

УДК 551.463.5

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ПОДВОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ДОРОЖКИ

А. А. Мольков^{1,2 *}, Л. С. Долин¹

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Исследована возможность определения первичных гидрооптических характеристик воды с помощью средств подводного видения. Предложены аналитические модели мгновенных и накопленных изображений подводной солнечной дорожки, формируемой прямым, а также однократно и многократно рассеянным светом. С помощью численного моделирования получены оценки оптических глубин, на которых вклад рассеянного в воде света в видимую яркость поверхности становится преобладающим. Разработаны алгоритмы восстановления показателей рассеяния и ослабления воды по накопленному изображению подводной солнечной дорожки. Приведены результаты их апробации по данным натурного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Системы подводного телевидения и подводной фотосъёмки используются для наблюдения и изучения флоры и фауны Мирового океана, контроля его экологического состояния и поиска полезных ископаемых на морском дне. Они применяются при строительстве подводных сооружений, аварийно-спасательных работах и в задачах оборонного характера. Эти системы можно также использовать в качестве инструмента гидрофизических исследований. В частности, статистическая обработка изображений нижней стороны морской поверхности, наблюдаемой в условиях естественного освещения, позволяет получать данные о характеристиках ветрового волнения и его изменчивости под влиянием плёнок поверхностно-активных веществ [1–3].

В данной работе будет показано, что по изображению подводной солнечной дорожки можно определять не только характеристики поверхностного волнения, но и оптические характеристики водного слоя, разделяющего поверхность и систему наблюдения. В работе приводятся модели мгновенного и накопленного изображений подводной солнечной дорожки, формируемой как прямым, так и рассеянным светом; гауссова аппроксимация морской индикатрисы рассеяния, применение которой позволило получить в некоторых случаях аналитические выражения для яркости изображения подводной солнечной дорожки, формируемой светом с разными кратностями рассеяния; оценки оптических глубин, на которых вклады прямого и многократно рассеянного света в видимую яркость поверхности сравниваются; алгоритмы решения обратной задачи, т. е. восстановления оптических характеристик воды по накопленным изображениям подводной солнечной дорожки; результаты апробации предложенных алгоритмов на данных натурного эксперимента.

1. МОДЕЛЬ МГНОВЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДВОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ДОРОЖКИ

В работах [1–3] была предложена модель мгновенного изображения нижней стороны случайно-неровной водной поверхности, построенная в приближении геометрической оптики. При построении использовался математический аппарат теории переноса излучения в мутных средах

* a.molkov@inbox.ru

воды, рассеяния вперёд и ослабления соответственно, $\chi_s(p)$ — фурье-образ индикатрисы рассеяния $\chi(n_\perp)$, определяемый по формуле

$$\chi_s(p) = \frac{1}{2} \int_0^\infty \chi(n_\perp) J_0(p n_\perp) n_\perp \, dn_\perp, \quad (5)$$

где $J_0(p n_\perp)$ — функция Бесселя нулевого порядка.

Чтобы оценить вклад рассеянного водой света в видимую яркость поверхности, разложим функцию Грина в ряд по степеням кратности рассеяния:

$$G^{(0)}(\mathbf{r}_\perp, Z, \mathbf{n}_\perp) = \exp(-cZ) \delta(\mathbf{r}_\perp) \delta(\mathbf{n}_\perp), \quad (6)$$

$$G^{(1)}(\mathbf{r}_\perp, Z, \mathbf{n}_\perp) = \frac{b_1}{4\pi} \exp(-cZ) \chi(\mathbf{n}_\perp) \int_0^Z \delta(\mathbf{r} - Z' \mathbf{n}_\perp) \, dZ' \quad (7)$$

и т. д.

В нулевом приближении, т. е. в отсутствие рассеяния света в воде, после вычисления яркости (2) с учётом формул (1) и (6) получаем простое выражение для яркости приходящего от поверхности солнечного света:

$$I^{(0)}(\mathbf{n}_\perp) = I_{00} \exp(-cZ/\sqrt{1-n_{s\perp}^2}) \exp\left\{-\frac{1}{\delta\theta_s^2} [m\mathbf{n}_\perp + (m-1)\boldsymbol{\eta}(-\mathbf{n}_\perp Z) - \mathbf{n}_s]^2\right\}, \quad (8)$$

где $I_{00} = m^2(1-R_F)E_s/(\pi\delta\theta_s^2)$, $\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}_\perp)$ — уклон поверхности в точке $\mathbf{r}_\perp$, а изменение направления распространения света при его преломлении на случайно-неровной границе раздела воздух—вода задаётся упрощённой формулой, которая следует из закона Снеллиуса в приближении малых уклонов поверхности [4–11]:

$$\mathbf{n}_{i\perp}(\mathbf{r}_\perp, \mathbf{n}_\perp) \approx m\mathbf{n}_\perp + (m-1)\boldsymbol{\eta}(\mathbf{r}_\perp). \quad (9)$$

Выражение (8) применялось в работах [1, 2] при построении статистических моментов изображения подводной солнечной дорожки, на основе которых были разработаны алгоритмы восстановления параметров волнения.

Следующее решение, которое получается из формулы (2) путём подстановки второго члена разложения функции Грина (7), описывает яркость изображения в однократно рассеянном свете и имеет вид

$$I^{(1)}(\mathbf{n}_\perp) = \frac{b_1}{4\pi} \exp(-cZ) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^Z I(-Z\mathbf{n}'_\perp - Z'(\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}'_\perp), 0, \mathbf{n}'_\perp) \chi(|\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}'_\perp|) \, d^2 n'_\perp \, dZ'. \quad (10)$$

Наконец, для расчёта изображения подводной солнечной дорожки, формируемой многократно рассеянным светом, необходимо вычислить яркость (2) с подстановкой функции Грина (4). При этом стоит отметить, что интегралы в выражении (10) берутся аналитически лишь в простейших случаях, например в случае гладкой морской поверхности, а для анализа структуры изображения поверхности в общем случае необходимо применение численных расчётов.

