняются от своих средних величин на величину СКО в сторону значений соответствующих распределению Гаусса или в другую сторону.

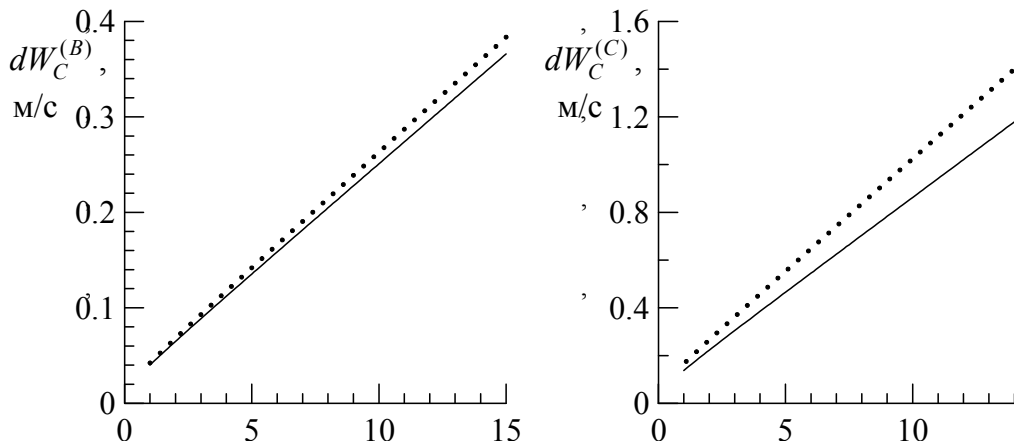


Рис. 2. Погрешность измерения скорости ветра, создаваемая отклонениями распределения уклонов от распределения Гаусса. Сплошная линия соответствует большим значениям коэффициентов C_{ij} , пунктирная – меньшим

С ростом скорости ветра погрешности, создаваемые отклонениями распределения уклонов от распределения Гаусса, растут. Погрешность $dW_C^{(B)}$ примерно в четыре раза меньше $dW_C^{(C)}$.

Из анализа рис. 1 и рис. 2 следует, что при сопоставлении характеристик уклонов морской поверхности и скорости ветра, определенных по данным измерений с космических аппаратов, погрешность определения скорости ветра значительно ниже, чем принятая сейчас погрешность альтиметрического измерения скорости приводного ветра, которая равняется 1,5-1,6 м/с (Лаврова и др., 2011). В то же время погрешность, рассчитанная при сопоставлении характеристик уклонов, определенных по аэрофотографиям, с прямыми измерениями ветра в точке (с судна), близка к альтиметрической погрешности.

Заключение

Проведен анализ ошибок альтиметрического определения скорости ветра, вызванных неоднозначностью зависимости характеристик структуры морской поверхности от скорости ветра. Он показал, что существующий в настоящее время способ калибровки альтиметров как измерителей скорости ветра путем сопоставления данных дистанционного зондирования с результатами *in situ* измерений с океанографических буев завышает в 5-6 раз погрешность измерения скорости ветра. Обусловлено это тем, что при альтиметрических измерениях исходными данными для определения скорости ветра являются характеристики уклонов морской поверхности, осредненные по большой площади, которые сопоставляются с измерениями ветра в точке с осреднением по времени.

При измерении с космического аппарата ошибки измерения скорости ветра, обусловленные неоднозначной зависимостью энергии коротких поверхностных волн от локальной скорости составляют 0,2 м/с и не зависят от средней скорости ветра. Ошибки, которые вызваны некоррелированными со скоростью ветра отклонениями распределений уклонов от распределения Гаусса меняются в пределах от 0,05 м/с при скорости ветра 1 м/с до 0,4 м/с при скорости ветра 15 м/с.

Литература

1. *Бабий В.И., Гайский В.А., Запелов А.С., Ерошко А.А., Шаповалов Ю.И.* Создание позиционных измерительных комплексов // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте НАН Украины за 75 лет. Севастополь: МГИ, 2004. С. 657-661.
2. *Запелов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В.* О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49-54.
3. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 470 с.
4. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 375 с.
5. *Показеев К.В., Запелов А.С., Пустовойтенко В.В.* Моделирование формы отраженного импульса радиоальтиметра // Вестник Московского университета, Физика. Астрономия. 2013. № 5. С. 80-85.
6. *Пустовойтенко В.В., Запелов А.С.* Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – Современное состояние, перспективы и проблемы // Серия: Современные проблемы океанологии. Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. Вып. № 11. 218 с.
7. *Христофоров Г.Н., Запелов А.С., Смолов В.Е.* Зависимость амплитудных характеристик высокочастотных компонент спектра ветровых волн от скорости ветра над морем // Морской гидрофизический журнал. 1993. № 3. С. 67-77.
8. *Христофоров Г.Н., Запелов А.С., Смолов В.Е.* О предельной точности скаттерометрического определения со спутника скорости ветра над океаном // Исследование Земли из Космоса. 1987. № 2. С. 57-65.
9. *Bréon F.M., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geoph. Res.: Oceans. 2006. Vol. 111. No. C6. DOI: 10.1029/2005JC003343.
10. *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. P. 838–850.
11. *Moore R. K., Pierson W.J.* Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite // Proc. Inter. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites Miami Beach, FL. 1966. Nov. 22-24. P. R1–R28.

