Измерения уклонов морской поверхности путем лазерного зондирования с космических аппаратов

К.В. Показеев, ^{1,*a*}, А.С. Запевалов^{2,*b*}, Н.Е. Лебедев^{2,*c*}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Морской гидрофизический институт РАН. Россия, 299011, Севастополь, Капитанская ул., д. 2.

E-mail: ^a sea@phys.msu.ru, ^b sevzepter@mail.ru, ^c nick_leb@mail.ru

Статья поступила 23.06.2016, подписана в печать 06.09.2016.

Анализируются ошибки измерений дисперсии уклонов морской поверхности с помощью лидаров, установленных на борту космических аппаратов. Рассмотрены ошибки, вызванные отклонениями реального волнового поля от гауссовой изотропной поверхности. Показано, что неучтенные отклонения распределений уклонов от распределения Гаусса приводят к систематическому занижению расчетных величин дисперсии, составляющему 11–14%. Показано, что анизотропией уклонов при расчете их дисперсии по данным вертикального лазерного зондирования с космических аппаратов можно пренебречь.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, уклоны морской поверхности, оптические измерения, лидар.

УДК: 535.016. PACS: 78.67.-п.

Введение

Шероховатость границы раздела вода-воздух определяет любой процесс, в котором акустические или электромагнитные волны взаимодействуют с морской поверхностью, она влияет на интенсивность процессов обмена между атмосферой и океаном. К числу основных параметров, которые характеризуют шероховатость, относятся уклоны морской поверхности.

Одним из наиболее перспективных методов исследования характеристик морской поверхности является метод лазерного зондирования. В рамках этого метода можно выделить два направления. Первое направление (индикация бликов) используется в условиях, когда зондирование осуществляется с небольшой высоты (порядка 10 м), и лазерное пятно на поверхности имеет диаметр несколько миллиметров [1, 2]. В освещенную область периодически попадают участки поверхности, наклон которых удовлетворяет условию отражения лазерного луча в апертуру фотоприемника [3]. Сигнал на выходе фотоприемника представляет последовательность импульсов разной длительности и амплитуды, по которой рассчитываются характеристики морской поверхности [4].

При зондировании с большой высоты (с борта космического аппарата) пятно на морской поверхности имеет диаметр в несколько десятков метров [5]. При этом освещаемая лазером область содержит большое число элементов, удовлетворяющих условию зеркального отражения. В этом случае расчеты характеристик морской поверхности проводятся на основе моделей, построенных для анализа сигналов оптических сканеров космического базирования [6–8]. Общим недостатком расчетов статистических оценок уклонов морской поверхности, по данным лазерного зондирования, является то, что они позволяют получать статистические оценки уклонов только в рамках *a priori* построенных моделей [9]. Как правило, распределение уклонов предполагается гауссовым и изотропным [10, 11]. Целью настоящей работы является анализ погрешностей, вносимых данными предположениями в расчеты дисперсии уклонов морской поверхности при лазерном зондировании с космических аппаратов.

1. Зеркальное отражение света от морской поверхности

Регистрируемый на космическом аппарате сигнал, возникающий в результате отражения солнечных лучей от морской поверхности, связан со статистическим распределением ее уклонов. Зеркальное отражение солнечного света от морской поверхности описывается двунаправленной функцией рассеяния, которая определяет отношение яркости зеркально отраженного поверхностью излучения $I_r(\theta_r, \varphi)$ к плотности потока солнечного излучения $H_s(\theta_s, \varphi = 0)$ [7]

$$R = \frac{\pi I_r(\theta_r, \varphi)}{H_s(\theta_s, \varphi = 0) \cos \theta_s} = \frac{\pi F_w(\beta)}{4 \cos \theta_s \cos \theta_v \cos^4 \beta} P(\xi_x, \xi_y),$$
(1)

где θ_s и θ_r — зенитные углы падающих солнечных лучей и лучей, отраженных в направлении космического аппарата; $F_{w}(\beta)$ — коэффициент отражения Френеля для морской воды; $P(\xi_x, \xi_y)$ — двумерная плотность вероятностей ортогональных компонент уклонов морской поверхности ξ_x и ξ_y ; β — угол наклона морской поверхности, определяемый условием tg $\beta = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$. Здесь угол $\beta = \frac{1}{2} \arccos(\cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \sin \varphi)$.

