

УДК 535.42

Влияние топографической структуры морской поверхности на погрешность определения приводного ветра спутниковыми оптическими сканерами

А.С. Запевалов¹, Н.Е. Лебедев¹, К.В. Показеев^{2*}

¹Морской гидрофизический институт
99011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

Поступила в редакцию 17.06.2014 г.

Анализируется погрешность определения скорости приводного ветра с помощью оптических сканеров, обусловленная многообразием физических факторов, формирующих топографическую структуру морской поверхности. Показано, что данную погрешность можно разделить на две составляющие. Первая вызвана стохастическим характером связи скорости ветра и энергии коротких поверхностных волн, она не зависит от средней скорости ветра и составляет 0,2 м/с. Вторая составляющая обусловлена отклонениями распределения уклонов от распределения Гаусса, она растет с усилением ветра, меняясь от 0,1 м/с при скорости ветра 1,5 до 0,4 м/с при скорости ветра 15 м/с.

Ключевые слова: уклоны морской поверхности, скорость ветра, погрешность определения; sea surface slopes, wind speed, measurement error.

Введение

В основе измерения скорости приводного ветра средствами дистанционного зондирования океана лежит связь между энергией коротких поверхностных волн и скоростью воздушного потока над водной поверхностью. Идея использовать установленные на космических аппаратах приборы, которые регистрируют мощность отраженного морской поверхностью сигнала, для измерения скорости приводного ветра была впервые сформулирована в докладе R.K. Moore и W.J. Pierson на Международном симпозиуме «Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites» в 1966 г. [1].

Тонкую топографическую структуру морской поверхности, определяющую рассеяние и отражение СВЧ-радиоволн и света, формируют короткие поверхностные волны [2, 3]. На короткие волны влияет большое число разных по своей природе физических факторов, таких как ветер, внутренние волны, течение, стратификация атмосферного пограничного слоя, апвеллинг, концентрация поверхностно-активных веществ (как биогенных, так и техногенных) и др. [4]. В свою очередь, изменения характеристик поверхностных волн оказывают воздействие на поле скорости ветра [5]. Связь между скоростью ветра, характеристиками локальных уклонов морской поверхности и статистикой бликов зеркально-отражения является стохастической [6–8].

Оценки предельной точности скаттерометрического и альтиметрического определения скорости приводного ветра получены в работах [9, 10]. Расчеты были выполнены в рамках предположения, что предельная точность измерений обусловлена неоднозначностью связи уровня шероховатости морской поверхности и скорости ветра. Для анализа использовались данные измерений, полученные на экспериментальной платформе Морского гидрофизического института с помощью двумерного лазерного уклономера и струнных волнографов [11].

В основу нашего анализа положим данные спутниковых измерений уклонов морской поверхности и скорости ветра из работы [12]. В ней при моделировании плотности вероятностей уклонов использовались статистические оценки, рассчитанные по оптическим изображениям сканера POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances). Скорость ветра определялась по измерениям скаттерометра NSCAT (NASA Scatterometer). Сканер и скаттерометр были установлены на космическом аппарате ADEOS-1. Было выполнено 34728 спутниковых сеансов измерений различных участков акватории всех океанов.

Определение скорости приводного ветра

При дистанционном зондировании в оптическом диапазоне скорость приводного ветра определяется по интенсивности отраженного морской поверхностью солнечного излучения в зоне блика

* Александр Сергеевич Запевалов (sevzepter@mail.ru); Николай Евгеньевич Лебедев; Константин Васильевич Показеев (sea@phys.msu.ru).

[13, 14]. Двухнаправленная функция рассеяния, описывающая уровень отраженного морской поверхностью солнечного излучения, может быть представлена в виде [12, 15]:

$$F = \Phi(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r) Fr(\omega) P(\xi_x, \xi_y, W), \quad (1)$$

где $\Phi(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r)$ – геометрический коэффициент, зависящий от зенитного θ_s и азимутального φ_s углов падающих солнечных лучей, зенитного θ_r и азимутального углов φ_r лучей, отраженных в направлении космического аппарата; $Fr(\omega)$ – коэффициент отражения излучения Френеля; ω – половинный угол между этими лучами; $P(\xi_x, \xi_y, W)$ – двумерная плотность вероятностей ортогональных компонент уклонов морской поверхности ξ_x, ξ_y ; W – скорость ветра (м/с) на высоте 10 м над уровнем невозмущенной поверхности моря.

Одним из основных факторов, ограничивающих точность определения скорости ветра по данным оптических измерений, является стохастичность связи скорости ветра и характеристик распределения уклонов морской поверхности.