2. МОДЕЛЬ НАКОПЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДВОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ДОРОЖКИ

Статистически среднее изображение подводной солнечной дорожки рассчитывается по формуле

$$\langle I(\mathbf{n}_\perp) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\mathbf{n}_\perp, \boldsymbol{\eta}) P_1(\boldsymbol{\eta}) d\boldsymbol{\eta}, \quad (11)$$

где $I(\mathbf{n}_\perp, \boldsymbol{\eta})$ — яркость мгновенного изображения подводной солнечной дорожки, выраженная через направление $\mathbf{n}_\perp$ и уклон $\boldsymbol{\eta}$ и определяемая выражением (2), а $P_1(\boldsymbol{\eta})$ — одноточечная двумерная функция распределения уклонов поверхности [14], параметрами которой служат дисперсии уклонов поверхности в направлении ветра (σ_x^2) и в перпендикулярном к ветру направлении (σ_y^2):

$$P_1(\boldsymbol{\eta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{\eta_x^2}{2\sigma_x^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{\eta_y^2}{2\sigma_y^2}\right). \quad (12)$$

Подстановка в выражение (11) каждого из приведённых ранее выражений для яркости случайной реализации подводной солнечной дорожки, полученных в соответствующем приближении, с учётом функции распределения уклонов поверхности (12) даёт набор формул для расчёта накопленного изображения подводной солнечной дорожки. При этом для изображения, формируемого прямым (не рассеянным) светом, получаем

$$\begin{aligned} \langle I^{(0)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle &= \exp\left(-\frac{cZ}{\sqrt{1-n_\perp^2}}\right) \langle I_\Sigma(\mathbf{n}_\perp) \rangle, \\ \langle I_\Sigma(\mathbf{n}_\perp) \rangle &= I_{00} \frac{\delta\vartheta_s^2}{m^2} \frac{1}{\sqrt{d_{0x}}} \exp\left[-\frac{1}{d_{0x}} \left(n_x - \frac{n_{sx}}{m}\right)^2\right] \frac{1}{\sqrt{d_{0y}}} \exp\left[-\frac{1}{d_{0y}} \left(n_y - \frac{n_{sy}}{m}\right)^2\right], \\ d_{0x} &= [(\delta\theta_s)^2 + 2(m-1)^2\sigma_x^2]/m^2, \quad d_{0y} = [(\delta\theta_s)^2 + 2(m-1)^2\sigma_y^2]/m^2; \end{aligned} \quad (13)$$

для изображения, формируемого однократно рассеянным светом, —

$$\langle I^{(1)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle = \frac{b_1 Z}{4\pi} \exp\left(-\frac{cZ}{\sqrt{1-n_\perp^2}}\right) \iint_{-\infty}^{+\infty} \langle I_\Sigma(\mathbf{n}'_\perp \mathbf{n}_{s\perp}) \rangle \chi(|\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}'_\perp|) d^2 n'_\perp; \quad (14)$$

всем светом —

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{n}_\perp) \rangle &= I_{00} \exp\left(-\frac{cZ}{\sqrt{1-n_\perp^2}}\right) \times \\ &\times \frac{\delta\vartheta_s^2}{4\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{d_{0x}}{4} p_x^2 - \frac{d_{0y}}{4} p_y^2 - i\mathbf{p}(\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}_{s\perp}) + b_1 Z \chi_s(|\mathbf{p}|)\right] d^2 p. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь b_1 — показатель рассеяния вперёд.

Полученные выражения (13)–(15) будут использованы в следующей главе для моделирования накопленных изображений подводной солнечной дорожки и их анализа, а также для разработки алгоритмов определения по указанным изображениям оптических свойств воды.