(2)

Условие зеркального отражения имеет вид $\theta_s = \theta_v, \quad \varphi = \pi.$ При выполнении данных условий выражение (1) можно использовать для анализа данных лазерного зондирования морской поверхности. Если луч лидара направлен вертикально вниз, то $\theta_s = \theta_s = \beta = 0$. Использование функции Rпредполагает, что длительность лазерного импульса достаточно велика и одновременно вклад в отраженный сигнал дают все элементы поверхности, удовлетворяющие условию зеркального отражения. Если лазерный импульс короткий, то отражение от элементов поверхности, расположенных вблизи гребня и вблизи впадины, происходит в разные моменты времени. В этом случае необходимо учитывать распределение отражающих элементов по высоте [12].

При интерпретации результатов лазерного зондирования морской поверхности обычно предполагают, что двумерное распределение уклонов является изотропным и гауссовым [5, 11]. В рамках этого предположения получено [10]

 $R = \frac{F_{w}(\beta)}{4\pi\sigma^{2}\cos^{4}\beta} \exp\left(-\frac{\mathrm{tg}^{2}\beta}{2\sigma^{2}}\right),$

где

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2, \tag{3}$$

 σ_x^2 и σ_y^2 — дисперсии ортогональных компонент уклонов, которые предполагаются равными. Если зондирование проводят лазером в надир, приняв $\beta \approx 0$, получают tg $\beta \approx 1$, соs $\beta \approx 1$ и из (2) следует

$$R = F_{w}(0) / (4\pi\sigma^2). \tag{4}$$

Натурные измерения показали, что поле уклонов морской поверхности не гауссово и не изотропно. Оценим, к каким погрешностям приводят расчеты дисперсии уклонов, выполненные в рамках модели изотропного гауссова поля.

2. Отклонения распределений уклонов морской поверхности от распределения Гаусса

Путем математического моделирования было показано, что межволновые взаимодействия, динамическое воздействие длинных волн на более короткие и ряд других физических механизмов приводят к отклонению распределений характеристик поверхностных волн от распределения Гаусса [13, 14]. Экспериментальные исследования, выполненные в натурных условиях, подтвердили, что распределение уклонов является квазигауссовым [7, 15, 16]. Для описания плотности вероятностей подобных распределений используются аппроксимации, построенные на основе рядов Грама–Шарлье [17].

Двумерная плотность вероятностей, построенная для продольной ξ_u и поперечной ξ_c относительно вектора скорости ветра компонент уклонов, описывается моделью [15]

$$P(\xi_c,\xi_u) = P_G(\xi_c,\xi_u) \left[1 - \frac{1}{2}C_{21}H_2\left(\frac{\xi_c}{\sigma_c}\right)H_1\left(\frac{\xi_u}{\sigma_u}\right) + \right]$$

$$+\frac{1}{4}C_{22}H_2\left(\frac{\xi_c}{\sigma_c}\right)H_2\left(\frac{\xi_u}{\sigma_u}\right) - \frac{1}{6}C_{03}H_3\left(\frac{\xi_u}{\sigma_u}\right) + \\ +\frac{1}{24}\left(C_{04}H_4\left(\frac{\xi_u}{\sigma_u}\right) + C_{40}H_4\left(\frac{\xi_c}{\sigma_c}\right)\right)\right], \quad (5)$$

где

$$P_G(\xi_c, \xi_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi_c^2}{\sigma_c^2} + \frac{\xi_u^2}{\sigma_u^2}\right)\right]$$

— распределение Гаусса; 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.