Введем обозначения: ξ_u и ξ_c – продольная и поперечная относительно направления ветра компоненты уклонов (индекс u соответствует продольной компоненте, индекс c – поперечной). В принятых обозначениях двумерная плотность вероятностей уклонов описывается усеченным (до слагаемых 4-го порядка включительно) распределением Грама–Шарлье [12, 16]:

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

Здесь $P_G(\xi_c, \xi_u, W) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{\tilde{\xi}_c^2 + \tilde{\xi}_u^2}{2}\right)$ – распределение Гаусса; $\tilde{\xi}_u = \xi_u/\sigma_u$, $\tilde{\xi}_c = \xi_c/\sigma_c$; σ_u^2 и σ_c^2 – дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов; H_i – полиномы Чебышева–Эрмита i -го порядка. Первый индекс коэффициента C_{ij} соответствует поперечной компоненте уклона, второй – продольной. При моделировании плотности вероятностей уклонов используется форма типа А рядов Грама–Шарлье.

Зависимость плотности вероятностей уклонов от скорости ветра

Для дальнейшего анализа воспользуемся результатами измерений уклонов морской поверхности, представленными в работе [12]. Средние значения дисперсии компонент уклонов и коэффициентов C_{ij} , а также среднеквадратические отклонения (СКО) от них представлены в таблице.

Параметры функции плотности вероятностей уклонов морской поверхности в форме (2)

Параметр	Среднее значение	СКО
σ_c^2	$0,003 + 0,00185W$	0,0005
σ_u^2	$0,001 + 0,00316W$	0,0005
C_{21}	$-0,0009W^2$	0,01
C_{03}	$-0,45[1 + \exp(7 - W)]^{-1}$	0,01
C_{40}	0,3	0,05
C_{22}	0,12	0,03
C_{04}	0,4	0,1

Из таблицы видно, что функция плотности вероятностей уклонов морской поверхности зависит от W через параметры σ_c^2 , σ_u^2 и коэффициенты C_{21} , C_{03} .

Следует отметить, что распределение (2) справедливо только в ограниченной области изменения уклонов, заданной условиями [16]:

$$|\xi_c| < 2,5\sigma_c \text{ и } |\xi_u| < 2,5\sigma_u. \quad (3)$$

Это накладывает ограничения на диапазоны углов падения и отражения солнечного излучения при аналитическом построении двухнаправленной функции рассеяния для морской поверхности [17]. В настоящей статье анализ ограничим ситуациями, когда отражение излучения в направлении на оптический сканер определяют уклоны, удовлетворяющие условию (3).

На рис. 1 представлены четыре семейства сечений двумерных плотностей вероятностей уклонов морской поверхности, построенные при разных скоростях ветра. Видно, что на каждом сечении $P(\xi_c = \text{const}, \xi_u, W)$ можно выделить область, внутри которой плотность вероятностей монотонно уменьшается с ростом скорости ветра. Этой области соответствуют малые значения ξ_u . Существуют также две области, где плотность вероятностей растет с ростом скорости ветра (большие значения ξ_u), и две промежуточные области, где с ростом скорости ветра наблюдается немонотонное изменение плотности вероятностей.

Рассмотрим более подробно, как с изменением скорости ветра при фиксированных значениях ξ_c и ξ_u меняется плотность вероятностей уклонов морской поверхности (рис. 2). Для приведения к единому масштабу каждая кривая нормирована на свое максимальное значение в диапазоне 1,5–15 м/с, т.е.

$$PN(\xi_c, \xi_u, W) = P(\xi_c, \xi_u, W) / \max[P(\xi_c, \xi_u, W)]. \quad (4)$$

В области $|\xi_u| > 0,2$ характер зависимости плотности вероятностей уклонов от ветра не меняется, имеет место монотонный рост значений PN с ростом скорости ветра.

Расчет скорости ветра по интенсивности отраженного солнечного излучения возможен только для тех участков поверхности, сигнал от которых