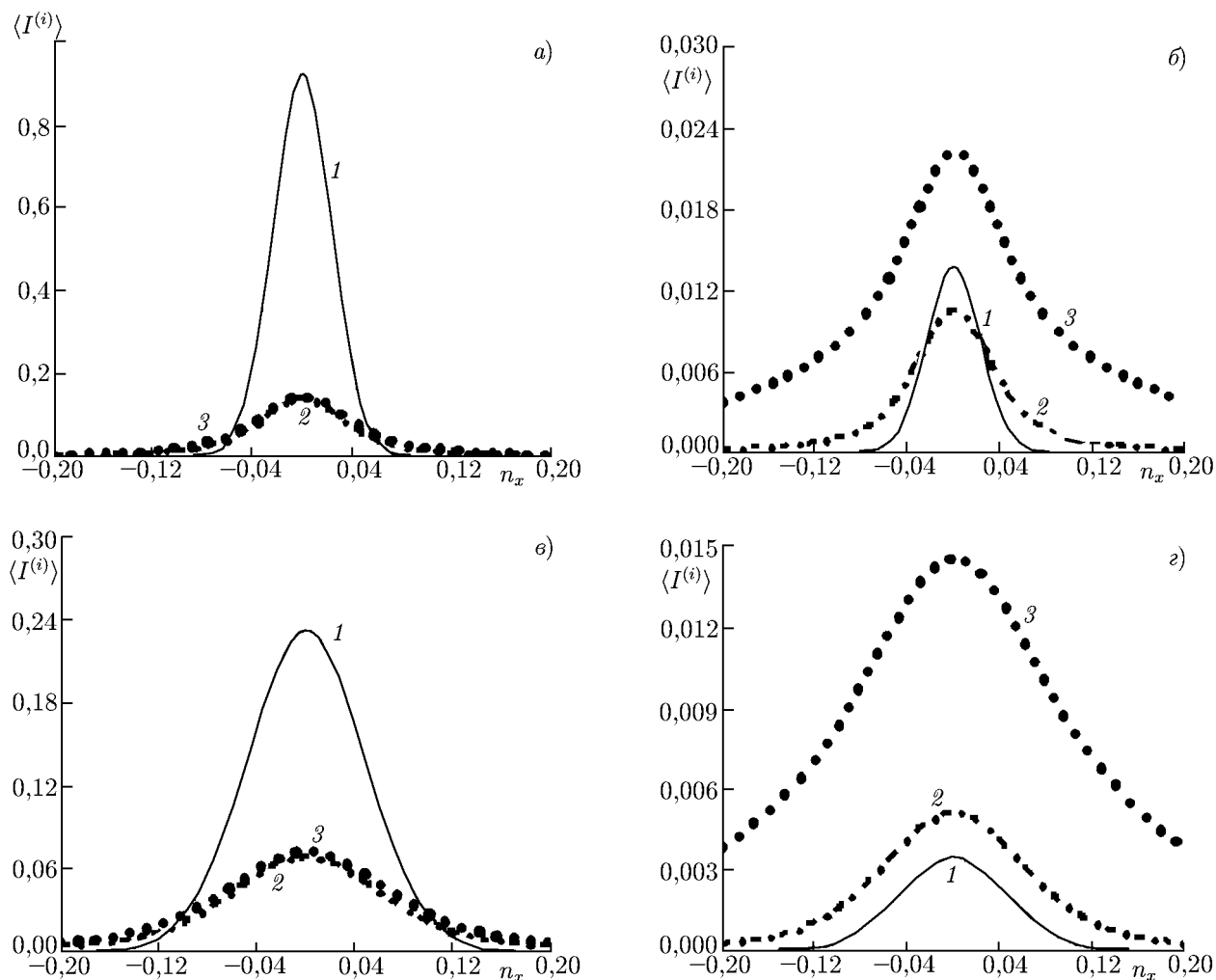


Рис. 2. Накопленное изображение подводной солнечной дорожки, формируемое прямым (кривые 1), однократно (кривые 2) и многократно (кривые 3) рассеянным светом для скоростей ветра 3 м/с (а, б) и 12 м/с (в, г) и глубин 3 м (а, в) и 15 м (б, г). Показатель рассеяния вперед равен $0,25 \text{ м}^{-1}$

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАКОПЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДВОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ДОРОЖКИ

Моделирование изображений по формулам (13)–(15) требует выбора индикатрисы рассеяния. Часто для расчётов световых полей в морских водах от узконаправленных источников применяют индикатрису [15]

$$\chi(\gamma) = 2q^2 \exp(0,03 - \sqrt{0,03^2 + q^2\gamma^2}) / \sqrt{0,03^2 + q^2\gamma^2}, \quad (16)$$

которая достаточно хорошо описывает реальные индикатрисы рассеяния в интервале углов $10' < \gamma < 30^\circ \div 40^\circ$, где содержится $90 \div 95\%$ рассеянной энергии. Параметр q , отвечающий за аппроксимацию передней части индикатрисы, связан с дисперсией её малоугловой части $\langle \gamma_{45}^2 \rangle$ и средним косинусом угла рассеяния $\cos \gamma$ следующим образом [16]:

$$q \approx \sqrt{2/(\langle \gamma_{45}^2 \rangle)} = (0,142 - 0,132 \langle \cos \gamma \rangle)^{-1/2}. \quad (17)$$

При использовании индикатрисы рассеяния (16) яркость изображений поверхности по формулам (2), (11), (14) и (15) можно рассчитать только численно. Для вычисления указанных интегралов в аналитической форме, а также для ускорения численного счёта была найдена аппроксимации функции $\chi(\gamma)$ в виде

$$\chi(\gamma) = \frac{q^2}{8^2} \sum_{j=1}^5 \mu_j \exp\left(-\frac{\nu_j}{8^2} \gamma^2\right), \quad (18)$$

с коэффициентами $\mu_1 = 3\,200$; $\mu_2 = 857$; $\mu_3 = 160$; $\mu_4 = 45$; $\mu_5 = 5$; $\nu_1 = 20\,000$; $\nu_2 = 1\,200$; $\nu_3 = 160$; $\nu_4 = 30$ и $\nu_5 = 7$. Для индикатрисы (18) формулы (14) и (15) преобразуются к виду

$$\langle I^{(0)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle = I_{00} \exp(-cZ) \frac{\delta \vartheta_s^2}{\sqrt{d_{0x} d_{0y}}} \exp\left[-\frac{m^2(n_x - n_{sx})^2}{d_{0x}} - \frac{m^2(n_y - n_{sy})^2}{d_{0y}}\right], \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \langle I^{(1)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle = & \frac{1}{4} I_{00} \exp(-cZ) Z b_1 \delta \vartheta_s^2 \sum_{j=1}^5 \mu_j \frac{1}{\sqrt{m^2 + \nu_j d_{0x}} \sqrt{m^2 + \nu_j d_{0y}}} \times \\ & \times \exp\left[-\frac{m^2 \nu_j}{m^2 + \nu_j d_{0x}} (n_x - n_{sx})^2 - \frac{m^2 \nu_j}{m^2 + \nu_j d_{0y}} (n_y - n_{sy})^2\right], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \langle I^{(M)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle = & I_{00} \exp(-cZ) \frac{\delta \vartheta_s^2}{2m^2} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{d_{0x}}{4m^2} p_x^2 - \frac{d_{0y}}{4m^2} p_y^2 - i\mathbf{p}(\mathbf{n}_\perp - \mathbf{n}_{s\perp}) + b_1 Z x_s(|\mathbf{p}|)\right] d^3 p - \langle I^{(0)}(\mathbf{n}_\perp) \rangle. \end{aligned} \quad (21)$$

Корреляционные связи между оптическими характеристиками воды задаются соотношениями [16]

$$b_1 = 0,908c - 0,048; \quad q = \sqrt{(19,1c - 0,95)/(0,34c - 0,01)}. \quad (22)$$

На рис. 2 приведены примеры расчёта накопленного изображения подводной солнечной дорожки на основе формул (19)–(22) для двух глубин и двух скоростей ветра. Из представленных рисунков и формулы (19) видно, что ширина накопленного изображения, формируемого прямым светом, не зависит ни от рассеивающих свойств воды, ни от глубины, а определяется лишь скоростью ветра. Именно на основе этого заключения в работе [2] и был сформулирован метод определения дисперсии уклонов поверхности, а значит и скорости ветра, по площади накопленного изображения подводной солнечной дорожки. Рассеяние света в воде приводит к образованию в накопленном изображении подводной солнечной дорожки светового фона, затрудняющего решение обратной задачи.