Оценим, к каким ошибкам в определении дисперсии уклонов морской поверхности приводят расчеты в рамках предположения, что распределение уклонов является гауссовым. При лазерном зондировании отражение в направлении космического аппарата создают фацеты, ориентация которых близка к горизонтальной, т. е. можно принять, что $\xi_u = \xi_c = 0$. Полиномы H_1 и H_3 являются нечетными функциями, поэтому при малых углах падения вкладом членов, пропорциональных этим полиномам, можно пренебречь. Полиномы H_2 и H_4 являются четными функциями. Учитывая, что $H_2(0) = -1$, $H_4(0) = 3$, для $\xi_u \approx \xi_c \approx 0$ получаем

$$P(\xi_c, \xi_u) \approx P_G(\xi_c, \xi_u) \left[1 + \frac{C_{22}}{4} + \frac{C_{04} + C_{40}}{8}\right]$$

Следует отметить, что выражение (5) корректно описывает плотность вероятностей уклонов морской поверхности только в ограниченной области [18, 19]. Данная область определяется условиями $|\xi_c/\sigma_c| < 2.5$ и $|\xi_u/\sigma_u| < 2.5$ [15], которые всегда выполняются при вертикальном лазерном зондировании.

Натурные исследования, выполненные с помощью разных типов аппаратуры, показали, что коэффициенты C_{22} , C_{04} и C_{40} не зависят от скорости ветра. Величины указанных коэффициентов, полученные в результате обработки аэрофотоснимков [15], обработки данных оптических сканеров, установленных на космических аппаратах [7], в экспериментах, проведенных в морских условиях с помощью лазерных измерителей уклонов [20], приведены в таблице.

Оценки коэффициентов C_{22} , C_{04} и C_{40}

	Работа [15]	Работа [7]	Работа [<mark>20</mark>]
<i>C</i> ₂₂	0.12 ± 0.06	0.12 ± 0.03	0.17 ± 0.27
<i>C</i> ₀₄	0.23 ± 0.41	0.40 ± 0.10	0.43 ± 0.46
<i>C</i> ₄₀	0.40 ± 0.23	0.30 ± 0.05	0.33 ± 0.43

Во всех указанных экспериментах средние значения коэффициентов C_{22} , C_{04} и C_{40} положительны. Это означает, что оценки дисперсии σ^2 , полученные с помощью выражения (4) по данным лазерного зондирования, имеют систематическую ошибку, соответствующую занижению ее значений. Средняя величина ошибки, рассчитанная для приведенных значений выше средних значений коэффициентов C_{22} , C_{04} и C_{40} , составляет от 11 до 14%.

3. Анизотропии уклонов морской поверхности

Угловое распределение уклонов по направлениям не является изотропным. Дисперсия уклонов, ориентированных в направлении ветра, выше, чем дисперсия в поперечном направлении. В качестве параметра, характеризующего анизотропию уклонов, обычно используется показатель трехмерности, равный отношению среднеквадратических значений уклонов в поперечном σ_c и продольном σ_u направлениях [21]:

 $\gamma = \sigma_c / \sigma_u$.

Для волн с длинным гребнем параметр γ приближается к нулю, для волн с короткими гребнями он приближается к единице.

Проанализируем, как анизотропия уклонов влияет на характеристики отражения при лазерном зондировании. Перейдем в выражении (5) от декартовой к полярной системе координат. Для этого представим две ортогональные компоненты уклонов в виде

$$\xi_c = \xi_m \sin \varphi, \quad \xi_u = \xi_m \cos \varphi,$$

где $\xi_m = \sqrt{\xi_u^2 + \xi_c^2}$ — модуль уклона; $\varphi =$ = arctg(ξ_c/ξ_u) — азимутальный угол. Для функции плотности вероятностей условие перехода к новым переменным

$$p(\xi_m,\varphi) = \frac{\partial(\xi_c,\xi_u)}{\partial(\xi_m,\varphi)}P(\xi_c,\xi_u),$$

где $\frac{\partial(\xi_c,\xi_u)}{\partial(\xi_m,\varphi)} = \xi_m - якобиан.$

Если компоненты уклонов ориентированы вдоль и поперек направления ветра, выражение (3) можно записать в виде $\sigma^2 = (1 + \gamma^2)\sigma_u^2$. Введем нормировку $\tilde{\xi}_m = \xi_m/\sigma$. Из выражения (5), пренебрегая членами, пропорциональными полиномам H_i с нечетными индексами i, получаем

