

ВЛИЯНИЕ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ ВПЕРЕД НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОВОГО ПУЧКА В МОРСКОЙ ВОДЕ

© 2010 г. Ю. И. Копилевич, канд. физ.-мат. наук; М. Е. Кононенко; Е. И. Задорожная

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: yurikopilevich@gmail.com

В приближении малоуглового рассеяния исследована зависимость светового поля ограниченного пучка излучения в мутной среде от формы индикатрисы рассеяния вперед. Проанализирован вклад малоуглового рассеяния в показатель ослабления отдельных пространственных гармоник исходного распределения яркости пучка. Расчеты проведены с экспериментально измеренными Петцольдом объемными функциями рассеяния для трех типов морской воды (“clear ocean”, “coastal ocean” и “turbid harbor”), модельной индикатрисой Долина, а также в малоугловом диффузионном приближении. Рассмотрено влияние “малоугловой” индикатрисы рассеяния на показатель ослабления освещенности и размер поперечного сечения светового пучка в задаче дистанционного лазерного зондирования океана.

Ключевые слова: малоугловое рассеяние, индикатриса рассеяния, дистанционное лазерное зондирование океана.

Коды OCIS: 010.3310, 010.3640

Поступила в редакцию 12.04.2010

При описании распространения светового пучка в морской воде в приближении малоуглового рассеяния [1, 2] индикатрису рассеяния среды $x(\vartheta)$ естественно представлять суммой малоугловой и изотропной компонент [2, 3]

$$x(\vartheta) = \left(1 - 2\frac{b_b}{b}\right)x_f(\vartheta) + 2\frac{b_b}{b}, \quad (1)$$

где b – показатель рассеяния, b_b – показатель рассеяния назад; индикатриса рассеяния вперед $x_f(\vartheta)$ отлична от нуля лишь для малых углов ϑ и удовлетворяет условию нормировки [1, 2]

$$\int_0^\pi x_f(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta \approx \int_0^\pi x_f(\vartheta) \vartheta d\vartheta = 2. \quad (2)$$

Здесь и далее оптические характеристики среды полагаем независимыми от координат.

При сделанных предположениях известное аналитическое решение [2, 4] уравнения переноса излучения в малоугловом приближении определяется следующими оптическими характеристиками среды: эффективным показателем поглощения $a_1 = a + 2b_b$, показателем рассеяния на малые углы $b_1 = b - 2b_b$ и формой малоугловой компоненты индикатрисы рассеяния $x_f(\vartheta)$. Для поля яркости $I(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp)$ остронаправленного светового пучка, распространяющегося в поло-

жительном направлении оси z (\mathbf{r} – координаты в плоскости, перпендикулярной к оси z ; \mathbf{n}_\perp – проекция на эту плоскость единичного вектора направления, $\mathbf{n}_\perp \ll 1$), этому решению соответствует автомодельная зависимость фурье-образа распределения яркости

$$\begin{aligned} \tilde{I}(z, \mathbf{k}, \mathbf{p}) &= \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \iint I(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \mathbf{p} \cdot \mathbf{n}_\perp)] d^2\mathbf{r} d^2\mathbf{n}_\perp \end{aligned} \quad (3)$$

от координаты z

$$\tilde{I}(z, \mathbf{k}, \mathbf{p}) = \tilde{I}(0, \mathbf{k}, \mathbf{p} + z\mathbf{k}) \exp\{-[a_1 + a_f(zk)]z\}. \quad (4)$$

Функция $a_f(zk)$ в выражении (4) характеризует вклад малоуглового рассеяния в показатель ослабления пространственной гармоники с частотой k исходного распределения яркости на трассе распространения длиной z . Эта функция определяется показателем рассеяния на малые углы b_1 и формой малоугловой компоненты индикатрисы рассеяния $x_f(\vartheta)$

$$a_f(k) = \frac{b_1}{2k} \int_0^k [2 - \tilde{x}_f(s)] ds, \quad (5)$$

где

$$\tilde{x}_f(s) = \int_0^{\infty} x_f(\vartheta) J_0(s\vartheta) \vartheta d\vartheta \quad (6)$$

– преобразование Фурье–Бесселя от $x_f(\vartheta)$. По условию нормировки (2) имеем $\tilde{x}_f(0) = 2$, и, следовательно, $a_f(0) = 0$. С другой стороны, $\tilde{x}_f(s) \rightarrow 0$ при $s \rightarrow \infty$, и поэтому $a_f(\kappa)$ стремится к b_1 при больших значениях аргумента κ .

