

УДК 551.463.5

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ КРУГА СНЕЛЛИУСА †

*Л. С. Долин, А. А. Мольков**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработана аналитическая модель круга Снеллиуса, учитывающая эффекты поглощения и многократного рассеяния света в воде. Обнаружен эффект аномально слабой зависимости видимой яркости границы круга Снеллиуса от мутности воды, который наряду с эффектом «размытия» его границы из-за рассеяния света в воде может быть использован для определения показателей поглощения и рассеяния воды путём соответствующей обработки изображений круга Снеллиуса. Предложены и экспериментально проверены алгоритмы определения первичных гидрооптических характеристик по изображениям круга Снеллиуса с использованием эмпирических корреляционных связей между различными характеристиками.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что количественную информацию об оптических свойствах природных мутных сред можно получать, анализируя влияние среды на изображения определённых тестовых объектов. Примерами практической реализации такой возможности могут служить классические методы оценки показателя ослабления света в атмосфере и морской воде, основанные на измерении метеорологической дальности видимости (т. е. визуальной дальности видимости чёрного объекта на фоне неба) [1] и глубины видимости диска Секки (т. е. погружённого в воду белого диска определённого размера) [2–4]. Данная работа посвящена проблеме определения первичных гидрооптических характеристик по изображениям нижней стороны водной поверхности, зарегистрированным с помощью подводной фотокамеры или видеокамеры в условиях естественного освещения.

Традиционная область применения средств подводного наблюдения — это изучение флоры и фауны Мирового океана, поиск объектов на морском дне и контроль его экологического состояния, строительство и ремонт подводных сооружений, аварийно-спасательные работы. Вместе с тем, как было показано в работах [5–8], эти средства можно использовать и для изучения верхнего слоя океана — определения характеристик ветрового волнения, обнаружения плёнок поверхностно-активных веществ, оценки показателей поглощения и рассеяния воды. Указанная информация получается путём обработки двух элементов изображения поверхности — подводной солнечной дорожки (искажённого волнением изображения Солнца) и круга Снеллиуса (подводного изображения небосвода).

Методика определения первичных гидрооптических характеристик по накопленному изображению подводной солнечной дорожки была представлена в работе [8], а данная статья посвящена проблеме нахождения этих характеристик по изображениям круга Снеллиуса. В статье приводятся формулы для расчёта изображения круга Снеллиуса с учётом эффектов поглощения и многократного рассеяния света в воде, алгоритмы определения первичных гидрооптических характеристик по изображениям круга Снеллиуса, основанные на его математической модели, и предварительные результаты экспериментальной проверки указанных алгоритмов.

† Статья подготовлена для специального выпуска журнала к 100-летию В. Л. Гинзбурга

* a.molkov@inbox.ru

1. МОДЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГА СНЕЛЛИУСА

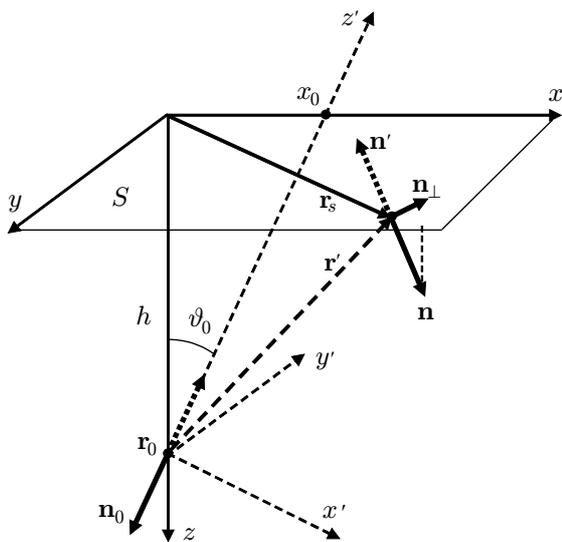


Рис. 1. Геометрические параметры модели изображения круга Снеллиуса

Поэтому небо при его наблюдении из-под воды выглядит как светлый круг на водной поверхности с угловым радиусом θ_s (круг Снеллиуса).

По мере приближения направления визирования к границе круга Снеллиуса его видимая яркость уменьшается из-за увеличения коэффициента отражения R с ростом угла падения света θ_i , что делает границу слегка размытой даже при её наблюдении с небольших глубин при высокой прозрачности воды. При наличии волнения структура «мгновенных» изображений круга Снеллиуса искажается, а влияние волнения на накопленное (т.е. усреднённое по времени) изображение проявляется в дополнительном размытии его границы. Однако наиболее сильное размытие границы круга может возникать из-за рассеяния света в воде, что создаёт предпосылки для использования изображения круга Снеллиуса в качестве источника информации об её оптических свойствах. Для получения этой информации необходимо располагать соответствующими алгоритмами решения обратной задачи, которые должны базироваться на модели изображения круга Снеллиуса, устанавливающей зависимость его структуры от первичных гидрооптических характеристик — показателей поглощения a и рассеяния b воды и её индикатрисы рассеяния $P(\gamma)$.

При построении модели изображения круга Снеллиуса будем предполагать, что оно формируется с помощью идеальной системы видения, осуществляющей регистрацию углового распределения яркости на заданной глубине h . Эффектами обратного рассеяния света в воде пренебрегаем. Для решения задачи воспользуемся методом функции Грина, а именно соотношением [9]

$$L(\mathbf{r}_0, \mathbf{n}_0) = \int_S d\mathbf{r}_s \int_{n_z \geq 0} n_z L_s(\mathbf{n}) G(\mathbf{r}_0, -\mathbf{n}_0 \rightarrow \mathbf{r}_s, -\mathbf{n}) d\Omega, \tag{2}$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла. Формула (2) позволяет выразить яркость света L в точке наблюдения \mathbf{r}_0 в заданном направлении \mathbf{n}_0 через яркость $L_s(\mathbf{n})$ входящего в воду излучения и яркость света $G(\mathbf{r}_0, -\mathbf{n}_0 \rightarrow \mathbf{r}_s, -\mathbf{n})$ в точке водной поверхности \mathbf{r}_s и направлении $\mathbf{n}' = -\mathbf{n}$ от вспомогательного точечного мононаправленного источника, помещённого в точку \mathbf{r}_0 и действующего в направлении $-\mathbf{n}_0$ (см. рис. 1). Функцию Грина G выразим через решение уравнения переноса

В отсутствие волнения яркость проникающего в воду света $L_s(\mathbf{n}_\perp)$ связана с яркостью падающего на водную поверхность S света $L_i(\mathbf{n}_\perp)$ соотношением

$$L_s(\mathbf{n}_\perp) = m^2 [1 - R(m\mathbf{n}_\perp)] L_i(m\mathbf{n}_\perp), \tag{1}$$

где $\mathbf{n}_\perp(n_x, n_y)$ — горизонтальная составляющая единичного вектора \mathbf{n} , характеризующего направление луча (см. рис. 1), $m = 1,33$ — показатель преломления воды, R — энергетический коэффициент отражения Френеля, являющийся функцией $\sin \theta_i$, где θ_i — угол падения света на поверхность. Как видно из соотношения (1), идущий от горизонта свет неба входит в воду под углом к нормали $\theta_s = \arcsin(1/m) \approx 48,75^\circ$, который совпадает с углом полного внутреннего отражения света от нижней стороны водной поверхности.