Из рис. 2 видно, что существует оптическая глубина $\bar{\tau}_b = b_1 \bar{Z}$, при которой наблюдается равенство яркостей прямого и рассеянного света. Результаты её расчёта как функции скорости ветра приведены на рис. 3. Их можно использовать для оценки рабочих глубин видимости солнечной дорожки при проведении натурных экспериментов, а также для определения интервала глубин, на котором вклад рассеянного в воде света в видимую яркость поверхности невелик и можно проводить оценку параметров волнения и оптических свойств воды по уже имеющимся алгоритмам [2] и алгоритмам, приведённым в следующей главе.

4. АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЫ ПО НАКОПЛЕННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ПОДВОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ДОРОЖКИ

4.1. Определение показателя ослабления воды

Согласно результатам предыдущего раздела на начальном интервале оптических глубин яркость центральной части накопленного изображения солнечной дорожки ослабляется по закону Бугера. В этом случае показатель ослабления воды можно определить по формуле

$$c = \frac{\cos \vartheta'_s}{Z_2 - Z_1} \ln \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2}, \quad (23)$$

где $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$ — яркость центра накопленного изображения солнечной дорожки при её наблюдении с глубин Z_1 и $Z_2 > Z_1$ соответственно, ϑ'_s — угол, под которым виден центр Солнца из-под воды. Формулой (23) можно пользоваться при условии

$$\tau'_b = b_1 Z_2 / \cos \vartheta'_s \ll \tau_b^*,$$

где глубина τ_b^* определяется из уравнения

$$\frac{\exp(\tau_b^*)}{\tau_b^*} = \frac{m^2 \langle \gamma^2 \rangle}{\delta \vartheta_s^2 + (m-1)^2 \sigma^2},$$

$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$ — дисперсия уклонов поверхности, $\langle \gamma^2 \rangle$ — дисперсия индикатрисы рассеяния.

4.2. Определение показателя рассеяния воды

Рассеяние света в воде создаёт вокруг солнечной дорожки ореол, яркость которого зависит от глубины расположения приёмника, бальности волнения и оптических свойств воды. Если дисперсия уклонов поверхности определена, то показатель рассеяния воды можно оценить по какому-либо параметру, характеризующему соотношение между яркостями накопленных изображений солнечной дорожки и её ореола. В качестве такого параметра мы выбрали величину

$$P(\tau_b) = \frac{\int_{n_x^\varepsilon}^{\infty} \langle I(n_x, \tau_b) \rangle dn_x}{\int_0^{n_x^\varepsilon} \langle I(n_x, \tau_b) \rangle dn_x}, \quad (24)$$

где $\tau_b = b_1 Z$ — оптическая глубина по показателю рассеяния вперёд b_1 , $\langle I(n_x, \tau_b) \rangle$ — распределение яркости в одном из сечений накопленного изображения солнечной дорожки, n_x^ε — полуширина этого распределения по заданному уровню ε , определяемая из условия

$$\langle I(n_x^\varepsilon, \tau_b) \rangle / \langle I(0, \tau_b) \rangle = \varepsilon. \quad (25)$$

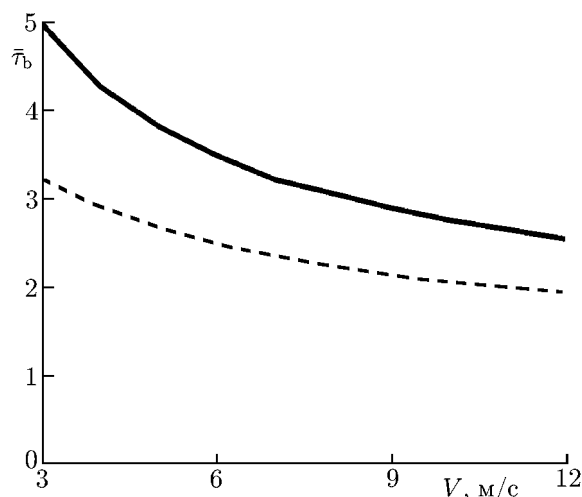


Рис. 3. Оптическая глубина, при которой яркости прямого и рассеянного света оказываются равными, как функция скорости ветра. Сплошная кривая соответствует равенству $\langle I^{(0)} \rangle = \langle I^{(1)} \rangle$, штриховая $\langle I^{(0)} \rangle = \langle I^{(M)} \rangle$, где $M > 1$ — кратность рассеяния

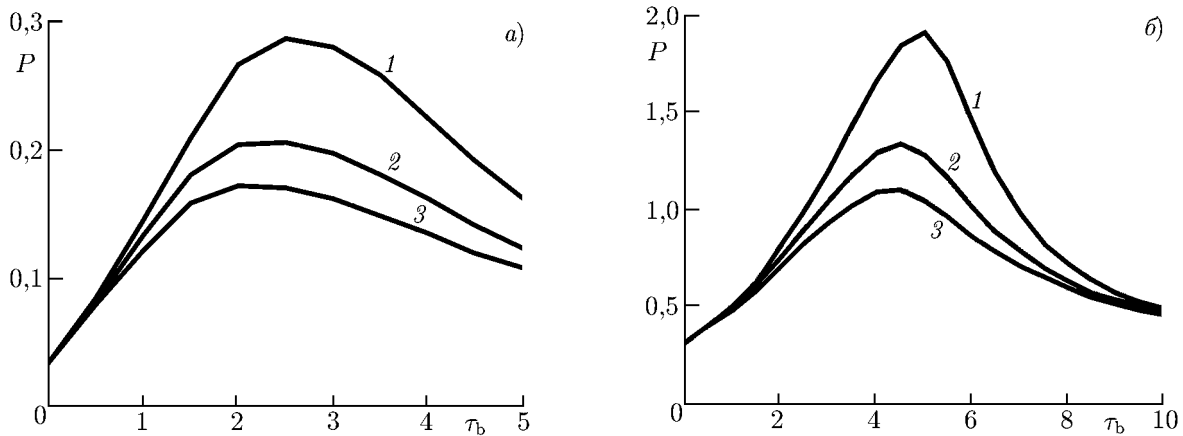


Рис. 4. Параметр P как функция оптической глубины τ_b для скоростей ветра $V = 3$ м/с (кривые 1), 6 м/с (кривые 2) и 9 м/с (кривые 3) при $\varepsilon = 0,1$ (а) и $\varepsilon = 0,5$ (б)