Для вычисления значений функции $a_f(\kappa)$ воспользуемся данными проведенных Петцольдом измерений объемных функций рассеяния $\beta(\vartheta)$ для трех типов морской воды – “clear ocean”, “coastal ocean” и “turbid harbor” [5–6]. Гидрооптические характеристики вод приведены в таблице.

Измерения $\beta(\vartheta)$ для дискретного ряда углов рассеяния $\vartheta_1 = 0,1^\circ$, $\vartheta_2 = 0,126^\circ$, $\vartheta_3 = 0,158^\circ$ и т. д. проводили для длины волны излучения $\lambda = 514$ нм, значения показателя ослабления c измерялись на 530 нм [6].

Для каждого типа воды приведенные в таблице значения среднего косинуса угла рассеяния $\overline{\cos(\vartheta)}$

$$\overline{\cos(\vartheta)} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} x(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta$$

вычислялись для кусочно-непрерывной функции $x(\vartheta)$, построенной по ряду дискретных значений $x_i = x(\vartheta_i) = \frac{4\pi}{b} \beta(\vartheta_i)$, $i = 1, 2, \dots$. Интерполяция этих данных и экстраполяция их на интервал $0 < \vartheta < \vartheta_1$ проводилась по методу, предложенному в работе [7]:

$$x(\vartheta) = x_0, \quad 0 \leq \vartheta < \vartheta_0,$$

$$\ln x(\vartheta) = (1 - \alpha_i) \ln x_i + \alpha_i \ln x_{i-1}, \quad (7)$$

$$\alpha_i = \frac{\ln(\vartheta_i/\vartheta)}{\ln(\vartheta_i/\vartheta_{i-1})}, \quad \vartheta_{i-1} < \vartheta < \vartheta_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Угол ϑ_0 выбирался равным $\varepsilon\vartheta_1$, где $\varepsilon = 10^{-4}$. Значение $x_0 = x(\vartheta_0)$ определялось из условия нормировки $\int_0^{\pi} x(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta = 2$, сводящегося к нелинейному уравнению относительно x_0

$$x_0(1 - \cos\vartheta_0) + \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} x(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta = 2 - \int_{\vartheta_1}^{\pi} x(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены результаты вычисления функций $a_f(\kappa)$ по формулам (5), (6) для трех указанных типов воды; при этом малоугловая индикатриса $x_f(\vartheta)$ полагалась равной непрерывной функции $x(\vartheta)$, полученной интерполяцией экспериментальных данных для достаточно малых углов рассеяния

$$x_f(\vartheta) = \begin{cases} x(\vartheta), & 0 \leq \vartheta \leq \pi/4 \\ 0, & \pi/4 < \vartheta \leq \pi \end{cases} \quad (9)$$

На тех же рисунках представлены результаты расчета $a_f(\kappa)$ для двух модельных индикатрис – индикатрисы Долина [1, 2]

$$x_f^{\text{Долин}}(\vartheta) = \frac{2\alpha}{\vartheta} \exp(-\alpha\vartheta), \quad (10)$$

$$\tilde{x}_f^{\text{Долин}}(s) = \frac{2}{\sqrt{1 + (s/\alpha)^2}}$$

и так называемой “диффузионной” индикатрисы, бesselов образ которой $\tilde{x}_f^{\text{diff}}(s)$ получается из (10) при сохранении лишь первых двух членов разложения в ряд Тейлора по s/α ,

$$\tilde{x}_f^{\text{diff}}(s) = \begin{cases} 2 - (s/\alpha)^2, & 0 \leq s < \sqrt{2}\alpha \\ 0, & s \geq \sqrt{2}\alpha \end{cases} \quad (11)$$

