

М. Е. Кононенко, Ю. И. Копилевич, Е. И. Задорожная

## **ВЛИЯНИЕ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННОГО ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОГО ЛИДАРА**

В приближении малоуглового рассеяния для уравнения переноса излучения получены аналитические выражения для характеристик пространственного разрешения авиационного океанологического лидара и скорости затухания лидарного эхо-сигнала с увеличением глубины при произвольном виде индикатрисы рассеяния морской воды. Проведен численный анализ для трех типов воды с использованием полученных Петцольдом экспериментальных данных по измерению функции рассеяния. Результаты сравниваются с расчетами на основе модельной индикатрисы Долина и малоуглового диффузионного приближения. Обсуждается применимость рассмотренных моделей в различных условиях.

***Ключевые слова:** авиационный океанологический лидар, пространственное разрешение, системный показатель ослабления, индикатриса рассеяния, показатель малоуглового рассеяния.*

Авиационные системы дистанционного лазерного зондирования океана (океанологические лидары) используются сегодня как для батиметрии прибрежных акваторий и обнаружения малоразмерных объектов в водной толще, так и для восстановления характеристик морской среды и дна по данным лидарных измерений [1, 2]. Важнейшими характеристиками лидара, определяющими его эффективность для перечисленных приложений, являются пространственное разрешение и максимальная глубина зондирования. Эти характеристики зависят как от конструктивных параметров лидарной системы, так и от оптических свойств морской воды [3, 4]. Учет последнего обстоятельства принципиально важен для эффективного планирования лидарного обследования заданной акватории.

Целью настоящей статьи является исследование влияния формы индикатрисы рассеяния в малые углы на пространственное разрешение и скорость затухания лидарного сигнала при увеличении глубины, а также оценка применимости известных модельных индикатрис в различных условиях.

**Пространственное разрешение лидарной системы.** Ограничимся рассмотрением моно-статической лидарной системы (когда оптические оси излучателя и приемника совпадают) и случае зондирования „в надир“. Тогда информативные составляющие мощности излучения на входе фотоприемника лидарной системы — сигнал обратного рассеяния от толщи морской воды  $S_{\text{back}}(t)$  и импульс отражения от дна  $S_{\text{bot}}(t)$  — описываются выражениями [4, 5]

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{back}}(t) &= W \Sigma \Omega \int_0^h dz p \left( t - \frac{2n}{c} z \right) \int d^2 \mathbf{r} G(z, \mathbf{r}) \beta_{\pi}(z, \mathbf{r}); \\ S_{\text{bot}}(t) &= \frac{1}{\pi} W \Sigma \Omega p \left( t - \frac{2n}{c} h \right) \int d^2 \mathbf{r} G(h, \mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

здесь  $t = 0$  соответствует моменту поступления на фотоприемник лидарного отклика от поверхности воды;  $n$  — показатель преломления морской воды;  $c$  — скорость света в вакууме;  $h$  — глубина моря;  $W$  — эффективная энергия зондирующего импульса с учетом ослабления излучения на атмосферной трассе, двукратного прохождения поверхности раздела воздух—вода и потерь в оптической системе;  $\Sigma$  — площадь зрачка лидарного приемника;  $\Omega$  — телесный угол поля приемной системы, „приведенный“ к водной среде:  $\Omega = \pi \left( \frac{\text{FOV}}{2n} \right)^2$ , где

FOV — плоский угол поля зрения приемника;  $p(t)$  — эффективная форма зондирующего импульса (учитывающая вид излучаемого лазерного импульса и функцию отклика приемного тракта [4, 5]):  $p(t) = 0$  при  $t < 0$ ,  $\int_0^{\infty} p(t) dt = 1$ ;  $\beta_{\pi}$  и  $\rho$  — показатель обратного рассеяния морской воды и коэффициент ламбертовского отражения дна соответственно.