Связь между параметрами P и b_1 можно установить путём расчёта зависимости $P(\tau_b)$ по формуле (24) с использованием выражения

$$\langle I(n_x, \tau_b) \rangle = I_{00} \delta \vartheta_s^2 / (4\pi) \exp\left(-\tau_b / \sqrt{1 - n_x^2 - n_y^2}\right) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{d_{0x}}{4} p_x^2 - \frac{d_{0y}}{4} p_y^2 - \right. \\ \left. - i \left[p_x \left(n_x - \frac{n_{sx}}{m} \right) + p_y \left(\frac{n_y - n_{sy}}{m} \right) \right] + \tau_b x_s \left(\sqrt{p_x^2 + p_y^2} \right) \right\} dp_x dp_y \Big|_{n_y=0}, \quad (26)$$

которое следует из соотношений (19) и (21). На рис. 4 показаны результаты расчёта функции $P(\tau_b)$ для трёх скоростей ветра V при двух различных значениях уровня ε , по которому определяется полуширина распределения $\langle I(n_x, \tau_b) \rangle$. Приведёнными на рисунке данными можно пользоваться при высотах Солнца от 40° до 90° , при которых полуширина накопленного изображения солнечной дорожки по уровню 0,5 слабо зависит от высоты Солнца.

Приведённые на рис. 4 кривые могут быть использованы для оценки показателя рассеяния воды по результатам измерения скорости приводного ветра и зависимости параметра P от глубины погружения оптического приёмника. Как видно из рис. 4, зависимость $P(\tau_b)$ не является монотонной, вследствие чего величина τ_b и показатель рассеяния b_1 не могут быть однозначно определены по одному измеренному значению P . Эту неоднозначность можно устранить, обработав результаты видеосъёмки поверхности с двух близких глубин и определив, каким участком зависимости $P(\tau_b)$ следует воспользоваться для определения величины τ_b .

5. НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Натурный эксперимент проводился в 2012 году с борта океанографической платформы Морского гидрофизического института на Чёрном море с целью проверки возможности определения оптических характеристик воды по изображениям подводной солнечной дорожки. Для их регистрации использовалась экспериментальная оснастка, позволяющая работать на глубинах более 30 м, а в качестве оптического приёмника применялась бытовая веб-камера с высоким разрешением. Регистрация взволнованной поверхности велась сериями видеозаписей с длительностью от 5 до 30 мин преимущественно при чистом небосводе с ранних утренних часов вплоть до сумеречного освещения на протяжении трёх недель. Рабочий диапазон глубин составлял от 3 до 30 м, а

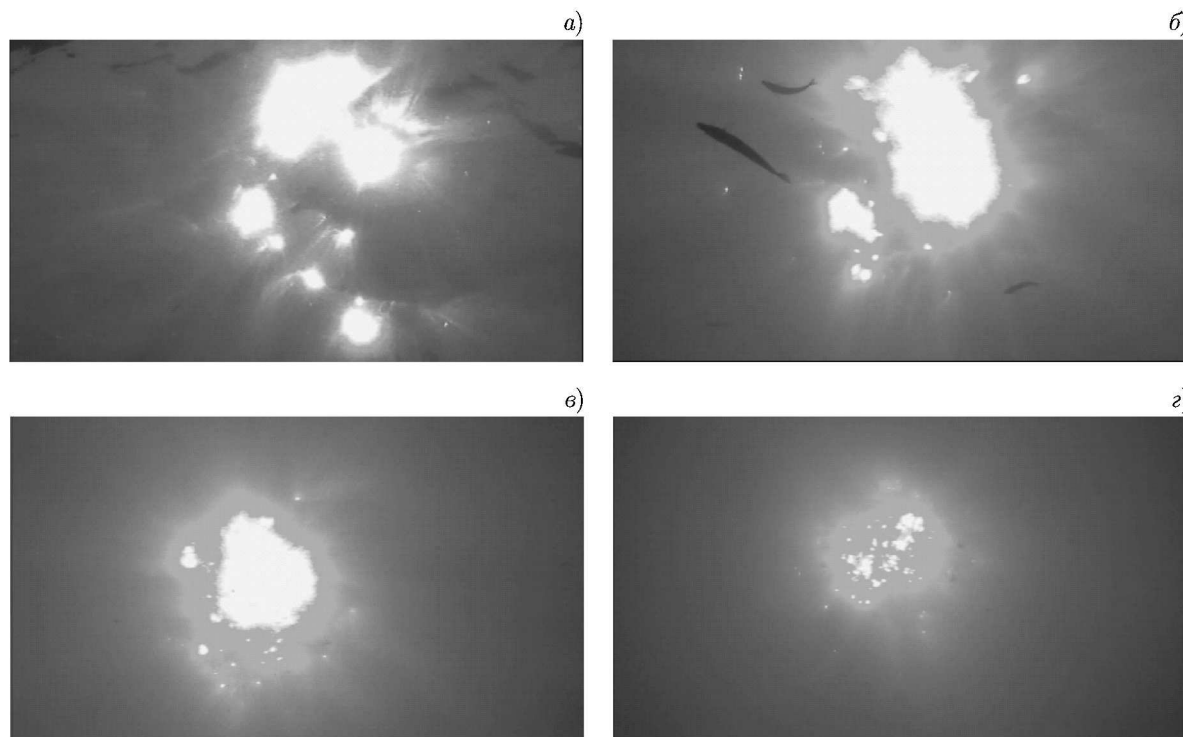


Рис. 5. Изображения подводной солнечной дорожки с глубины 3 м (а), 12 м (б), 21 м (в) и 30 м (г) при средней скорости ветра 7 м/с

скорость ветра менялась в пределах от 0,3 до 15 м/с. Контроль мутности воды осуществлялся с помощью диска Секки.