Применение такой индикатрисы эквивалентно использованию диффузионного малоуглового приближения в задаче переноса излучения [2]. Параметр α в модельных индикатрисах (10) и (11) для каждого из рассматриваемых типов воды определялся по соответствующему значению среднего косинуса угла рассеяния (приведенного в таблице) [8]

$$\alpha = [0,142 - 0,132\overline{\cos\theta}]^{-1/2}.$$

Гидрооптические характеристики трех типов морской воды [5, 6]

Тип морской воды	$c, \text{ м}^{-1}$	$b, \text{ м}^{-1}$	$b_b, \text{ м}^{-1}$	$a = c - b, \text{ м}^{-1}$	$b_1 = b - 2b_b, \text{ м}^{-1}$	$\overline{\cos(\vartheta)}$
clear ocean	0,151	0,037	0,0016	0,114	0,0337	0,8708
coastal ocean	0,398	0,219	0,0028	0,179	0,2133	0,9470
turbid harbor	2,19	1,824	0,0365	0,366	1,751	0,9199

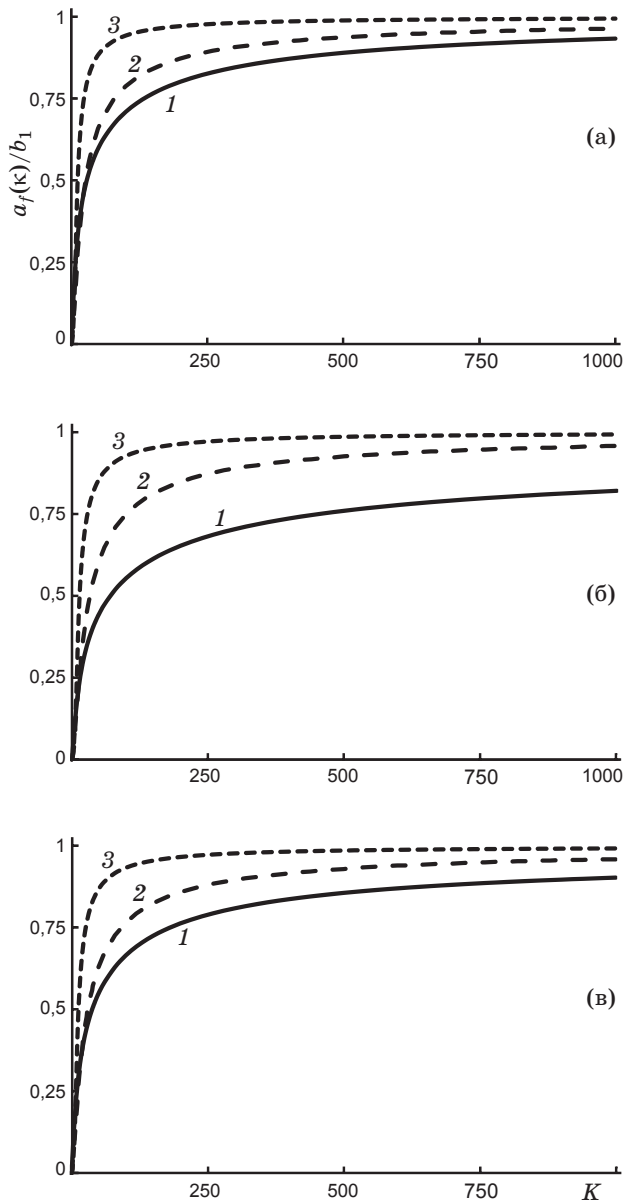


Рис. 1. Нормированные функции $a_f(\kappa)/b_1$ для трех типов морской воды, рассчитанные по индикатрисам Петцольда (1), модельным индикатрисам Долина (2) и “диффузионным” индикатрисам (3). а – тип воды “clear ocean”: $a = 0,114 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,037 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,034 \text{ м}^{-1}$. б – тип воды “coastal ocean”: $a = 0,179 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,219 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,213 \text{ м}^{-1}$. в – тип воды “turbid harbor”: $a = 0,366 \text{ м}^{-1}$, $b = 1,824 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 1,751 \text{ м}^{-1}$.