излучения в малоугловом приближении, имеющее вид [10, 11]

$$g(\mathbf{r}_\perp, z, \mathbf{n}_\perp) = \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} g_s(\mathbf{k}, z, \mathbf{p}) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}_\perp + i\mathbf{p}\mathbf{n}_\perp) d\mathbf{k} d\mathbf{p}, \quad (3)$$

$$g_s(\mathbf{k}, z, \mathbf{p}) = (2\pi)^{-4} \exp[-cz + b \int_0^z P_s(|\mathbf{p} + \mathbf{k}\varsigma|) d\varsigma], \quad (4)$$

$$P_s(p) = \frac{1}{2} \int_0^\infty P_1(\gamma) J_0(p\gamma) \gamma d\gamma. \quad (5)$$

Здесь z — координата вдоль оси светового пучка, $\mathbf{r}_\perp(x, y)$ и $\mathbf{n}_\perp(n_x, n_y)$ — поперечные составляющие радиуса-вектора точки пространства \mathbf{r} и единичного вектора \mathbf{n} , характеризующего направление луча, $c = a + b$ — показатель ослабления воды, функция $P_1(\gamma)$ описывает остронаправленную часть индикатрисы рассеяния воды и удовлетворяет условию нормировки $(1/2) \int_0^\infty P_1(\gamma) \gamma d\gamma = 1$, $J_0(x)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Выведем формулы для расчёта распределения яркости в произвольно выбранном радиальном сечении изображения круга Снеллиуса. Для определённости примем в качестве радиального сечения линию $y = 0$ на водной поверхности, а структуру круга Снеллиуса будем характеризовать функцией $L(\vartheta_0, h)$, описывающей зависимость видимой яркости точки поверхности x_0 от её полярного угла ϑ_0 (см. рис. 1). Как следует из соотношения (2), эта функция выражается через яркость вошедшего в воду света и функцию g с помощью формулы

$$L(\vartheta_0, h) = \int_{n_\perp \leq 1} L_s(\mathbf{n}_\perp) \left[\int_{LS} g(\mathbf{r}'_\perp, z', \mathbf{n}'_\perp) d\mathbf{r}_s \right] d\mathbf{n}_\perp \quad (6)$$

и уравнений

$$x' = x \cos \vartheta_0 - h \sin \vartheta_0, \quad y' = -y, \quad z' = x \sin \vartheta_0 + h \cos \vartheta_0, \quad (7)$$

$$n'_x = -n_x \cos \vartheta_0 - \sqrt{1 - n_x^2 - n_y^2} \sin \vartheta_0, \quad n'_y = n_y. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) устанавливают связь между переменными $\mathbf{r}'_\perp(x', y')$, z' , $\mathbf{n}'_\perp(n'_x, n'_y)$ и переменными $\mathbf{r}_s(x, y)$, $\mathbf{n}_\perp(n_x, n_y)$, т.е. связь между компонентами векторов \mathbf{r}_s , \mathbf{n} в системах координат x, y, z и x', y', z' (см. рис. 1).

Для упрощения формулы (6) заменим в ней переменные интегрирования x, y, n_x, n_y на x', y', n'_x, n'_y и воспользуемся предположением о том, что поле g вспомогательного светового пучка на расстоянии z' от источника остаётся сильно анизотропным, т.е. его яркость можно считать пренебрежимо малой при $n'_\perp > n_\perp^{\max}$, $r'_\perp > r_\perp^{\max}$ ($n_\perp^{\max} \ll 1$, $r_\perp^{\max} \ll 1$). С учётом этого предположения аргумент

$$n_x = -n'_x \cos \vartheta_0 - \sqrt{1 - (n'_x)^2 - (n'_y)^2} \sin \vartheta_0 \quad (9)$$

функции $L_s(n_x, n_y)$ приближённо представим в виде $n_x \approx -n'_x \cos \vartheta_0 - \sin \vartheta_0$, а аргумент

$$z' = h / \cos \vartheta_0 + x' \operatorname{tg} \vartheta_0 \quad (10)$$

функции g заменим на $z' \approx h' \cos \vartheta_0$. Основываясь на формулах (7), (8) и упрощённой записи соотношения (9), будем полагать $dx = dx' / \cos \vartheta_0$, $dy = -dy'$, $dn_x \approx -dn'_x \cos \vartheta_0$, $dn_y = -dn'_y$, $d\mathbf{r}_s d\mathbf{n}_\perp \approx dx' dy' dn'_x dn'_y$. При выполнении интегрирования по переменной n'_y воспользуемся приближённым соотношением $\int L_s(n_x, n'_y) g(\mathbf{r}'_\perp, z', \mathbf{n}'_\perp) dn'_y \approx L_s(n_x, 0) \int g(\mathbf{r}'_\perp, z', \mathbf{n}'_\perp) dn'_y$,

которое справедливо при условии малости ширины углового распределения яркости во вспомогательном световом пучке по сравнению с угловым размером круга Снеллиуса. После этих упрощений выражение для видимой яркости круга Снеллиуса принимает вид

$$L(\vartheta_0, h) \approx \int_{-1}^1 L_s(\cos \vartheta_0 n'_x - \sin \vartheta_0, 0) \bar{g}(h, \vartheta_0, n'_x) dn'_x, \quad (11)$$

$$\bar{g}(h, \vartheta_0, n'_x) = \pi^{-1} \exp(-ah/\cos \vartheta_0) \int_0^\infty \exp\{-(bh/\cos \vartheta_0)[1 - P_s(p)]\} \cos(n'_x p) dp. \quad (12)$$

В формуле (11) изменён знак переменной n'_x в аргументе функции L_s ; это можно сделать, поскольку \bar{g} чётная функция аргумента n'_x .

Как видно из формул (11) и (12), при сделанных предположениях распределение яркости в сечении изображения круга Снеллиуса линией $y = 0$ зависит от углового распределения яркости входящего в воду света $L_s(n_x, n_y)$ при $n_y = 0$, а также от глубины погружения системы видения и оптических характеристик воды — показателей поглощения и рассеяния, а также индикатрисы рассеяния. В качестве углового спектра индикатрисы рассеяния будем использовать функцию

$$P_s(p) = (1 + d_p p^2/2)^{-1/2} \exp(-\alpha p^2). \quad (13)$$

При $\alpha = 0$ эта функция превращается в угловой спектр индикатрисы

$$P_1(\gamma) = 2\sqrt{2/d_p} \gamma^{-1} \exp(-\sqrt{2/d_p} \gamma), \quad (14)$$

единственным параметром которой является дисперсия угла однократного рассеяния

$$d_p = (1/2) \int_0^\infty \gamma^2 P_1(\gamma) \gamma d\gamma. \quad (15)$$

Индикатриса (14) использовалась в целом ряде работ по теории подводного видения [11]. При соответствующих значениях параметра d_p она хорошо описывает форму реальных индикатрис морской воды в интервале углов рассеяния $0,5^\circ < \gamma < (30 \div 45)^\circ$. Экспоненциальный множитель в выражении (13) введён для устранения особенности $P_1(\gamma)$ при $\gamma = 0$, которая не оказывает заметного влияния на результаты расчёта световых полей, но усложняет эти расчёты. В дальнейшем мы будем полагать $\alpha = 10^{-4}$ с тем, чтобы модифицированная индикатриса с угловым спектром (13) не отличалась заметно от индикатрисы (14) при $\gamma > 0,5^\circ$, а при $0^\circ < \gamma < 0,5^\circ$ принимала значения, близкие к $P_1(0,5^\circ)$.