В ходе эксперимента удалось зафиксировать изменение структуры изображения подводной солнечной дорожки и яркости его центра с ростом глубины от 3 до 30 м (см. рис. 5). Видно, что на малых глубинах (примерно до 10 м) область ореола, формируемого рассеянным светом и наблюдаемого вокруг солнечной дорожки, практически отсутствует. Поэтому на таких глубинах вкладом рассеянного водой света в видимую яркость поверхности можно пренебречь и считать, что подводная солнечная дорожка формируется только прямым светом Солнца. Полученные таким образом экспериментальные оценки совпадают с теоретическими. На этих глубинах по разнице яркостей центра накопленного изображения подводной солнечной дорожки с помощью формулы (23) можно оценить показатель ослабления воды. В изображениях, зарегистрированных с глубин порядка 10 м при умеренных скоростях ветра (в пределах $6\div 8$ м/с), разрешимы блики, формируемые практически всем диапазоном длин волн, характерным для таких скоростей ветра. Поэтому обработка таких изображений подводной солнечной дорожки даёт наиболее точные значения дисперсии уклонов поверхности. С увеличением глубины рассеяние света в воде приводит к уширению светового ореола и потускнению бликовой области. На этом интервале глубин ($10\div 20$ м) по соотношению вкладов в видимую яркость поверхности от прямого и рассеянного света можно оценить показатель рассеяния воды. Наконец, на глубинах, превышающих 30 м, рассеянный свет начинает вносить преобладающий вклад в видимую яркость поверхности, а бликовая структура подводной солнечной дорожки становится едва различимой. Определение показателей ослабления и рассеяния воды рассматриваемым способом становится здесь затруднительным.

5.1. Определение показателя ослабления воды

Для определения показателя ослабления воды с помощью метода, описанного в предыдущем разделе, были использованы результаты видеосъёмки морской поверхности с относительно небольших глубин, на которых яркость накопленного изображения солнечной дорожки ослабляется по закону Бугера. Однако такие видеозаписи оказались малоинформативными из-за перегрузки фотоприёмника прямым светом Солнца. Поэтому оценка показателя ослабления проводилась на основе результатов видеосъёмки водной поверхности с больших глубин, на которых ослабление яркости накопленного изображения солнечной дорожки не описывалось законом Бугера. В соответствии с этим для решения обратной задачи использовалась теоретическая модель накопленного изображения солнечной дорожки, учитывающая вклад рассеянного света в её видимую яркость. Яркость центра накопленного изображения солнечной дорожки $\langle I(\mathbf{n}_{s\perp}) \rangle$ рассчитывалась по формуле (21), в которой показатель рассеяния воды и параметр её индикатрисы рассеяния были выражены через показатель ослабления с помощью корреляционных связей (22).

Показатель ослабления оценивался по величине параметра

$$F = \frac{\langle I(\mathbf{n}_{s\perp}) \rangle|_{Z=Z_1}}{\langle I(\mathbf{n}_{s\perp}) \rangle|_{Z=Z_2}}, \quad (27)$$

представляющего собой отношение яркостей $\langle I(\mathbf{n}_{s\perp}) \rangle|_{Z=Z_1}$ и $\langle I(\mathbf{n}_{s\perp}) \rangle|_{Z=Z_2}$ центра накопленных изображений подводной солнечной дорожки на двух различных глубинах Z_1 и Z_2 , с помощью подгонки его расчётного значения к измеренному. Пример расчёта параметра F как функции показателя ослабления воды для трёх скоростей ветра и глубин $Z_1 = 24$ м, $Z_2 = 30$ м показан рис. 6.

Для оценки показателя ослабления были использованы видеозаписи подводной солнечной дорожки, сделанные с глубин 24 и 30 м в дневные часы при скорости ветра 6 м/с. На рис. 7а, б

Рис. 6. Параметр F как функция показателя ослабления воды для скоростей ветра 3 м/с (кривая 1), 6 м/с (кривая 2), 9 м/с (кривая 3) и глубин $Z_1 = 24$ м, $Z_2 = 30$ м

приведены два случайно выбранных кадра видеозаписи, на рис. 7в, г — накопленные (по 500 кадров) изображения, а на рис. 7д, е — сечения накопленных изображений по ветру, проходящие через максимум яркости. На рис. 7в, г по осям отложены координаты точки изображения в пикселах, а на рис. 7д, е по оси абсцисс — координата точки сечения изображения в пикселах, по оси ординат — яркость в градациях серого цвета (от 0 (чёрный цвет) до 255 (белый цвет)).

Согласно рис. 7д, е, экспериментальные значения яркости центра накопленного изображения солнечной дорожки на глубинах 24 и 30 м были равны $\langle I \rangle|_{Z=Z_1} = 180$ и $\langle I \rangle|_{Z=Z_2} = 65$ (в условных единицах), а их отношение $F \approx 2,76$. Из теоретических кривых рис. 6 следует, что такому значению F соответствует показатель ослабления $c \approx 0,3$ м⁻¹. Оценки показателя ослабления воды по глубине видимости диска Секки z_6 с использованием эмпирического соотношения

$$c = 6/z_6, \quad (28)$$

дали значение $c \approx 0,34$ м⁻¹, достаточно близкое к полученному путём обработки изображений солнечной дорожки.