Из формул (1) видно, что разрешение лидарной системы в вертикальном направлении (в частности, точность определения глубины) характеризуется длительностью зондирующего импульса, тогда как горизонтальное разрешение определяется функцией  $G(z, \mathbf{r})$  — распределением чувствительности лидарного сигнала к неоднородностям показателя обратного рассеяния и неоднородностям коэффициента отражения дна в плоскости  $z = \text{const}$ . В качестве меры пространственного разрешения лидара в горизонтальной плоскости целесообразно выбрать эффективный радиус  $R(z)$ , определяемый соотношением

$$\pi R^2(z) G(z, 0) = \int d^2 \mathbf{r} G(z, \mathbf{r}). \quad (2)$$

Функция  $G(z, \mathbf{r})$  может быть выражена как [4—6]

$$G(z, \mathbf{r}) = E_e(z, \mathbf{r}) \cdot E_r(z, \mathbf{r}), \quad (3)$$

где  $E_e(z, \mathbf{r})$  — распределение освещенности, создаваемой стационарным зондирующим пучком излучения единичной мощности в плоскости  $z = \text{const}$ :  $E_r(z, \mathbf{r})$  — освещенность, создаваемая „фиктивным“ пучком единичной мощности с геометрическими параметрами (исходным радиусом и расходимостью), равными соответствующим параметрам приемной системы.

В приближении малоуглового рассеяния [6, 7] освещенности  $E_{e,r}(z, \mathbf{r})$  выражаются через яркости  $I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp})$  соответствующих пучков ( $\mathbf{n}_{\perp}$  — горизонтальная проекция единичного вектора направления) соотношениями

$$E_{e,r}(z, \mathbf{r}) = \int I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp}) d^2 \mathbf{n}_{\perp}. \quad (4)$$

Функции  $I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp})$  являются решениями малоуглового уравнения переноса излучения [6, 7] в полупространстве  $0 \leq z < \infty$ , причем распределения яркостей на границе  $z = 0$  целесообразно задать в виде [4, 6]

$$\left. \begin{aligned} I_e(0, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) &= \frac{4}{\pi H^2 \text{Div}^2} \exp\left(-\frac{4\mathbf{r}^2}{H^2 \text{Div}^2}\right) \delta_2\left(\mathbf{n}_\perp - \frac{\mathbf{r}}{nH}\right); \\ I_r(0, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) &= \frac{4}{\pi H^2 \text{FOV}^2} \exp\left(-\frac{4\mathbf{r}^2}{H^2 \text{FOV}^2}\right) \delta_2\left(\mathbf{n}_\perp - \frac{\mathbf{r}}{nH}\right), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $H$  — высота носителя лидара над уровнем моря,  $\text{Div}$  — расходимость освещающего пучка,  $\delta_2$  — двумерная дельта-функция.

При описании распространения светового пучка в морской воде в приближении малоуглового рассеяния индикатрису рассеяния среды  $x(\vartheta)$  естественно представлять суммой малоуглового и изотропного компонентов [6, 8]:

$$x(\vartheta) = \left(1 - 2\frac{b_b}{b}\right) x_f(\vartheta) + 2\frac{b_b}{b}, \quad (6)$$

где  $b$  — показатель рассеяния,  $b_b$  — показатель рассеяния назад; индикатриса рассеяния  $x_f(\vartheta)$  отлична от нуля лишь для малых углов  $\vartheta$ ; здесь и далее оптические характеристики среды полагаем не зависящими от координат.

Используя известное аналитическое решение малоуглового уравнения переноса излучения [4, 6] с граничным условием вида (5), с учетом соотношений (3) и (4) получаем

$$\left. \begin{aligned} G(z, \mathbf{r}) &= \frac{\exp(-2a_1 z)}{(2\pi)^2} g(z, r, \text{Div}) g(z, r, \text{FOV}), \\ g(z, r, \Theta) &= \int_0^\infty J_0(kr) \exp\left[-a_f(kz)z - k^2 \Theta^2 \left(\frac{nH+z}{4n}\right)^2\right] k dk. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь  $a_1 = a + 2b_b$  — эффективный показатель поглощения, где  $a$  — показатель поглощения;  $b_1 = b - 2b_b$  — показатель рассеяния на малые углы. Функция

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

где  $\tilde{x}_f(s) = \int_0^\infty x_f(\vartheta) J_0(s\vartheta) \vartheta d\vartheta$  — преобразование Фурье — Бесселя от малоугловой части индикатрисы  $x_f(\vartheta)$ , характеризует вклад малоуглового рассеяния в показатель ослабления пространственной гармоники с частотой  $k$  исходного распределения яркости на трассе распространения длиной  $z$  [9].