Physical limitations of accuracy definition of wind speed over the ocean from altimetry data

A.S. Zapevalov¹, V.V. Pustovoytenko¹, K.V. Pokazeev²

¹Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol 299000, Russia

E-mails: sevzepter@mail.ru, v2pust@mail.ru

²Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: sea@phys.msu.ru

Errors of wind speed retrieval from altimetry data caused by the influence of different physical processes at the sea surface, not directly related to the wind speed, are considered. These processes lead to ambiguous relationships between characteristics of the sea surface and wind speed, which determines the maximum of altimetry measurements precision. The analysis of the restrictions of the determination accuracy of wind speed is carried out on the measurements of sea surface slopes and wind speed made from a spacecraft (Bréon, Henriot, 2006), as well as on the basis of slopes measurements from the aircraft with wind speed monitoring from a vessel (Cox, Munk, 1954). The effect of scale averaging on the spread of statistical estimates of slopes is discussed. It is shown that the error of wind speed measurements due to ambiguous dependence of the energy of short surface waves on local wind is 0,2 m/s. This error does not depend on the average wind speed. Another kind of errors is due to changes in skewness and kurtosis distributions of the sea surface slopes. This error varies in the range from 0,05 m/s at average wind speed of 1 m/s to 0,4 m/s at average wind speed of 15 m/s.

Keywords: sea surface, satellite altimeter, reflection of radio waves, wind speed measurement

References

1. Babij V.I., Gajskij V.A., Zapevalov A.S., Eroshko A.A., Shapovalov Ju.I. Sozdanie pozicionnyh izmeritel'nyh kompleksov (Creating a positional measurement systems), In: *Razvitie morskikh nauk i tekhnologij v Morskom gidrofizicheskom institute NAN Ukrainy za 75 let* (Development of marine sciences and technologies in Marine Hydrophysical Institute over 75 years), Sevastopol: MGI, 2004, pp. 657-661.
2. Zapevalov A.S., Pokazeev K.V., Pustovoytenko V.V. O predel'noj tochnosti al'timetriceskogo opredelenija skorosti privodnogo vetra (About the maximum accuracy of the surface wind altimeter estimation), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 49-54.
3. Lavrova O.Ju., Kostjanov A.G., Lebedev S.A., Mitjagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyj sputnikovyy monitoring morej Rossii* (Complex satellite monitoring of the seas of Russia), Moscow: IKI RAS, 2011, 470 p.
4. Monin A.S., Krasickij V.P. *Javlenija na poverhnosti okeana* (Phenomena on the surface of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 375 p.
5. Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. Modelirovanie formy otrazhennogo impul'sa radioal'timetra (The simulation of a radar altimeter return waveform), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Fizika. Astronomiya*, 2013, No. 5, pp. 80-85.
6. Pustovoytenko V.V., Zapevalov A.S. *Operativnaya okeanografiya: Sputnikovaya al'timetriya – Sovremennoye sostojanie, perspektivy i problemy. Seriya: Sovremennye problemy okeanologii* (Operational Oceanography: Satellite altimetry – the current status, prospects and problems, Series: Current problems of oceanology), Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2012, Issue 11, 218 p.
7. Khristoforov G.N., Zapevalov A.S., Smolov V.E. Zavisimost' amplitudnyh harakteristik vysokochastotnyh komponent spektra vetrovyh voln ot skorosti vetra nad morem (Dependence of the amplitude characteristics of high frequency components of the spectrum of wind waves on the wind speed over the sea), *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 1993, No. 3, pp. 67-77.
8. Khristoforov G.N., Zapevalov A.S., Smolov V.E. O predel'noj tochnosti skatterometriceskogo opredelenija so sputnika skorosti vetra nad okeanom (Accuracy limits of satellite-borne scatterometer measurements of ocean wind speed), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1987, No. 2, pp. 57-65.
9. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions, *J. Geoph. Res.: Oceans*, 2006, HHVol. 111, No. C6, HHDOI: 10.1029/2005JC003343.
10. 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.
11. Moore R. K., Pierson W.J. Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite, *Proc. Inter. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites*, Miami Beach, FL, 1966, Nov. 22-24, pp. R1–R28.