$$p(\xi_m,\varphi) = p_{G\varphi}(\xi_m,\varphi) \times \left[1 + \frac{1}{4}C_{22}H_2\left(\frac{\widetilde{\xi}_m\sin\varphi}{\left(1+\gamma^{-2}\right)^{-1/2}}\right)H_2\left(\frac{\widetilde{\xi}_m\cos\varphi}{\left(1+\gamma^2\right)^{-1/2}}\right) + \frac{1}{24}\left(C_{04}H_4\left(\frac{\widetilde{\xi}_m\cos\varphi}{\left(1+\gamma^2\right)^{-1/2}}\right) + C_{40}H_4\left(\frac{\widetilde{\xi}_m\sin\varphi}{\left(1+\gamma^{-2}\right)^{-1/2}}\right)\right)\right],$$
(6)

где $p_{G\varphi}(\xi_m, \varphi)$ — распределение, соответствующее ситуации, когда компоненты ξ_c и ξ_u распределены по закону Гаусса.

Отраженный от морской поверхности луч попадает в апертуру фотоприемника лидара, если модуль уклона ξ_m меньше некоего критического значения ξ_{m0} независимо от ориентации уклона φ . Исключим в (6) зависимость от φ , проинтегрировав $p(\xi_m, \varphi)$ по всем направлениям $p_m(\xi_m) = \int_{-\infty}^{2\pi} p(\xi_m, \varphi) d\varphi$.

Пусть компоненты уклонов распределены по закону Гаусса. В случае $\gamma = 0$, что соответствует двумерному волновому полю, плотность вероятности модуля уклона соответствует распределению модуля случайной величины, распределенной по нормальному закону с равным нулю математическим ожиданием

$$p_{mG}(\widetilde{\xi}_m, \gamma = 0) = rac{2}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-rac{\widetilde{\xi}_m^2}{2}
ight).$$

При $\gamma = 1$ модуль уклона $\tilde{\xi}_m$ подчиняется распределению Рэлея:

$$p_{mG}(\widetilde{\xi}_m, \gamma = 1) = 2\widetilde{\xi}_m \cdot \exp\left[-\widetilde{\xi}_m\right].$$

Здесь нижний индекс G указывает на то, что распределение модуля уклонов получено для ситуации, когда компоненты уклона распределены по закону Гаусса. Если двумерное распределение уклонов описывается выражением (5), то соответствующее распределение модуля уклонов обозначается нижним индексом N.

По данным измерений, выполненных в натурных условиях с помощью лазерного уклономера [16],



Рис. 1. Модели плотности вероятностей модуля уклона морской поверхности

значения показателя трехмерности лежат в пределах $0.66 < \gamma < 0.95$ при среднем значении $\gamma = 0.8$. Зависимость параметра γ от скорости ветра не наблюдалась. Согласно измерениям, выполненным с помощью оптических сканеров [7], параметр γ меняется от $\gamma = 0.9$ при скорости ветра 3 м/с, до $\gamma = 0.8$ при скорости ветра 15 м/с. Влияние изменений показателя трехмерности на плотность вероятностей уклонов морской поверхности показано на рис. 1. Для случая, когда компоненты уклонов ξ_c и ξ_u pacпределены по закону Гаусса, построены три модели, соответствующие двумерному ($\gamma = 0$), изотропному $(\gamma = 1)$ полям уклонов, а также волновому полю, для которого $\gamma = 0.66$, что соответствует нижней границе наблюдаемых значений параметра γ [16]. Видно, что с уменьшением параметра γ плотность вероятностей $p_{mG}(\xi_m, \gamma)$ в области малых значений $\tilde{\xi}_m$ растет.

Также показано, что для изотропного поля уклонов к росту плотности вероятностей $p_{mG}(\tilde{\xi}_m, \gamma)$ в области малых значений $\tilde{\xi}_m$ приводят отклонения компонент уклонов ξ_c и ξ_u от распределения Гаусса (см. рис. 1). Расчеты выполнены для значения $\gamma = 0.8$, соответствующего средней величине показателя трехмерности.