Для демонстрации влияния индикатрисы рассеяния вперед на характеристики светового поля в морской воде применим полученные результаты к задаче распространения пучка в полупространстве $z > 0$, заполненном рассеивающей средой. Распределение яркости на границе $z = 0$ зададим в виде

$$I(0, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) = I_0 \exp\left(-\frac{\mathbf{r}^2}{R^2}\right) \delta_2\left(\mathbf{n}_\perp - \frac{\mathbf{r}}{R} \text{div}\right), \quad (12)$$

где δ_2 – двумерная дельта-функция. Распределение (12) может служить моделью для поля яркости, создаваемого на поверхности воды лазерным пучком при дистанционном зондировании моря [9]; при этом радиус R и расходимость div в формуле (12) связаны с исходной расходимостью зондирующего пучка div_0 и высотой источника над уровнем моря H_0 соотношениями

$$\text{div} = \frac{\text{div}_0}{n}; \quad R = \text{div}_0 H_0, \quad (13)$$

где n – показатель преломления морской воды.

Для пучка вида (12) исследуем влияние индикатрисы рассеяния вперед на скорость убывания освещенности на оси пучка и изменение поперечного размера освещенной области с увеличением длины трассы распространения в среде. Используя автомодельное решение (3), (4) для яркости пучка $I(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp)$, распределение освещенности $E(z, \mathbf{r}) = \int I(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) d^2 \mathbf{n}_\perp$ получаем в виде

$$E(z, \mathbf{r}) = I_0 \frac{R^2}{2} \exp(-a_1 z) \times \int_0^\infty \exp\left[-k^2 \frac{R(R + z \text{div})}{4}\right] J_0(kr) \exp[-a_f(kz)z] k dk. \quad (14)$$

Освещенность на оси пучка $E(z, 0)$ убывает с длиной трассы распространения z по закону

$$E(z, 0) = I_0 \exp\{-[a_1 + K(z)]z\}, \quad (15)$$

где $K(z)$ – вклад в показатель ослабления освещенности, обусловленный малоугловым рассеянием, определяется выражением вида

$$K(z) = -\frac{1}{z} \ln \left\{ \int_0^\infty \exp\left[-x \frac{R + h \text{div}}{R} - a_f\left(\frac{2z\sqrt{x}}{R}\right)\right] dx \right\}. \quad (16)$$

Заметим, что величина $K(z)$ зависит не только от длины трассы распространения и гидрооптических характеристик среды (показателя рассеяния на малые углы b_1 , малоугловой индикатрисы $x_f(\vartheta)$), но и от параметров светового пучка.

Результаты расчетов функций $K(z)$ для трех рассматриваемых типов воды приведены на рис. 2. Для каждого типа воды вычисления проводили с использованием экспериментальной индикатрисы Петцольда, модельной индикатри-

сы Долина (10) и “диффузионной” индикатрисы, определяемой выражением (11).

Для оценки размера поперечного сечения пучка удобно принять величину эффективного радиуса R_{eff} , определяемого соотношением

$$\pi R_{\text{eff}}^2 E(z, 0) = \int E(z, \mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}. \quad (17)$$