Подстановка формулы (7) в соотношение (2) приводит к следующему выражению:

$$\left. \begin{aligned} R^2(z) &= 2 \frac{f\left(z, \sqrt{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2}\right)}{g(z, 0, \text{Div}) g(z, 0, \text{FOV})}, \\ f(z, \Theta) &= \int_0^\infty \exp\left[-2a_f(kz)z - k^2 \Theta^2 \left(\frac{nH+z}{4n}\right)^2\right] k dk. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

**Затухание лидарного сигнала при увеличении глубины.** Для однородной среды, когда  $\beta_\pi$  и  $\rho$  не зависят от координат, затухание лидарного сигнала при увеличении глубины принято характеризовать величиной так называемого „системного показателя ослабления“  $K_{\text{sys}}(z)$  [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{back}}(t) &= \beta_{\pi} W \frac{\text{FOV}^2}{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2} \int_0^h dz p\left(t - \frac{2n}{c} z\right) \Omega'(z) \exp[-zK_{\text{syst}}(z)]; \\ S_{\text{bot}}(t) &= \frac{\rho}{\pi} W \frac{\text{FOV}^2}{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2} p\left(t - \frac{2n}{c} h\right) \Omega'(h) \exp[-hK_{\text{syst}}(h)], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\Omega'(z) = \frac{\Sigma}{(Hn + z)^2}$  — телесный угол, под которым зрачок приемной системы виден из

точки рассеяния на глубине  $z$ .

Сравнивая выражения (9) с уравнениями (1) и используя формулы (7), для системного показателя ослабления получаем выражение

$$K_{\text{syst}}(z) = 2a_1 - \frac{1}{z} \ln \left\{ 2 \int_0^{\infty} \exp \left[ -2za_f \left( \frac{4nkz}{(Hn + z)\sqrt{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2}} \right) - k^2 \right] k dk \right\}. \quad (10)$$

Отметим, что в отсутствие малоуглового рассеяния, т.е. при  $a_f \equiv 0$ , имеем  $K_{\text{syst}}(z) \equiv K_{\text{syst}}(0) = 2a_1$ .

**Анализ влияния формы индикатрисы рассеяния.** Для численного анализа полученных выражений воспользуемся данными проведенных Петцольдом измерений объемных функций рассеяния  $\beta(\vartheta)$  для трех типов морской воды — “clear ocean”, “coastal ocean” и “turbid harbor” [10, 11]; описание метода и результаты расчета входящих в формулы (8) и (10) функций  $a_f(k)$  для этих типов воды приведены в работе [9].

Результаты вычисления эффективного радиуса  $R(z)$  области чувствительности [см. уравнения (8)] и относительной величины вклада малоуглового рассеяния в системный показатель ослабления лидарного сигнала

$$K_f(z) = [K_{\text{syst}}(z) - 2a_1] (2a_1)^{-1}$$

для указанных типов морской воды приведены на рис. 1 и 2. Расчеты проведены для одного значения расходимости зондирующего пучка  $\text{Div} = 5$  мрад и двух значений угла поля зрения лидарной системы:  $\text{FOV} = 40$  мрад и  $\text{FOV} = 2$  мрад, характерных для „широкопольных каналов“ известных лидарных систем [12] и „узкопольных“ лидаров [13] соответственно.

На рис. 1 и 2 представлены также результаты расчета рассматриваемых характеристик для двух модельных индикатрис [6, 7, 14] — индикатрисы Долина

$$x_f^{\text{д}}(\vartheta) = \frac{2\alpha}{\vartheta} \exp(-\alpha\vartheta), \quad \tilde{x}_f^{\text{д}}(s) = \frac{2}{\sqrt{1 + (s/\alpha)^2}} \quad (11)$$

и так называемой „диффузионной“ индикатрисы, бesselов образ  $\tilde{x}_f^{\text{д}}(s)$  которой формируется из уравнения (11) при сохранении лишь первых двух членов разложения в ряд Тейлора по  $s/\alpha$ :

$$\tilde{x}_f^{\text{д}}(s) = \begin{cases} 2 - (s/\alpha)^2, & 0 \leq s < \sqrt{2} \cdot \alpha; \\ 0, & s \geq \sqrt{2} \cdot \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

Применение индикатрисы (11) эквивалентно использованию диффузионного малоуглового приближения в задаче переноса излучения [6]. Параметр  $\alpha$  в модельных индикатрисах (11) и (12) для каждого из типов воды определялся по соответствующему значению среднего косинуса угла рассеяния [14]:  $\alpha = [0,142 - 0,132\overline{\cos\theta}]^{-1/2}$ .