Применимость формул (11) и (12) ограничивается двумя основными условиями: световое поле L должно быть горизонтально однородным в водном столбе с поперечным размером $\Delta x > \Delta x_0 \sim 5h$ и глубина h должна быть такой, чтобы вспомогательный световой пучок после прохождения через водный слой с толщиной $h/\cos \vartheta_s$ оставался достаточно узким.

Мелкомасштабные горизонтальные вариации светового поля возникают в основном под влиянием поверхностных волн. Эти вариации устраняются путём накопления принимаемого оптического сигнала и формирования статистически среднего изображения круга Снеллиуса. Последнее можно анализировать с помощью формул (11), (12), полагая, что функции L и L_s описывают накопленное изображение круга Снеллиуса и накопленное угловое распределение яркости входящего в воду света соответственно. Для расчёта случайных реализаций изображения круга Снеллиуса эти формулы не пригодны.

Ограничение на глубину погружения системы видения определяется условием $d_p b h \ll \cos \vartheta_s$.

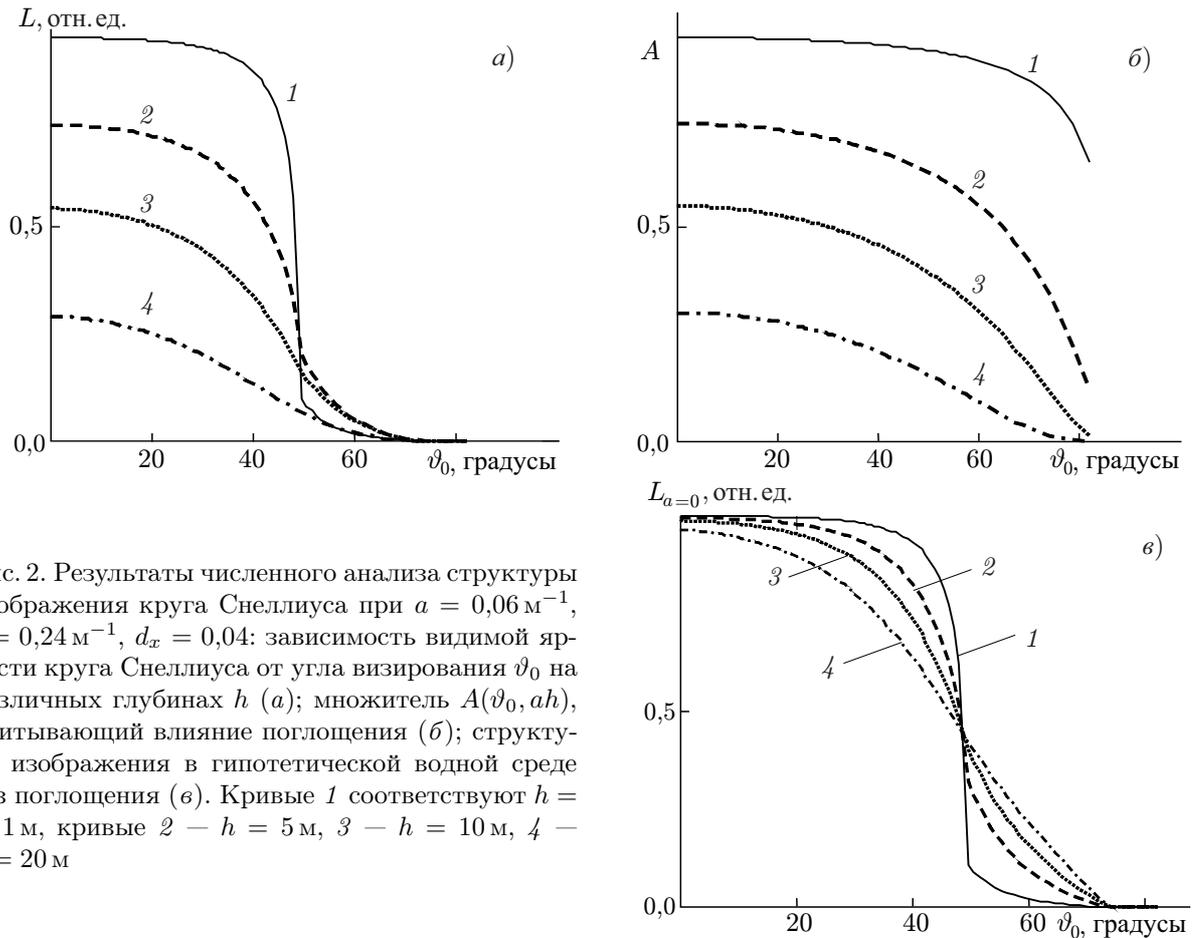


Рис. 2. Результаты численного анализа структуры изображения круга Снеллиуса при $a = 0,06 \text{ м}^{-1}$, $b = 0,24 \text{ м}^{-1}$, $d_x = 0,04$: зависимость видимой яркости круга Снеллиуса от угла визирования ϑ_0 на различных глубинах h (а); множитель $A(\vartheta_0, ah)$, учитывающий влияние поглощения (б); структура изображения в гипотетической водной среде без поглощения (в). Кривые 1 соответствуют $h = 1 \text{ м}$, кривые 2 — $h = 5 \text{ м}$, 3 — $h = 10 \text{ м}$, 4 — $h = 20 \text{ м}$

2. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГА СНЕЛЛИУСА

Примеры расчёта видимой яркости круга Снеллиуса в зависимости от полярного угла ϑ_0 и глубины погружения фотоприёмника h показаны на рис. 2а. При выполнении расчётов яркость небосвода считалась однородной, а водная поверхность — гладкой. Яркость входящего в воду света $L_s(n_\perp)$ при $n_\perp < 1/m$ определялась по формуле (1) с использованием выражения для коэффициента отражения неполяризованного света, а при $n_\perp > 1/m$ считалась равной нулю. Рисунок 2а показывает, что с ростом глубины происходит общее ослабление видимой яркости круга Снеллиуса и размытие его границы.