Из выражений (14), (17) получаем

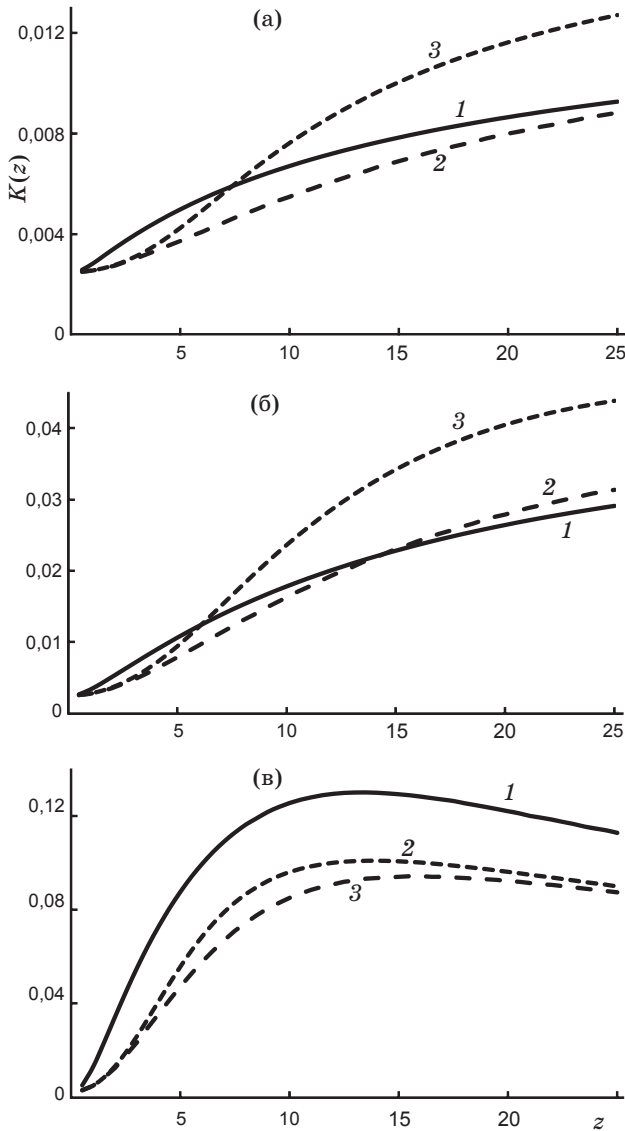


Рис. 2. Функция $K(z)$ – вклад, обусловленный малоугловым рассеянием, в показатель ослабления освещенности на оси пучка вида (12) для трех типов морской воды, рассчитанные по индикатрисам Петцольда (1), по индикатрисам Долина (2) и “диффузионным” индикатрисам (3). а – тип воды “clear ocean”: $a = 0,114 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,037 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,034 \text{ м}^{-1}$. б – тип воды “coastal ocean”: $a = 0,179 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,219 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,213 \text{ м}^{-1}$. в – тип воды “turbid harbor”: $a = 0,366 \text{ м}^{-1}$, $b = 1,824 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 1,751 \text{ м}^{-1}$.

$$R_{\text{eff}}^2(z) = 2z^2 \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{x^2(R+z\text{div})^2}{4z^2}\right\} \times \exp\{-za_f(x)\} x dx \quad (18)$$

На рис. 3 представлены результаты вычисления эффективного радиуса поперечного сече-