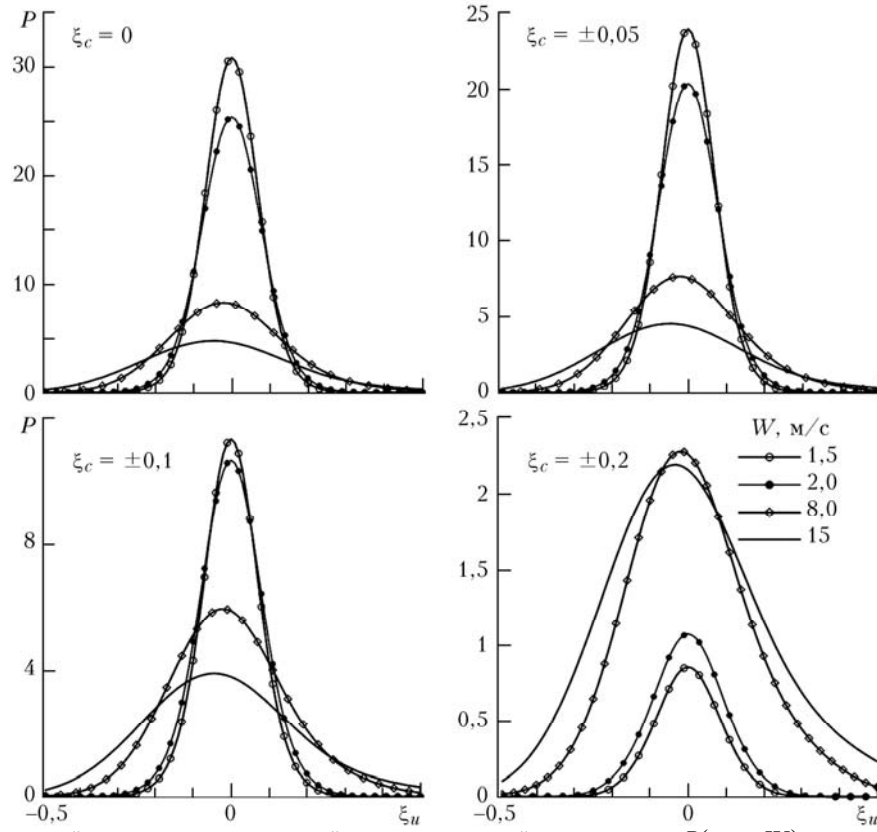


Рис. 1. Сечения двумерной плотности вероятностей уклонов морской поверхности $P(\xi_c, \xi_u, W)$, построенные при разных скоростях ветра W

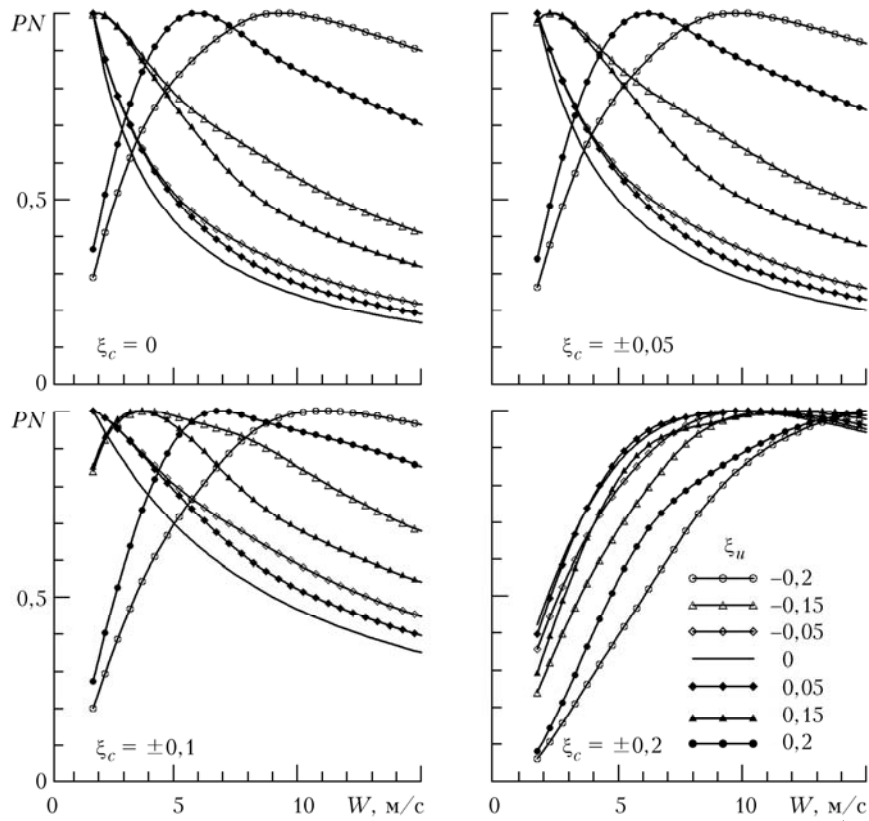


Рис. 2. Зависимости нормированной плотности вероятностей уклонов морской поверхности $PN(\xi_c, \xi_u, W)$ от скорости ветра W

однозначно связан со скоростью ветра. Как следует из рис. 2, модули компонент уклонов на таких участках должны быть меньше некоего критического значения ξ_k .