Как видно из формул (11) и (12), выражение для видимой яркости круга Снеллиуса может быть записано в виде произведения двух функций:

$$L(\vartheta_0, h) = A(\vartheta_0, ah)[L(\vartheta_0, h)]_{a=0}, \quad (16)$$

первая из которых,

$$A(\vartheta_0, ah) = \exp(-ah/\cos \vartheta_0), \quad (17)$$

учитывает влияние поглощения на изображение круга Снеллиуса, а вторая, $[L(\vartheta_0, h)]_{a=0}$, описывает структуру его изображения в гипотетической водной среде без поглощения. Зависимость этих функций от параметров ϑ_0 и h показана на рис. 2б, в.

Важная особенность кривых, представленных на рис. 2в, состоит в том, что все они пересекаются при $\vartheta_0 = \vartheta_s$. Это означает, что, согласно приведённым формулам, рассеяние света в воде не оказывает влияния на видимую яркость границы круга Снеллиуса и, следовательно, её яркость $L(\vartheta_s, h)$ ослабляется с глубиной только из-за поглощения. Разумеется, в действительности некоторая зависимость видимой яркости границы круга Снеллиуса от мутности воды должна наблюдаться, по крайней мере из-за обратного рассеяния света в воде, которое нами не учитывалось. Кроме того, при выводе формул (11) и (12) размытие изображения границы светящегося круга в неявном виде было уподоблено размытию изображения границы светящейся полуплоскости, что тоже могло привести к некоторой погрешности в оценке влияния рассеяния на видимую яркость границы круга Снеллиуса. Однако при условии $d_x bh \ll \cos \vartheta_s$ это влияние не должно быть существенным, что создаёт предпосылки для построения простых алгоритмов определения показателей поглощения и рассеяния воды по результатам измерения показателя ослабления яркости света под углом $\vartheta_0 = \vartheta_s = 48,75^\circ$ и параметра, характеризующего размытие границы круга Снеллиуса.

3. АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ВОДЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ КРУГА СНЕЛЛИУСА

Если считать, что ослабление видимой яркости границы круга Снеллиуса полностью определяется сомножителем $A(\vartheta_0, h)$ формулы (16), то показатель поглощения воды выражается следующим образом через яркость света на двух различных глубинах h_1, h_2 под углом к вертикали $\vartheta_s = 48,75^\circ = 0,85$ рад:

$$a = \frac{\cos \vartheta_s}{h_2 - h_1} \ln \frac{L(\vartheta_s, h_1)}{L(\vartheta_s, h_2)}, \quad \cos \vartheta_s = 0,66. \quad (18)$$

По известному показателю поглощения воды и измеренным распределениям $L(\vartheta_0, h)$ можно найти вспомогательную функцию

$$[L(\vartheta_0, h)]_{a=0} = L(\vartheta_0, h)/A(\vartheta_0, ah), \quad (19)$$

которая зависит только от характеристик рассеяния воды — показателя рассеяния b и дисперсии индикатрисы рассеяния d_p . Для их определения можно воспользоваться процедурой поиска значений b и d_p , при которых теоретическая зависимость $[L(\vartheta_0, h)]_{a=0}$ наилучшим образом согласуется с экспериментальной. Другой возможный подход к решению обратной задачи основывается на введении определённого параметра, характеризующего степень размытия границы круга Снеллиуса, и нахождении характеристик рассеяния путём подгонки теоретического значения этого параметра к экспериментальному. В качестве такого параметра можно, например, использовать дисперсию $d(h)$ диаграммы

$$D(\vartheta_0, h) = - \frac{d[L(\vartheta_0, h)]_{a=0}}{d\vartheta_0}, \quad (20)$$

получаемой дифференцированием скорректированного изображения круга Снеллиуса $[L(\vartheta_0, h)]_{a=0}$ по полярному углу ϑ_0 . Примеры расчёта этой диаграммы показаны на рис. 3.

Величина $d(h)$ выражается через угловые моменты

$$M_n(h) = \int_0^{\pi/2} \vartheta_0^n D(\vartheta_0, h) d\vartheta_0, \quad n = 0, 1, 2, \quad (21)$$

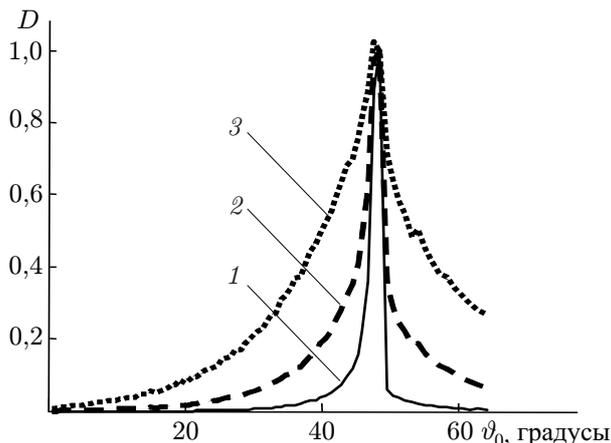


Рис. 3. Результат дифференцирования по углу ϑ_0 распределений $L_{a=0}$, представленных на рис. 2е для $h = 1$ м (кривая 1), 5 м (кривая 2) и 10 м (кривая 3)

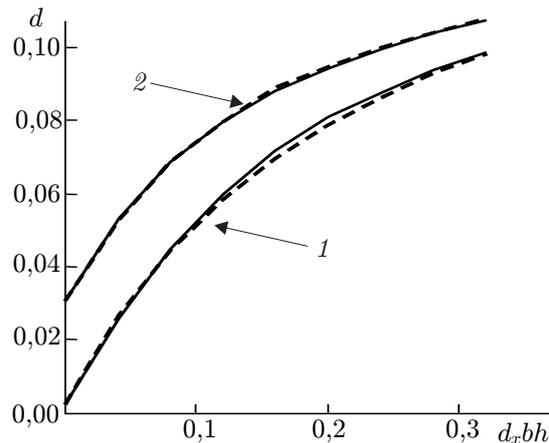


Рис. 4. Зависимость параметра d от $d_x b h$ в отсутствие (кривые 1) и при наличии (кривые 2) волнения

диаграммы $D(\vartheta_0, h)$ по формуле

$$d(h) = M_2/M_0 - M_1^2/M_0^2. \quad (22)$$

Для расчёта моментов M_n удобно использовать выражения

$$M_0(h) = [L(0, h)]_{a=0}, \quad M_1(h) = \int_0^{\pi/2} [L(\vartheta_0, h)]_{a=0} d\vartheta_0, \quad M_2(h) = 2 \int_0^{\pi/2} \vartheta_0 [L(\vartheta_0, h)]_{a=0} d\vartheta_0, \quad (23)$$

справедливые при условии $L(\pi/2, h) = 0$.