4. Количественные оценки

При вертикальном зондировании отраженный от морской поверхности лазерный луч попадает в апертуру фотоприемника, если модуль уклона ξ_m не превышает некоего критического значения ξ_{m0} . Амплитуда регистрируемого на космическом аппарате сигнала прямо пропорциональна вероятности того, что

$$\xi_m \leqslant \xi_{m0}.\tag{7}$$

Поскольку дисперсия уклонов зависит от скорости ветра, одному и тому же значению ξ_{m0} при разных скоростях ветра будут соответствовать разные значения $\tilde{\xi}_{m0}$. Лазерный луч является узконаправленным. Так, полуширина лазерного луча лидара CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), установленного на борту космического аппарата CALIPSO [5], составляет $5 \cdot 10^{-5}$ рад. Соответственно при вертикальном зондировании критическое значение модуля уклона равно $5 \cdot 10^{-5}$. Зондирование с CALIPSO осуществлялось при угле падения $5.2 \cdot 10^{-3}$ рад (или 0.3°). В этом случае критическое значение модуля уклона определяется выражением $\operatorname{arctg}(\xi_{m0}) = 5.42 \cdot 10^{-3}$ рад.

Изменения параметра $\tilde{\xi}_{m0}$ с ростом скорости ветра W в ситуации, когда $\operatorname{arctg}(\xi_{m0}) = 5.42 \cdot 10^{-3}$ рад, показаны на рис. 2. Для расчетов использовались регрессионные зависимости дисперсий компонент уклонов от скорости ветра, полученные в работе [7]:

$$\sigma_u^2 = 10^{-3} + 3.16 \cdot 10^{-3} W \pm 5 \cdot 10^{-4},$$

$$\sigma_c^2 = 3 \cdot 10^{-3} + 1.85 \cdot 10^{-3} W \pm 5 \cdot 10^{-4}.$$



Рис. 2. Зависимость параметра ξ_{m0} от скорости ветра W для ситуации, соответствующей условиям лидарного зондирования CALIOP

При изменении скорости ветра в пределах от 1 до 15 м/с значения $\tilde{\xi}_{m0}$ меняются от 0.055 до 0.019, если $\xi_{m0} = 5.42 \cdot 10^{-3}$, и меняются от $5.3 \cdot 10^{-4}$ до $1.8 \cdot 10^{-4}$, если $\xi_{m0} = 5 \cdot 10^{-5}$.

Чтобы количественно оценить эффекты, вызванные тем, что поле коротких поверхностных волн не является изотропным, введем параметр

$$\varepsilon(\gamma) = F_G(\gamma)/F_G(\gamma = 1),$$

где F — вероятность того, что модуль уклона ξ_m удовлетворяет условию (7).



Рис. 3. Изменения плотности вероятностей модуля уклона морской поверхности $p_{mG}(\tilde{\xi}_m, \gamma)$ в области малых значений параметра $\tilde{\xi}_m$

На рис. З видно, что в области малых значений модуля уклона, соответствующих указанным значениям $\tilde{\xi}_{m0}$, его плотность вероятностей можно аппроксимировать линейной зависимостью. Угол наклона данной аппроксимации меняется с изменением параметра γ , соответственно меняется вероятность F. Расчеты на основе данных измерений, полученных с помощью лазерного уклономера [16], показали, что при среднем значении показателя трехмерности $\gamma = 0.8$ параметр $\varepsilon = 1.025$, при $\gamma = 0.66$ параметр $\varepsilon = 1.088$. По данным измерений оптическими сканерами [7], значения параметра γ меняются от 0.9 при скорости ветра W = 3 м/с до $\gamma = 0.8$ при W = 15 м/с. Для указанных значений параметра γ , рассчитанных с помощью регрессионных уравнений (8) и (9), ε ≤ 1.025.

Заключение

Проведен анализ ошибок измерения дисперсии уклонов морской поверхности лазерами космического базирования. Рассмотрены ошибки, вызванные отклонениями реального волнового поля от гауссовой изотропной поверхности. Для анализа использованы данные, полученные с помощью лазерных уклономеров, а также с помощью оптических сканеров, установленных на космических аппаратах.

Показано, что неучтенные отклонения распределений уклонов от распределения Гаусса приводят к систематической ошибке в 11-14%. Рассчитанные значения дисперсии уклонов оказываются заниженными. Анизотропия уклонов морской поверхности приводит к ошибке, которая также систематически занижает значения дисперсии. Величина этой ошибки в среднем менее 3%, и ею по сравнению с ошибкой, вызванной негауссовым характером распределений уклонов, можно пренебречь.