На рис. 1 и 2 кривые 1 соответствуют экспериментальным индикатрисам Петцольда, кривые 2 — модельным индикатрисам Долина, кривые 3 — „диффузионным“ индикатрисам.

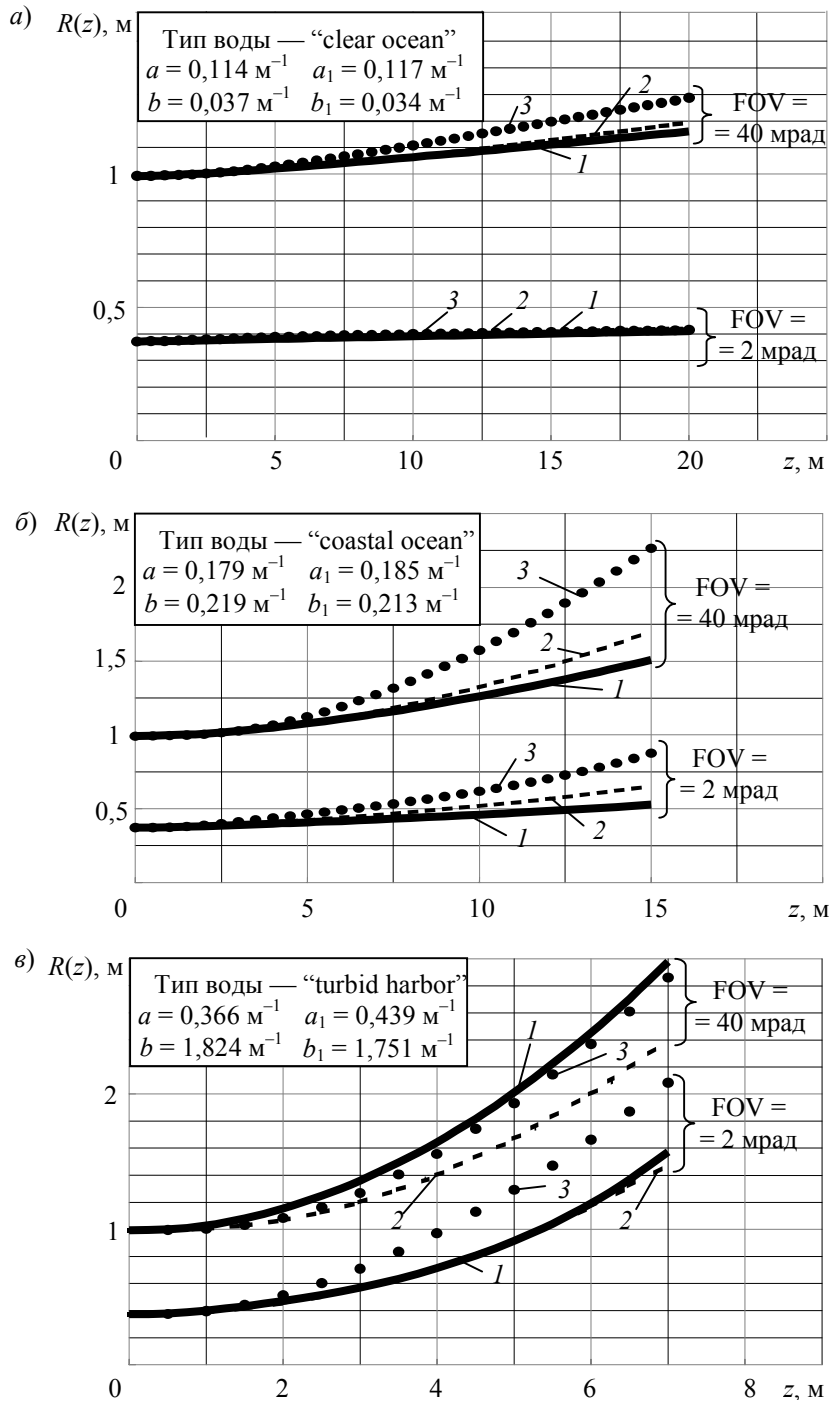
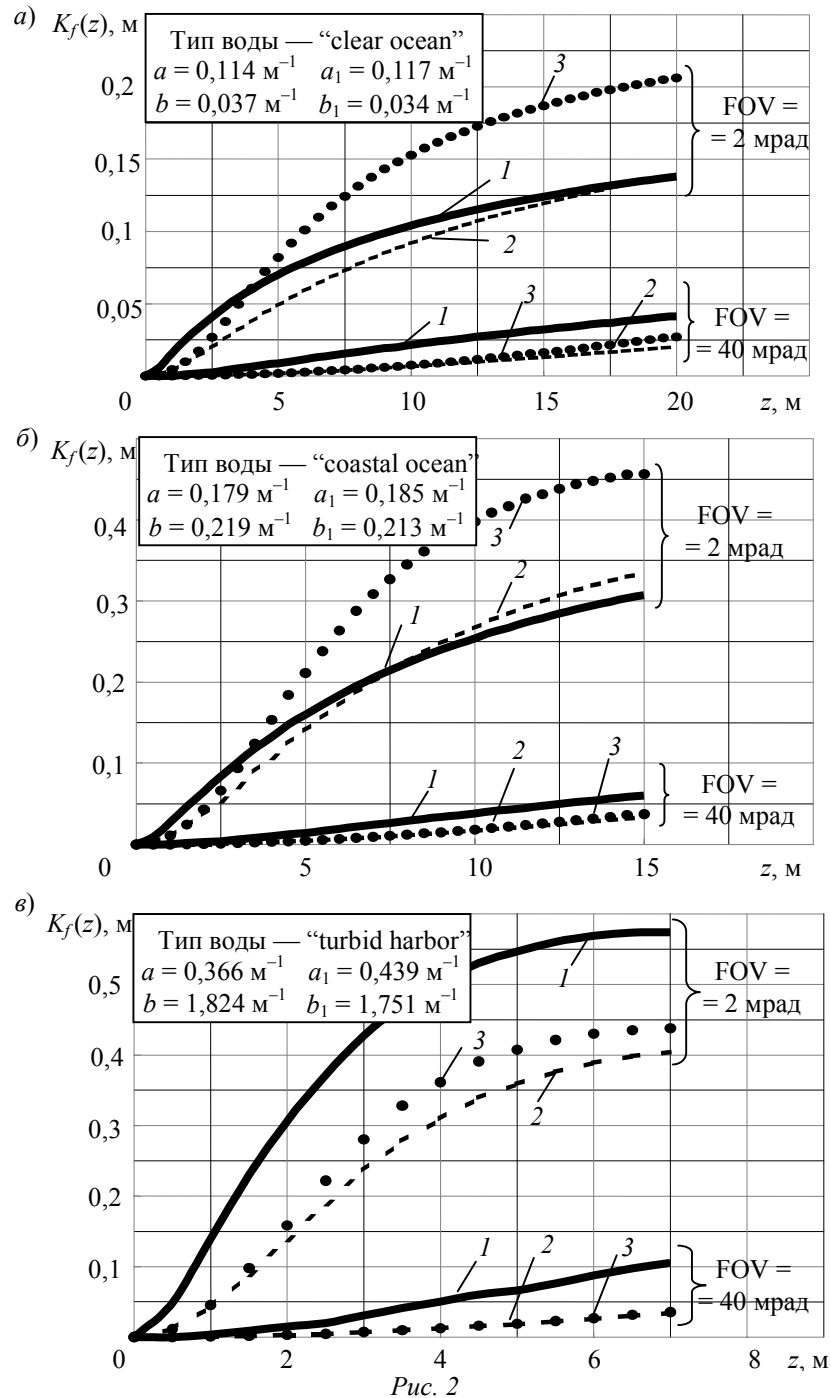


Рис. 1

Как видно из рис. 1, применение модельной индикатрисы Долина (11) для расчета величины  $R(z)$  приводит к результатам (см. рис. 1, а—в, кривые 2), отличающимся не более чем на 20 % от результатов расчетов по экспериментальным индикатрисам Петцольда (кривые 1) практически во всем диапазоне глубин; при этом в случае чистой воды (“clear ocean”, см. рис. 1, а) расхождения пренебрежимо малы, а максимальные ошибки наблюдаются на предельных глубинах в мутной воде (“turbid harbor”, см. рис. 1, в) для широкопольного лидара. Результаты расчета  $R(z)$  с применением „диффузионной“ индикатрисы (12) демонстрируют максимальные отклонения (более 50 %) от данных, соответствующих экспериментальной индикатрисе, для „промежуточного“ типа морской воды (“coastal ocean”, см. рис. 1, б).