Расчёты параметра d указанным способом показали, что при $0,03 < d_x < 0,05$, характерных для вод с показателем ослабления $c > 0,1 \text{ м}^{-1}$ [11], зависимость $d(h)$ с приемлемой точностью описывается формулой

$$d(h) = d(0) + \frac{0,7\beta h}{1 + [4 + 65d(0)]\beta h}, \quad \beta = d_x b, \quad (24)$$

согласно которой значение d на глубине h в основном зависит от произведения $d_x b h$ и значения d на нулевой глубине, которое определяется характеристиками волнения. Результаты расчёта параметра d по формулам (11), (12) и (19)–(23) показаны на рис. 4 сплошными кривыми, а зависимость (24) — штриховыми кривыми. Кривые 1 соответствуют плоской водной поверхности, а кривые 2 описывают размытие границы накопленного изображения круга Снеллиуса в условиях сильного волнения, когда среднеквадратичный уклон поверхности $\sigma_\eta = 0,2$ (скорость приводного ветра порядка 10 м/с). При построении кривых 2 накопленное изображение круга Снеллиуса при $bh \rightarrow 0$, необходимое для нахождения величины $d(0)$, моделировалось с помощью формул работы [7].

Как следует из выражения (24), задача определения величин β и $d = d(0)$ по результатам измерения параметра d сводится к решению системы уравнений

$$d_i = d_0 + \frac{0,7\beta h_i}{1 + (4 + 65d_0)\beta h_i}, \quad i = 1, 2, \quad (25)$$

где $d_1 = d(h_1)$ и $d_2 = d(h_2)$ — значения параметра d на глубинах h_1 и h_2 соответственно.

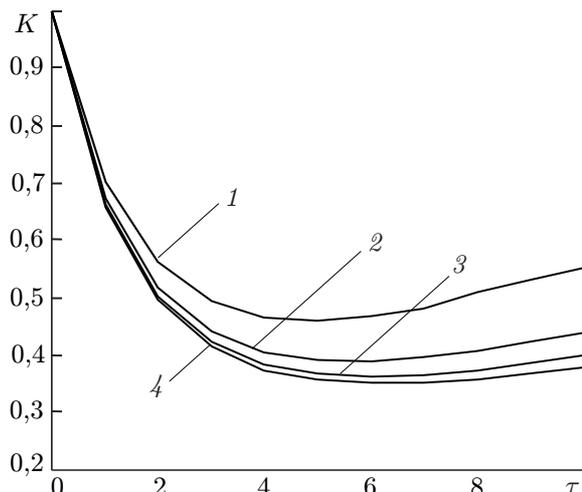


Рис. 5. Теоретическая зависимость параметра K от оптической глубины $\tau = ch$ для нескольких значений показателя ослабления. Кривая 1 соответствует $c = 0,25 \text{ м}^{-1}$, 2 — $0,5 \text{ м}^{-1}$, 3 — $0,75 \text{ м}^{-1}$, 4 — 1 м^{-1}

Данные о величине β можно использовать для оценки показателя рассеяния и дисперсии индикатрисы рассеяния воды благодаря существованию эмпирических корреляционных связей между различными первичными гидрооптическими характеристиками [12]. Формулы для их оценки имеют вид

$$b = 28,6\beta - 0,02, \quad d_p = \beta/b. \tag{26}$$

Предлагаемая модель изображения круга Снеллиуса не учитывает эффекты рассеяния света на большие углы, что должно приводить к завышенным оценкам показателя поглощения воды и заниженным оценкам показателя рассеяния при использовании этой модели для решения обратной задачи. Указанные оценки можно уточнить путём добавления к измеренному значению b и вычитания из измеренного значения a удвоенного показателя обратного рассеяния b_b [13].

Выполнение такой операции с учётом корреляционных связей между соответствующими первичными гидрооптическими характеристиками приводит к следующим выражениям для уточнённых значений показателей поглощения и рассеяния a_0 и b_0 :

$$a_0 = a - 2b_b = 0,61a + 0,019 \text{ м}^{-1}, \tag{27}$$

$$b_0 = b + 2b_b = 1,04b + 0,002 \text{ м}^{-1}. \tag{28}$$

С помощью регрессий [12]

$$b = 0,908c - 0,048 \text{ м}^{-1}, \quad d_p = \frac{0,035c - 0,001}{c - 0,051}, \tag{29}$$

$$b_b = 0,018c, \quad a = c - b = 0,092c + 0,048 \text{ м}^{-1} \tag{30}$$

и соотношений (27) и (28) задача определения полного набора первичных гидрооптических характеристик сводится к нахождению одной оптической характеристики воды — показателя ослабления c . Для его оценки можно использовать один измеренный параметр круга Снеллиуса, например дисперсию функции $-dL(\vartheta_0, h)/d\vartheta_0$ или параметр

$$K(h) = \frac{L(\vartheta_1, h) - L(\vartheta_2, h)}{L(\vartheta_1, h) + L(\vartheta_2, h)}, \tag{31}$$

характеризующий контраст вариаций видимой яркости круга в заданном интервале углов $\vartheta_1 < \vartheta_0 < \vartheta_2$. Результаты расчёта этого параметра по формулам (11)–(13), (29) и (31) для случая $\vartheta_1 = 42,5^\circ$ и $\vartheta_2 = 52,5^\circ$ показаны на рис. 5.

Как видно из рис. 5, при $\tau < 1$ параметр K можно считать однозначной функцией оптической глубины, а при $\tau > 1$ его следует рассматривать как функцию двух переменных — глубины h и показателя ослабления c . Обращает на себя внимание немонотонный характер зависимости K от параметра τ , обусловленный влиянием поглощения на структуру изображения круга Снеллиуса.

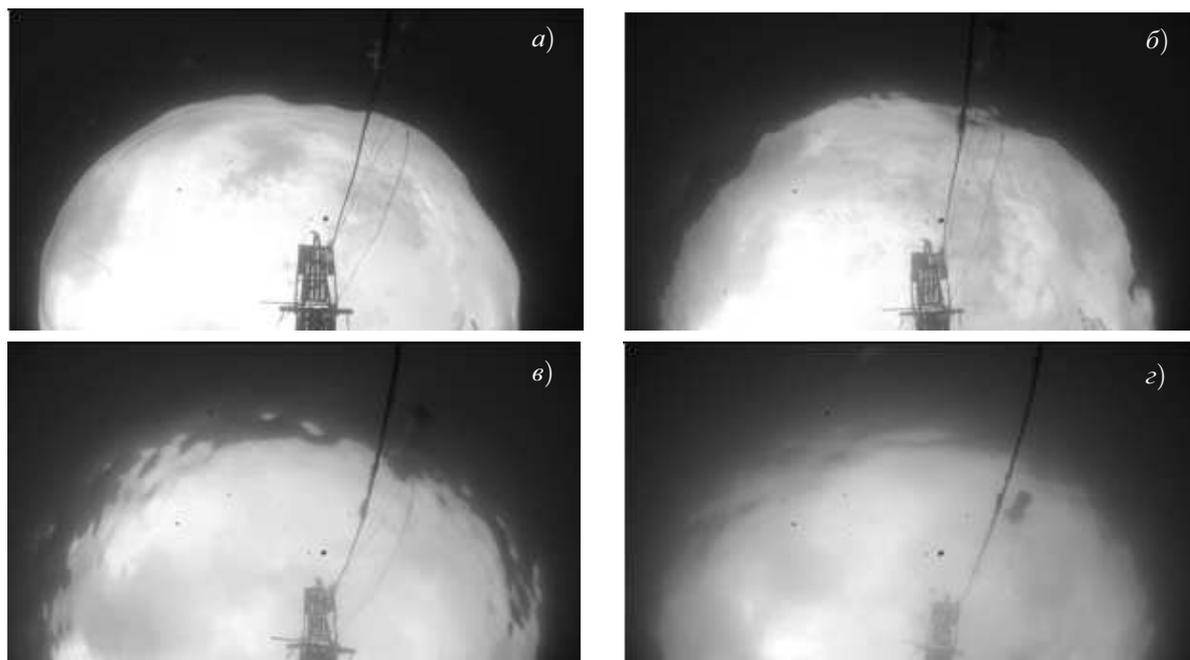


Рис. 6. Изображение круга Снеллиуса с глубины h , равной 1 м (а), 2 м (б), 3 м (в) и 6 м (г)