Список литературы

- 1. Носов В.Н., Пашин С.Ю., Хандогин Д.Н. и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. 26, № 2. C. 206.
- 2. Александров А.П., Легеза В.П. // Морской гидрофизический журнал. 1988. № 6. С. 51.

- 3. Лебедев Н.Е., Алескерова А.А., Плотников Е.М. // Соврем. пробл. исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. C. 102.
- 4. Khristoforov G.N., Zapevalov A.S., Smolov V.E. et al. // Phys. Oceanogr. 1994. 5, N 6. P. 461.
 5. Hu Y., Stamnes K., Vaughan M. et al. // Atmos. Chem.
- and Phys. 2008. N 8. P. 3593.
- 6. Ebuchi N., Kizu S. // J. Oceanogr. 2002. 58. P. 477.
- 7. Bréon F.M., Henriot N. // J. Geophys. Res. 2006. 111, N 6. C06005.
- 8. Лебедев Н.Е., Пустовойтенко В.В., Показеев К.В. и др. // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2014. 11, № 3. С. 310.
- 9. Запевалов А.С., Показеев К.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 5. С. 53. (Zapevalov A.S., Pokazeev K.V. // Moscow University Phys. Bull. 2004. 59, N 5. P. 47.)
- 10. Ginneken B., Stavridi M., Koenderink J. // Appl. Optics. 1998. 37. P. 130.
- 11. Barton J.S., Jasinski M.F. // Remote Sens. 2011. 3. P. 1492.
- 12. Показеев К.В., Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 5. С. 80. (Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. // Moscow University Phys. Bull. 2013. 68, N 5. P. 420.)
- 13. Phillips O.M. // J. Fluid Mech. 1961. 11. P. 143.
- 14. Longuet-Higgins M.S. // J. Phys. Oceanogr. 1982. 12. P. 1283.
- 15. Cox C., Munk W. // J. Opt. Soc. Amer. 1954. 44, № 11. P. 838.
- 16. Zapevalov A.S. // Phys. Oceanogr. 2002. 12, N 1. P. 24.
- 17. Запевалов А.С., Лебедев Н.Е. // Оптика атмосферы и океана. 2014. 27, № 1. С. 28.
- 18. Tatarskii V.I. // J. Atmos. Oceanic Technol. 2003. 20. P. 1697.
- 19. Zapevalov A.S., Pustovoitenko V.V. // Radiophys. Quant. Electron. 2010. 53, N 2. P. 100.
- 20. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В. // Океанология. 1992. 32, № 3. С. 452.
- 21. Лонге-Хиггинс М.С. // Ветровые волны. М.: Иностранная литература, 1962. С. 125.

Measurements of sea surface slopes by laser sensing from a space vehicle K. V. Pokazeev^{1,a}, A. S. Zapevalov^{2,b}, N. E. Lebedev^{2,c}

¹Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences. Sevastopol 299001, Russia. E-mail: ^a sea@phys.msu.ru, ^b sevzepter@mail.ru, ^c nick_leb@mail.ru.

The measurement errors of dispersions of sea surface slopes using spacecraft lidar were analyzed. The errors caused by deviations of the actual wave field from the Gaussian isotropic surface were considered. It is revealed that the unaccounted deviations of slope distributions from the Gaussian distribution lead to a systematic underestimation of the calculated slope dispersion by approximately 11-14%. In addition, it is revealed that the anisotropy of slopes during their dispersion calculation using the data of vertical laser sensing from space vehicle can be neglected.

Keywords: remote sensing, sea surface slopes, optical measurements, lidar. PACS: 78.67.-n. Received 23 June 2016. English version: Moscow University Physics Bulletin. 2017. 72, No. 4. Pp. 410-414.

Сведения об авторах

- 1. Показеев Константин Васильевич доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.
- 2. Запевалов Александр Сергеевич доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; e-mail: sevzepter@mail.ru.
- 3. Лебедев Николай Евгеньевич канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: nick_leb@mail.ru.