Величину ξ_k определить сложно, поскольку распределение $P(\xi_c, \xi_u, W)$ зависит от большого числа слабо связанных между собой параметров, являющихся статистическими характеристиками уклонов. Значение ξ_k лежит между 0,05 и 0,1, и дальнейший анализ будем проводить для области

$$|\xi_c| < 0,05 \text{ и } |\xi_u| < 0,05. \quad (5)$$

Из рис. 2 видно, что существует еще одна область однозначной связи $P(\xi_c, \xi_u, W)$ со скоростью ветра, где $|\xi_c| > 0,15$ и $|\xi_u| > 0,15$. Но ее использование нецелесообразно, поскольку интенсивность отраженного излучения за пределами солнечного блика относительно мала и там заметный вклад в сигнал, регистрируемый оптическим сканером, наряду с отражением от морской поверхности дают другие физические механизмы [14].

Погрешность определения скорости приводного ветра

Введем обозначение dW – погрешность определения скорости ветра. Для ее нахождения необходимо решить относительно переменной dW уравнение

$$P_0(\xi_c, \xi_u, W + dW) - P_\Delta(\xi_c, \xi_u, W) = 0, \quad (6)$$

где $P_0(\xi_c, \xi_u, W)$ – распределение (2), построенное при средних значениях, определяющих его параметры (см. таблицу); $P_\Delta(\xi_c, \xi_u, W)$ – распределения (2), построенные при параметрах, отклоняющихся от среднего на величину СКО. Распределение (2) является многопараметрическим. Рассмотрим сначала, как на расчет скорости ветра влияет неоднозначность связи между скоростью ветра и дисперсией уклонов. Затем проанализируем, к каким погрешностям при фиксированных скоростях ветра приводит разброс статистических моментов уклонов морской поверхности третьего и четвертого порядков.

Абсолютная величина погрешности dW_G , обусловленной неоднозначностью связи энергии коротких поверхностных волн, дающих основной вклад в дисперсию уклонов, рассчитывалась для двух случаев: когда распределение уклонов описывается распределением (2) и распределением Гаусса, также применяющимся для описания уклонов морской поверхности. Расчеты показали, что в области (5) для обоих случаев $|dW_G| = 0,2 \pm 0,01$ м/с и практически не зависит от скорости ветра. Учитывая классы геофизических задач, которые в настоящее время решаются с помощью средств дистанционного зондирования, этим разбросом можно пренебречь.

Рассмотрим погрешность dW_N , вызванную нелинейностью коротких волн, которая приводит

к отклонениям распределений уклонов от распределения Гаусса. В отличие от погрешности dW_G погрешность dW_N оказалась зависящей от скорости ветра. Величины $|dW_N|$ представлены на рис. 3.

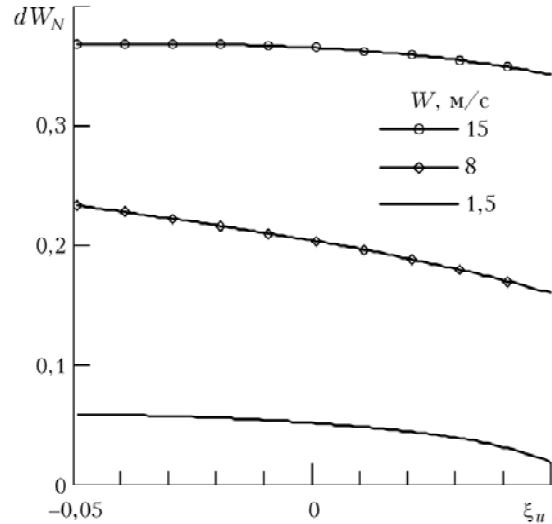


Рис. 3. Погрешность определения скорости ветра dW_N , вызванная отклонением реальных распределений уклонов от распределения Гаусса P_G

Расчет проведен для ситуации, когда все изменения коэффициентов C_{ij} направлены в сторону увеличения отклонения $P(\xi_c, \xi_u)$ от распределения Гаусса. Поскольку погрешности dW_N при изменении ξ_c в пределах области (5) различаются незначительно, на рис. 3 показаны результаты расчетов для $\xi_c = \pm 0,025$.

Следует отметить, что проведенный нами анализ, как и авторами [12, 13, 16], выполнен в рамках предположения, что угловая зависимость сигнала оптического сканера определяется только топографическими характеристиками морской поверхности. Искажающее действие атмосферы как рассеивающей среды [18], а также влияние пенных образований, возникающих при обрушении волн, не рассматривались [19].