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГА СНЕЛЛИУСА И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Регистрация изображений круга Снеллиуса проводилась с океанографической платформы МГИ РАН в мае 2016 года. Бокс с оптическим приёмником (фотоаппарат «Nikon D5100») закреплялся на площадке с регулируемым наклоном, которая опускалась в воду с платформы на специальном подвесе. Питание и управление работой фотоаппарата осуществлялось с помощью кабелей, идущих от бокса на поверхность к нутбуку.

Длительность видеосъёмки при фиксированной глубине погружения бокса составляла 5 мин, переход на следующую глубину занимал около 3 мин, а общая продолжительность одного сеанса работы не превышала 40 мин для того, чтобы условия эксперимента (положение Солнца, облачность, ветер, первичные гидрооптические характеристики) за время сеанса существенно не менялись. Одновременно измерялись вертикальные профили показателя ослабления света с помощью многоканального прозрачномера МГИ РАН. Сеансы повторялись несколько раз в день. Для проверки теории были использованы результаты эксперимента, выполненного в условиях очень слабого волнения, когда искажения изображения круга Снеллиуса поверхностными волнами были малы и размытие границы круга происходило в основном из-за рассеяния света в воде. Во время проведения эксперимента среднее значение показателя ослабления в диапазоне глубин $0 \div 6$ м составляло $0,72 \text{ м}^{-1}$ на длине волны 520 нм; $0,85 \text{ м}^{-1}$ (460 нм) и $0,83 \text{ м}^{-1}$ (590 нм). При этом максимальное отклонение от среднего в вертикальных профилях показателя ослабления не превышало 30 %. Примеры «мгновенных» изображений круга Снеллиуса, зарегистрированных с четырёх различных глубин, показаны на рис. 6.

В период съёмки на небосводе преобладала разрывная облачность перистого и слоистого типа, через которую иногда пробивалось Солнце. Оно искажало структуру круга Снеллиуса, и поэтому кадры с Солнцем исключались из массива анализируемых данных. Изображение «выстрела» платформы в обрабатываемых кадрах удалялось и заменялось на изображение участка

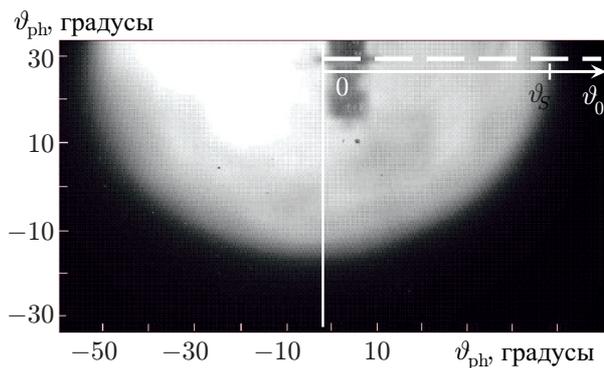


Рис. 7. Накопленное изображение круга Снеллиуса с глубины $h = 1$ м. Пунктиром показано радиальное сечение изображения, ϑ_{ph} — угловой размер фотографии

ны погружения оптического приёмника h . Эксперимент проводился в воде с показателем поглощения $a \approx 0,09 \text{ м}^{-1}$, и поэтому при увеличении глубины h с 1 до 6 м видимая яркость неба в зените должна была уменьшаться не менее, чем в 1,5 раза. Между тем, согласно рис. 8, различие между значениями измеренной яркости на горизонтах 1 и 6 м не превышало 10 %. Причиной недостоверности этих данных могло быть неконтролируемое изменение условий освещения за время сеанса измерений или изменение чувствительности фотоприёмника в зависимости от средней яркости кадра.

Указанные недостатки экспериментальных данных не препятствуют их использованию для проверки модели изображения круга Снеллиуса и алгоритмов оценки оптических свойств воды по данному изображению с привлечением эмпирических корреляционных связей между раз-

небосвода со слабо неоднородной яркостью. Статистически среднее изображение круга Снеллиуса формировалось путём накопления 800 его случайных реализаций, образующих видеозапись с длительностью порядка 30 с. Пример такого изображения приведён на рис. 7.

Радиальные распределения яркости в накопленных изображениях круга Снеллиуса для четырёх глубин представлены на рис. 8. Из него видно, что на эти распределения заметно влияет неоднородность облачного покрова, особенно при значениях полярного угла $\vartheta_0 < 40^\circ$. Нетрудно также видеть, что эти распределения не могут быть использованы для проверки зависимости видимой яркости круга Снеллиуса от глубины