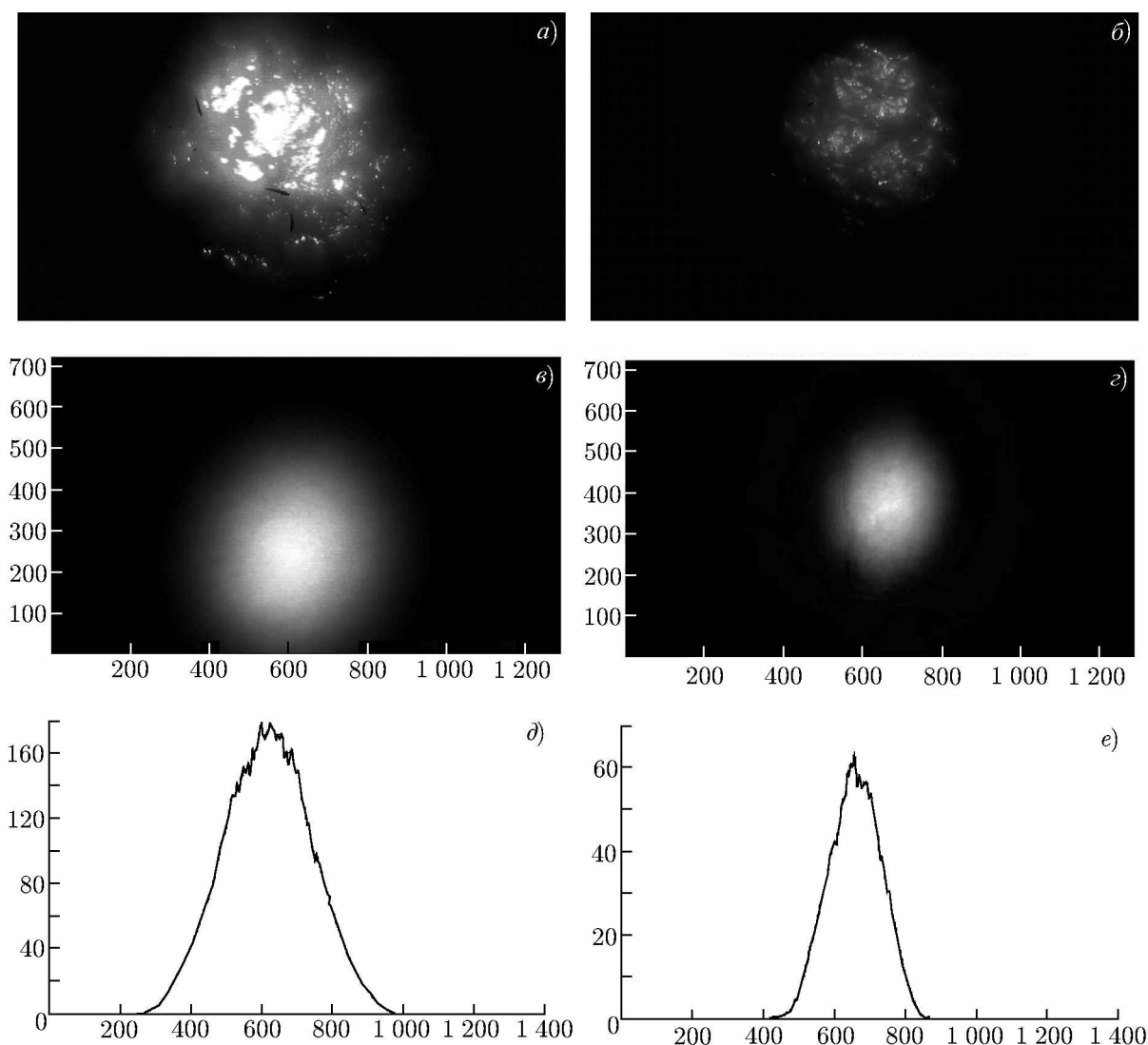


Рис. 7. Мгновенные изображения подводной солнечной дорожки, наблюдаемые с глубин 24 (а) и 30 м (б) при скорости ветра 6 м/с, соответствующие им накопленные изображения (в, г) и сечения накопленных изображений в направлении ветра (д, е). На панелях (в) и (г) по осям отложены координаты точки изображения в пикселах, на панелях (д) и (е) по оси абсцисс — координата точки сечения изображения в пикселах, по оси ординат — яркость в градациях серого от 0 (чёрный цвет) до 255 (белый цвет)

5.2. Определение показателя рассеяния воды

Для отработки методики определения показателя рассеяния воды по изображению подводной солнечной дорожки использовались её видеозаписи, сделанные с глубин от 6 до 10 м. В качестве примера на рис. 8а приведено мгновенное изображение подводной солнечной дорожки, наблюдаемой с глубины 4 м при скорости ветра 3 м/с, на рис. 8б — её накопленное по 500 кадрам изображение, а на рис. 8в — сечение накопленного изображения, проходящее через максимум яркости.

Из рис. 8в видно, что «хвосты» распределения яркости находятся за пределами изображе-