Заключение

Необходимым условием дистанционного определения скорости приводного ветра является наличие области углов падения и отражения, в которой интенсивность отраженного морской поверхностью солнечного излучения однозначно связана со скоростью ветра. Единственной характеристикой морской поверхности, входящей в двунаправленную функцию рассеяния, которая зависит от скорости ветра, является двумерная функция плотности вероятностей уклонов. Было необходимо определить области уклонов, в пределах которых изменения плотности вероятностей однозначно связаны с ветром. Таких областей оказалось две: соответствующие малым и большим значениям уклонов. Область больших уклонов необходимо исключить, поскольку

ку интенсивность отраженного излучения за пределами солнечного блика мала. Определение скорости ветра можно проводить, если отражение излучения в направлении космического аппарата создают уклоны морской поверхности, у которых каждая из двух ортогональных компонент меньше 0,05.

Погрешность определения скорости ветра можно разделить на две составляющие. Первая обусловлена неоднозначностью связи энергии коротких поверхностных волн и скорости ветра. Она не зависит от скорости ветра и равняется 0,2 м/с. Вторая составляющая обусловлена отклонениями распределения уклонов от распределения Гаусса. Эта составляющая растет с усилением ветра, меняясь от уровня 0,1 м/с при скорости ветра 1,5 м/с до 0,4 м/с при скорости ветра 15 м/с.

1. Moore R.K., Pierson W.J. Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite // Proc. Int. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites. Miami Beach, FL. 1966. Nov. 22–24. P. R1–R28.
2. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физ. наук. 1975. Т. 116, вып. 4. С. 741–743.
3. Кортаев Г.К., Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н. Дистанционное зондирование морей и океанов. Развитие работ в области спутниковой океанологии // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте НАН Украины за 75 лет. Севастополь: МГИ, 2004. С. 585–625.
4. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
5. Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Нивина Т.А., Показеев К.В. Экспериментальное исследование тонкой структуры поля ветра вблизи взволнованной поверхности // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42, № 5. С. 703–709.
6. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С., Смолов В.Е. Зависимость амплитудных характеристик высокочастотных компонент спектра ветровых волн от скорости ветра над морем // Морской гидрофиз. ж. 1993. № 3. С. 67–77.
7. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С., Смолов В.Е., Бабий М.В. Корреляции между высокочастотными ветровыми волнами и ветром над морем // Докл. АН Ук-
- раины. Сер. Математика, Естествознание, Технические науки. 1993. № 9. С. 113–117.
8. Запезалов А.С. Зависимость статистики бликов зеркального отражения при лазерном зондировании морской поверхности от характеристик ее локальных уклонов // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 12. С. 1123–1127.
9. Христофоров Г.Н., Запезалов А.С., Смолов В.Е. О предельной точности скатернометрического определения со спутника скорости ветра над океаном // Исслед. Земли из космоса. 1987. № 2. С. 57–65.
10. Запезалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49–54.
11. Бабий В.И., Гайский В.А., Запезалов 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.
12. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geophys. Res. Oceans. C. 2006. V. 111, N 6. P. C06005.
13. Wald L., Monget J.M. Sea surface winds from sun glitter observations // J. Geophys. Res. C. 1983. V. 88, N 4. P. 2547–2555.
14. Лебедев Н.Е. Определение скорости приводного ветра и степени загрязненности морской поверхности по излучению, регистрируемому спутниковыми оптическими сканерами в зоне солнечного блика // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАНУ, 2013. № 27. С. 49–54.
15. Sayer A.M., Thomas G.E., Grainger R.G. A sea surface reflectance model for (A)ATSR, and application to aerosol retrievals // Atmos. Meas. Technol. Discuss. 2010. V. 3, iss. 16. P. 1023–1098.
16. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44, N 11. P. 838–850.
17. Запезалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 28–33.
18. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат. 1986. 256 с.
19. Белохвостиков А.В., Белов М.Л., Орлов В.М. Влияние пены на поле яркости системы «океан–атмосфера» // Оптика атмосфер. 1990. Т. 3, № 7. С. 743–747.

A.S. Zapevalov, N.E. Lebedev, K.V. Pokazeev. Influence of sea surface topography on the error of wind speed measurement with satellite optical scanners.

The error of the wind speed determining by means of optical scanners, caused by the variety of physical factors forming topographic structure of the sea surface, is analyzed. It is shown that this error consists of two components. The first one is caused by the stochastic nature of a relation between wind speed and energy of short surface waves, it does not depend on the average wind speed and has a value of 0.2 m/s. The second one is due to deviation of the sea surface slope distribution from Gaussian; it increases with wind speed, varying from 0.1 m/s when the wind speed is 1.5 m/s to 0.4 m/s when the wind speed is 15 m/s.