Как показывают результаты вычисления вклада малоуглового рассеяния в системный показатель ослабления лидарного сигнала при увеличении глубины (см. рис. 2, а—в),



этот вклад особенно существенен для узкопольного лидара в случае мутной воды (см. рис. 2, в); применение любой из двух модельных индикатрис в этом случае приводит к заниженным (до 50 %) значениям величины  $K_f$  уже на сравнительно небольших глубинах. При моделировании лидарного сигнала в более чистых водах (см. рис. 2, а, б) модельная индикатриса Долина обеспечивает приемлемую точность расчетов  $K_f(z)$ , тогда как применение „диффузионной“ индикатрисы оправдано лишь для оценки затухания сигналов широкопольного лидара.

Полученные результаты показывают, что в общем случае при расчете характеристик лидара (изменения области чувствительности и показателя ослабления лидарного сигнала при увеличении глубины) требуется учитывать конкретную форму индикатрисы в области

малых углов рассеяния; применение модельных индикатрис с единственным варьируемым параметром (индикатрис Долина и „диффузионной“) может приводить к существенным ошибкам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feigels V. I., Kopilevich Yu. I.* Laser remote sensing of natural waters: from theory to practice // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2964. 216 p.
2. *Tuell G., Feigels V., Kopilevich Yu.* Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5885. P. 115—27.
3. *Feigels V., Kopilevich Yu.* Ocean-Scientific for Windows. Basic Concepts. Description of the Theory. EG&G Washington Analytical Service, Inc., 1993. 52 p.
4. *Копилевич Ю. И., Сурков А. Г.* Математическое моделирование входных сигналов авиационных океанологических лидаров // Опт. журн. 2008. Т. 75, № 5. С. 45—51.
5. *Tuell G., Feigels V., Kopilevich Yu., Surkov A. G.* Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): I. Theoretical background // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5885. P. 106—14.
6. *Долин Л. С., Левин И. М.* Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 229.
7. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Моница. М.: Наука, 1983. С. 351.
8. *Dolina I. S., Dolin L. S., Levin I. M., Rodionov A. A.* Diagnostic abilities of oceanic lidar // Proc. of the III Intern. Conf. “Current Problems of Natural Waters”. St. Petersburg, 2005. P. 220—225.
9. *Копилевич Ю. И., Кононенко М. Е., Задорожная Е. И.* Влияние индикатрисы рассеяния вперед на характеристики светового пучка в морской воде // Опт. журн. 2010. Т. 77б, № 10. С. 10—14.
10. *Petzold T. J.* Volume scattering functions for selected ocean waters // Scripps Institution of Oceanography, UCSD. 1972. 79 p.
11. *Mobley C. D.* Optical properties of water // Handbook of Optics / Ed. M. Bass. McGraw-Hill, Inc., 1994. P. 43.3—43.56.
12. *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. Сер. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 11. С. 1218—1222.
13. *Feigels V., Kopilevich Yu., Tuell G. et al.* Water optical properties and bottom reflectance measurement with SHOALS 1000/3000 bathymetric system // Proc. of the III Intern. Conf. “Current Problems of Natural Waters”. St. Petersburg, 2005. P. 254—259.
14. *Feigels V., Wright C., Kopilevich Yu., Surkov A.* Narrow field-of-view bathymetric lidar: Theory and field test // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5155. P. 1—11.

#### Сведения об авторах

- Михаил Евгеньевич Кононенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: mihailkon@yandex.ru
- Юрий Исаакович Копилевич** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: yurikopilevich@gmail.com
- Екатерина Ивановна Задорожная** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: cattie@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерных технологий и  
экологического приборостроения

Поступила в редакцию  
17.06.10 г.