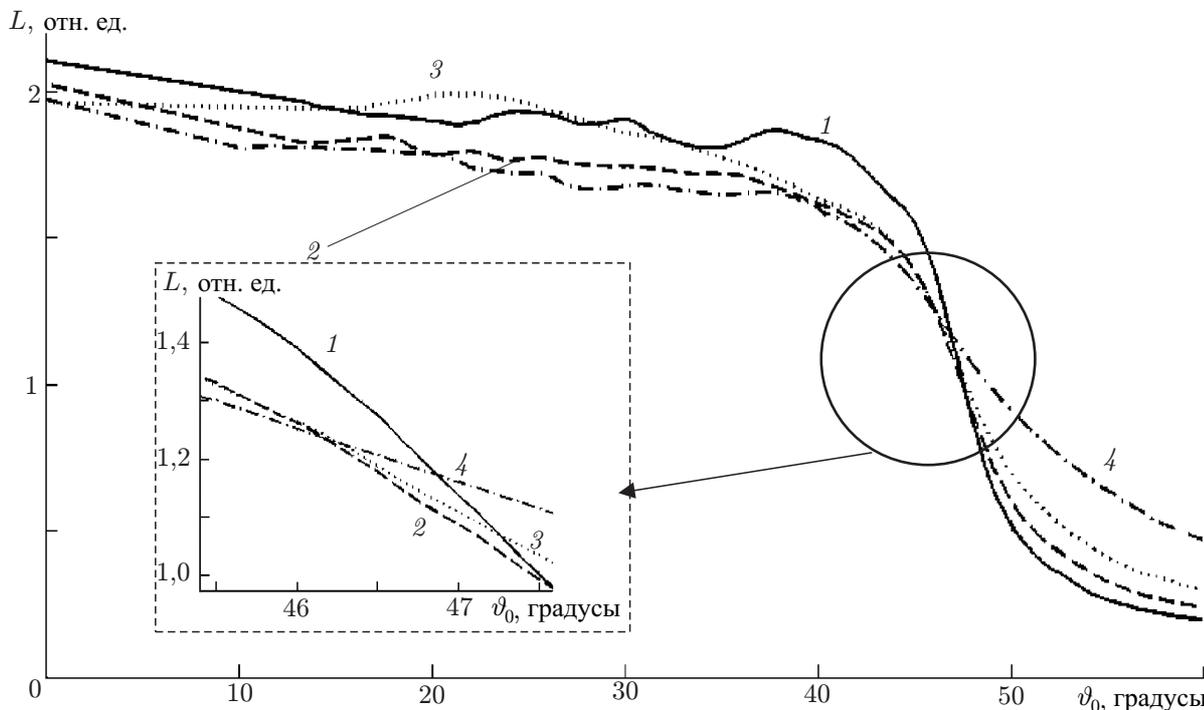


Рис. 8. Распределения яркости в радиальном сечении изображения круга Снеллиуса для различных глубин: кривая 1 соответствует $h = 1$ м, 2 — $h = 2$ м, 3 — $h = 3$ м и 4 — $h = 6$ м

личными первичными гидрооптическими характеристиками. Кривые, представленные на рис. 9, демонстрируют возможность удовлетворительной подгонки теории под эксперимент путём представления параметров a , b и d_p через показатель ослабления c в виде (29) и (30) и варьирования показателя ослабления. Теоретические кривые на рис. 9 отвечают $c = 0,8 \text{ м}^{-1}$, которое близко к показаниям прозрачного слоя. При построении рис. 9 экспериментальные кривые смещались по вертикали с таким расчётом, чтобы на границе круга Снеллиуса экспериментальные значения яркости совпадали с теоретическими.

Регрессии (29) и (30) были использованы также для проверки возможности определения первичных гидрооптических характеристик по дисперсии продифференцированного углового распределения яркости круга Снеллиуса. Результаты дифференцирования измеренных распределений приведены на рис. 10. Ввиду отсутствия экспериментальных данных о значениях яркости при $\vartheta_0 > 60^\circ$ дисперсия d диаграммы — $dL(\vartheta_0, h)/d\vartheta_0$ определялась по её моментам в интервале углов $30^\circ < \vartheta_0 < 60^\circ$, т. е. нижним и верхним пределами интегрирования в формулах (21) и (23) служили углы $\pi/6$ и $\pi/3$. На рис. 11 представлена теоретическая зависимость параметра d от глубины в водах с различным показателем ослабления, а также экспериментальные значения d , соответствующие кривым на рис. 10.

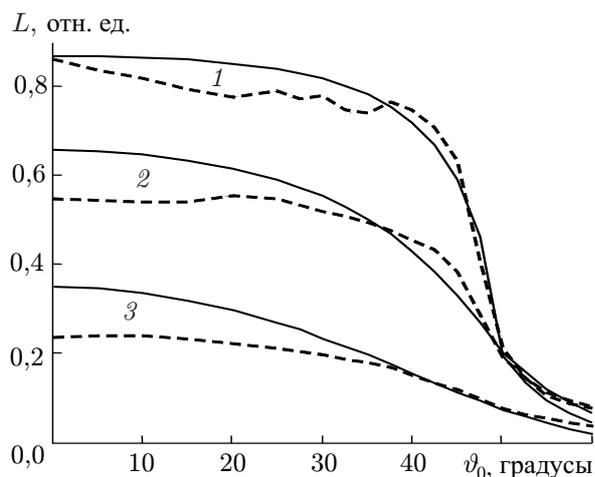


Рис. 9. Сопоставление измеренных угловых распределений видимой яркости небосвода (штриховые линии) с теоретическими распределениями, построенными для воды с показателем ослабления $c = 0,8 \text{ м}^{-1}$ (сплошные линии). Кривые 1 соответствуют $h = 1 \text{ м}$, 2 — $h = 3 \text{ м}$, 3 — $h = 9 \text{ м}$

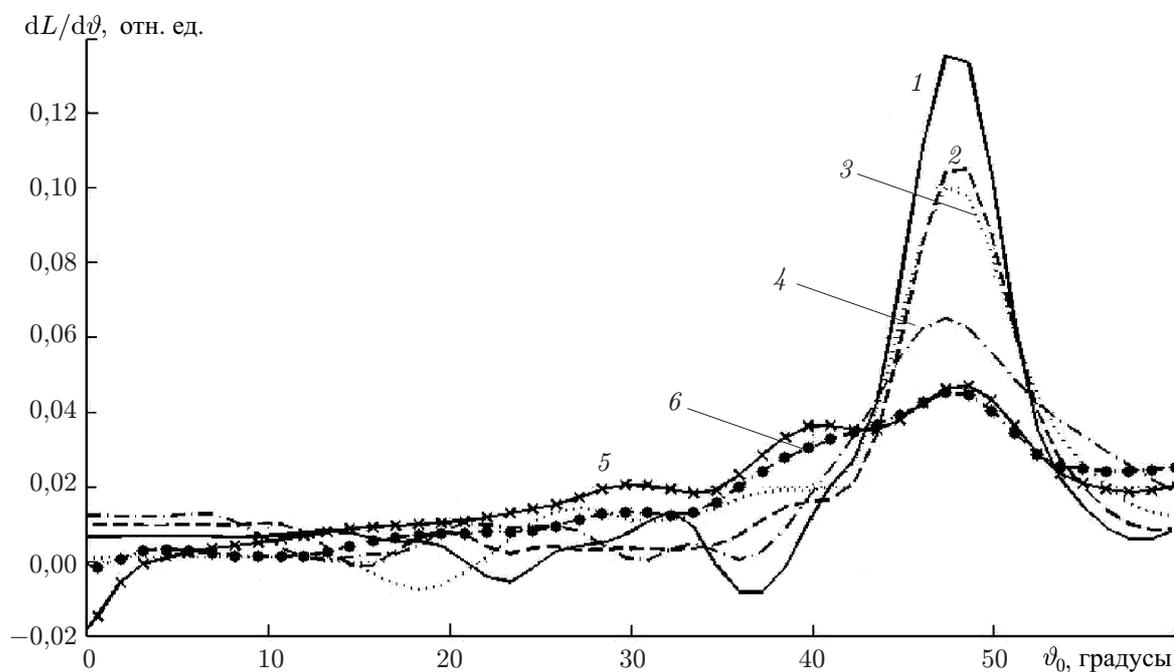


Рис. 10. Результат дифференцирования распределений яркости в радиальном сечении изображения круга Снеллиуса для различных глубин: кривая 1 соответствует $h = 1 \text{ м}$, 2 — 2 м ; 3 — 3 м ; 4 — 6 м ; 5 — 9 м и 6 — 12 м