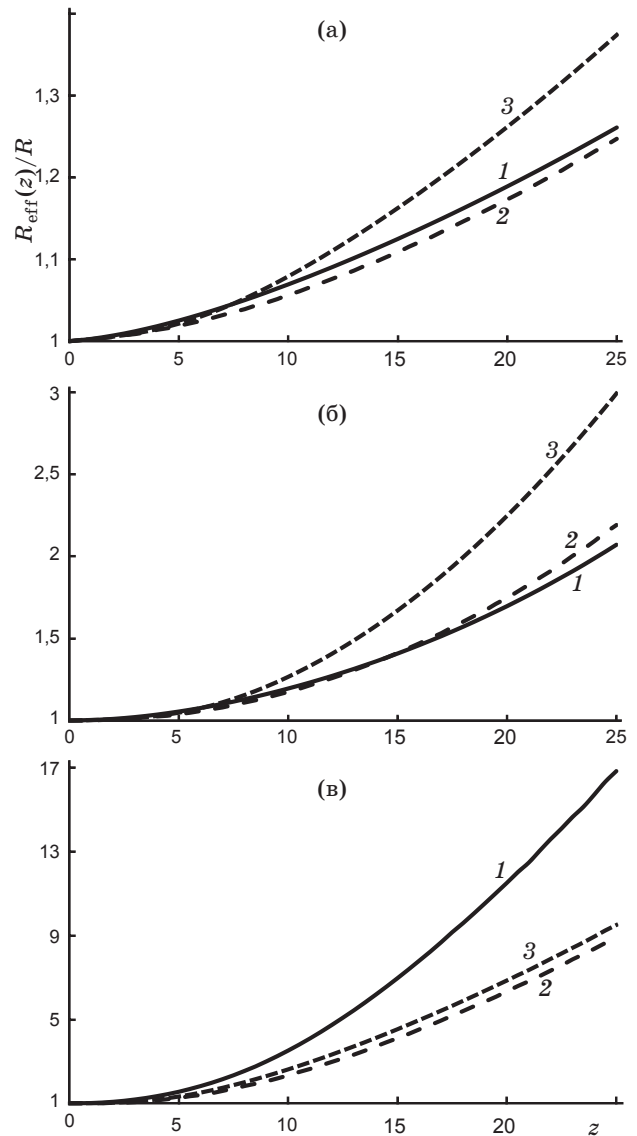


Рис. 3. Нормированный эффективный радиус $R_{\text{eff}}(z)/R$ поперечного сечения пучка вида (12) для трех типов морской воды, рассчитанные по индикатрисам Петцольда (1), индикатрисам Долина (2) и “диффузионным” индикатрисам (3). а – тип воды “clear ocean”: $a = 0,114 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,037 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,034 \text{ м}^{-1}$. б – тип воды “coastal ocean”: $a = 0,179 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,219 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 0,213 \text{ м}^{-1}$. в – тип воды “turbid harbor”: $a = 0,366 \text{ м}^{-1}$, $b = 1,824 \text{ м}^{-1}$, $b_1 = 1,751 \text{ м}^{-1}$.

ния пучка $R_{\text{eff}}(z)$, нормированного на начальный радиус $R_{\text{eff}}(0) = R$, для каждого из трех типов морской воды; расчеты проведены для экспериментальной и двух модельных индикатрис (10), (11).

Как видно из рис. 2 и 3, для очень чистой воды (“clear ocean”, $c = 0,151 \text{ м}^{-1}$) и для “промежуточного” типа морской воды (“coastal ocean”, $c = 0,398 \text{ м}^{-1}$) использование модельной индикатрисы Долина для расчета эффективного радиуса пучка приводит к результатам, хорошо согласующимся с данными расчетов с индикатрисой Петцольда во всем практически интересном диапазоне длин трассы распространения (расхождения не превышают 10%). Более заметные различия в полученных значениях $K(z)$ (до 30% в диапазоне $3 \text{ м} \leq z \leq 10 \text{ м}$) можно считать несущественными ввиду пренебрежимо малого вклада малоуглового рассеяния K в показатель ослабления освещенности ($a_1 + K$). Для мутной воды (“turbid harbor”, $c = 2,190 \text{ м}^{-1}$) расчеты с индикатрисой Долина приводят к существенно заниженным значениям как поперечного уширения пучка, так и показателя ослабления освещенности на оси. Применение малоуглового диффузионного приближения (или “диффузионной” индикатрисы) приводит к результатам, сильно отличающимся от расчетов с экспериментальными индикатрисами для всех рассмотренных типов морской воды; при этом в случае мутной воды (“turbid harbor”) эти результаты близки к полученным с использованием модельной индикатрисы Долина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1983. 351 с.
2. Долин Л.С., Левин И.М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 229 с.
3. Dolina I.S., Dolin L.S., Levin I.M., Rodionov A.A. Diagnostic abilities of oceanic lidar // Proc. III Intern. Conf. “Current Problems of Natural Waters”. 2005. P. 220–225.
4. Браво-Животовский Д.М., Долин Л.С., Лучинин А.Г., Савельев В.А. О структуре узкого светового пучка в морской воде // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 2. С. 160–167.
5. Petzold T.J. Volume scattering functions for selected ocean waters // Scripps Institution of Oceanography, 1972, UC San Diego.
6. Mobley C.D. Optical Properties of Water. Handbook of Optics. Second Edition, M. Bass, editor, 1994, McGraw-Hill, Inc.
7. Sanches R., McCormick N.J. Analytic beam spread function for ocean optics applications // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 6276–6288.
8. Долин Л.С., Копилевич О.В., Левин И.М., Фейгельс В.И. Малопараметрические модели световых полей в море и интегральные характеристики индикатрис рассеяния воды // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 2. С. 160–167.
9. Копилевич Ю.И., Сурков А.Г. Математическое моделирование входных сигналов авиационных океанологических лидаров // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 5. С. 45–51.