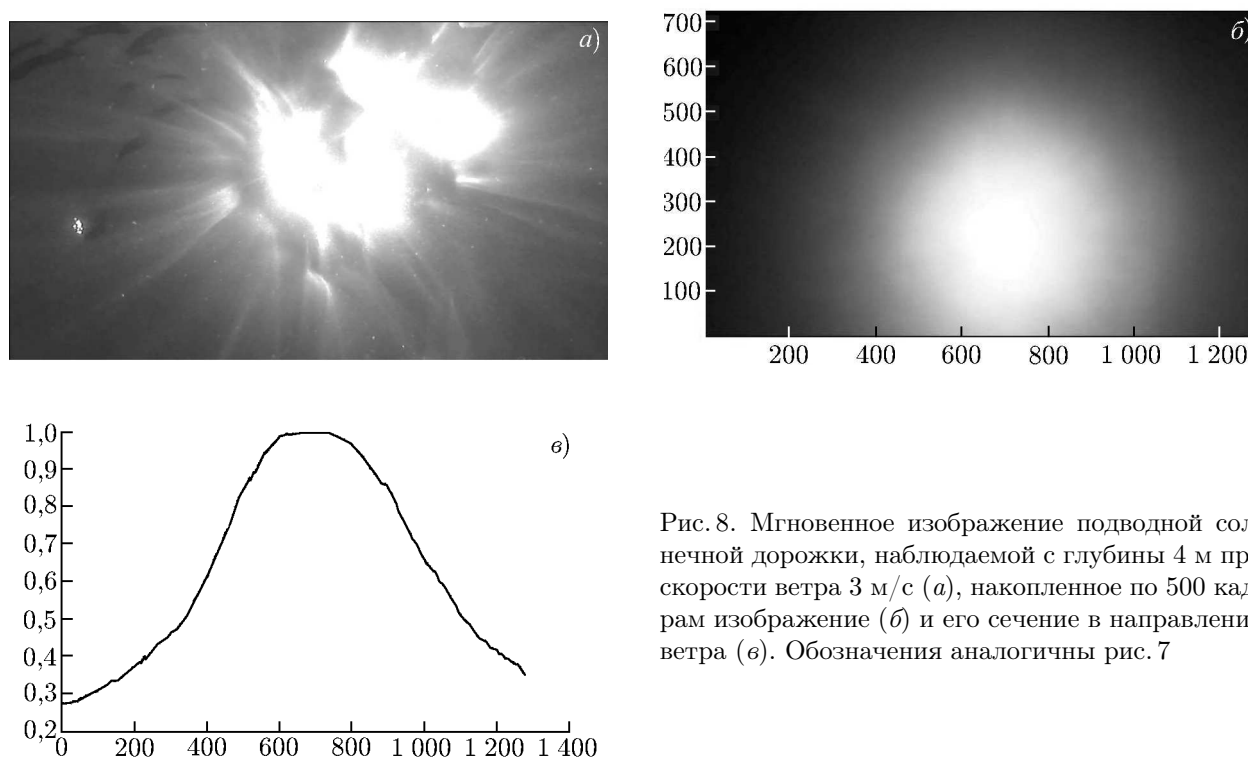


Рис. 8. Мгновенное изображение подводной солнечной дорожки, наблюдаемой с глубины 4 м при скорости ветра 3 м/с (а), накопленное по 500 кадрам изображение (б) и его сечение в направлении ветра (в). Обозначения аналогичны рис. 7

ния, поэтому при оценке параметра P по формуле (24) полуширина накопленного изображения солнечной дорожки определялась по уровню $\varepsilon = 0,5$. Оценка параметра P по нескольким видеозаписям, сделанным с разных глубин, и сопоставление экспериментальных значений $P = 0,4 \div 0,8$ с теоретическими кривыми рис. 4 позволило сделать вывод, что показатель рассеяния вперёд был примерно равен $0,25 \text{ м}^{-1}$. Сделанную оценку показателя рассеяния следует считать несколько заниженной, поскольку при интегрировании распределения яркости по формуле (24) «хвост» этого распределения обрезался из-за ограниченности поля зрения видеокамеры.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый метод дистанционного измерения оптических свойств воды, основанный на регистрации и анализе изображений подводной солнечной дорожки, наблюдаемой с определённой глубины через толщу воды. Разработаны модели мгновенного и накопленного изображений подводной солнечной дорожки, формируемой прямым, однократно и многократно рассеянным светом. Показано, что рассеяние света в воде приводит к образованию светового ореола в накопленном изображении подводной солнечной дорожки, величина которого растёт с увеличением глубины. Методом численного моделирования установлено, что при умеренных скоростях ветра (до 12 м/с) на оптических глубинах, меньших 2, вкладом рассеянного света в видимую яркость поверхности можно пренебречь. Для таких глубин продемонстрирована возможность определения показателя ослабления воды по соотношению яркостей центров накопленных изображений поверхности на двух глубинах. Найден алгоритм восстановления показателя рассеяния вперёд по величине параметра, характеризующего соотношение между световыми потоками, заключёнными в солнечной дорожке и в световом ореоле вокруг неё. Изложена методика обработки натурных изображений, на основании которых апробированы алгоритмы восстановления

оптических свойств воды.

Полученные результаты подтверждают пригодность подводной видеосистемы в качестве инструмента контроля мутности воды, что может быть полезно, например, для экологического мониторинга состояния водоёма.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 13-05-97038-р_Поволжье_а, 13-05-97059-р_Поволжье_а и 14-05-00138_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 1. С. 36.
2. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 617.
3. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 5. С. 615.
4. Dolin L., Gilbert G., Levin I., Luchinin A. Theory of imaging through wavy sea surface. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2006. 172 p.
5. Luchinin A. G. Ocean optics-air and sea interface. Encyclopedia of optical engineering. Marcel Dekker Encyclopedia of optical engineering. DOI: 10.108/E-EOE 120009547. 2003. P. 1534.
6. Вебер В. Л., Долин Л. С. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17, № 11. С. 1168.
7. Вебер В. Л. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19, № 10. С. 1095.
8. Лучинин А. Г. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. Т. 22, № 2. С. 195.
9. Вебер В. Л. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5, № 8. С. 869.
10. Вебер В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 58, № 1. С. 38.
11. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 232 с.
12. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Мониной. М.: Наука, 1983. 372 с.
13. Долин Л. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7, № 2. С. 380.
14. Walker R. E. Marine light field. New York: Statistics John Wiley and Sons, 1994. 675 p.
15. Долин Л. С., Савельев В. А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 6. С. 794.
16. Левин И. М., Копелевич О. В. // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 344.

Поступила в редакцию 30 октября 2014 г.; принята в печать 16 января 2015 г.

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING OPTICAL PROPERTIES OF WATER BY THE UNDERWATER SOLAR-PATH IMAGE

A. A. Molkov and L. S. Dolin

We study the possibility of determining the inherent hydrooptical characteristics of water using the underwater-vision means. Analytical models of the instantaneous and accumulated images of the underwater solar path, which is formed by direct, as well as singly and multiply scattered light are proposed. The optical depths at which the water-scattered light contribution to the visible brightness of the surface becomes prevailing are estimated using numerical simulation. The algorithms for reconstructing the water scatter and attenuation indices using the accumulated image of the underwater solar path are developed. The results of the algorithm validation using the full-scale experiment data are presented.

A. A. Мольков, Л. С. Долин