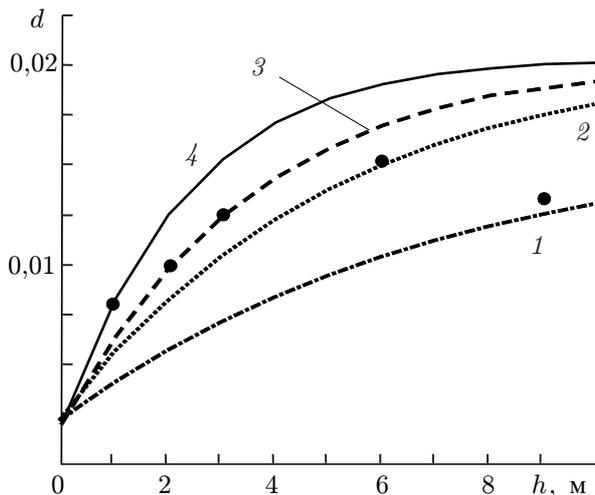


Рис. 11. Теоретическая зависимость параметра d от глубины в водах с различным показателем ослабления и экспериментальные значения d (точки), соответствующие кривым, представленным на на рис. 10. Кривая 1 отвечает $c = 0,25 \text{ м}^{-1}$, 2 — $0,35 \text{ м}^{-1}$, 3 — $0,5 \text{ м}^{-1}$, 4 — $0,75 \text{ м}^{-1}$

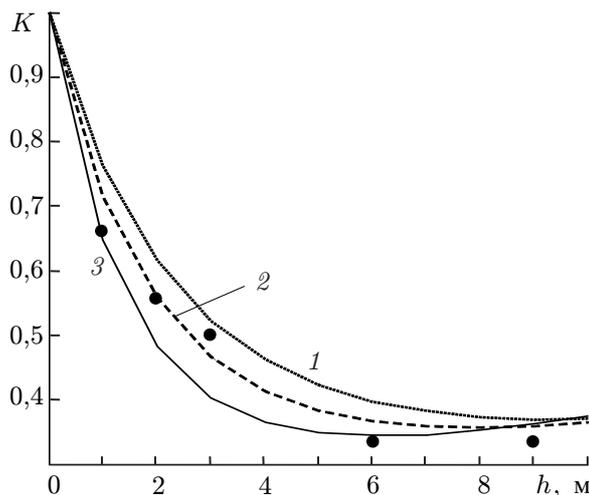


Рис. 12. Результаты расчёта и измерения параметра K , характеризующего контраст вариаций видимой яркости круга Снеллиуса в интервале углов $42,50^\circ < \vartheta_0 < 52,50^\circ$. Теоретическая кривая 1 соответствует показателю ослабления $c = 0,6 \text{ м}^{-1}$, 2 — $0,75 \text{ м}^{-1}$, 3 — 1 м^{-1} . Точками показаны экспериментальные значения K , полученные путём обработки изображений круга Снеллиуса, зарегистрированных на глубинах 1; 2; 3; 6 и 9 м

Как видно из рис. 11, наиболее правдоподобную оценку показателя ослабления ($c = 0,75 \text{ м}^{-1}$) дала обработка изображения, зарегистрированного на глубине 1 м, а обработка данных с глубин 6 и 9 м приводит к явно заниженным значениям c .

Возможности оценки показателя ослабления по экспериментальным значениям параметра K проиллюстрированы на рис. 12. Этот параметр определялся по формуле (31) с использованием результатов расчёта и измерения яркости круга Снеллиуса под углами $\vartheta_0 = 42,50^\circ$ и $52,50^\circ$. При этом, как и ранее, величины a , b и d_p выражались через показатель ослабления c помощью регрессий (29) и (30). Из рис. 12 видно, что при использовании параметра K в качестве источника информации об оптических свойствах воды обработка изображений круга Снеллиуса, зарегистрированных на различных глубинах (от 1 до 9 м), приводит к близким оценкам показателя ослабления, поскольку эксперимент достаточно хорошо подтвердил характер теоретической зависимости $K(h)$. Сопоставление результатов оценки показателя ослабления по параметрам d и K указывает на то, что параметр K более устойчив к погрешностям измерения видимой яркости круга Снеллиуса и влиянию некоторых факторов (таких, как неоднородность яркости неба), приводящих к неполному соответствию модели изображения конкретным условиям эксперимента.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена теоретическая модель изображения круга Снеллиуса, анализ которой позволил выявить возможности получения достаточно полной информации о первичных гидрооптических характеристиках путём соответствующей обработки изображений круга Снеллиуса, зарегистрированных подводным фотоприёмником. Среди результатов проведённого анализа следует особо отметить обнаружение эффекта аномально слабой зависимости видимой яркости границы круга Снеллиуса от мутности воды. Благодаря этому эффекту появляется возможность

определения показателей поглощения и рассеяния воды по результатам измерения яркости света под углом к вертикали $48,75^\circ$ и и какого-либо параметра, характеризующего размытие границы круга Снеллиуса из-за рассеяния света в воде. Экспериментально указанный эффект пока не исследован. Однако экспериментальные данные о «размытии» изображения границы круга Снеллиуса из-за рассеяния света в воде достаточно хорошо согласуются с теорией и подтверждают возможность определения первичных гидрооптических характеристик по изображениям круга Снеллиуса.

Авторы выражают благодарность И. А. Капустину (ИПФ РАН) за помощь в выполнении экспериментов и А. А. Латушкину (МГИ РАН) за предоставление экспедиционных данных. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-45-02610 и 16-05-01092).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koschmieder H. // Beitr. zur Phys. der freien Atmosph. 1926. Bd. 12, Hf. 3. S. 171.
2. Duntley S. Q. // J. Opt. Soc. Amer. 1963. V. 53, No. 2. P. 214.
3. Preisendorfer R. W. Hydrologic optics. Honolulu, Hawaii: Environm. Res. Lab., 1976. 1750 p.
4. Левин И. М. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16, №9. С. 936.
5. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, №1. С. 36.
6. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, №5. С. 617.
7. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, №5. С. 615.
8. Мольков А. А., Долин Л. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, №8. С. 651.
9. Case K. M., Zweifel P. F. Linear transport theory. London: Addison-Wesley, 1967. 384 p.
10. Долин Л. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7, №2. С. 380.
11. Долин Л. С., Левин И. М. Справочник по теории подводного видения. М.: Гидрометеиздат, 1991. 230 с.
12. Левин И. М., Копелевич О. В. // Океанология. 2007. Т. 47, №3. С. 374.
13. Долин Л. С., Савельев В. А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, №6. С. 794.

Поступила в редакцию 12 сентября 2016 г.; принята в печать 13 октября 2016 г.

A POSSIBILITY OF DETERMINING THE OPTICAL PROPERTIES OF WATER FROM THE SNELL-WINDOW IMAGE

L. S. Dolin and A. A. Molkov

We develop an analytical model of Snell's window, which allows for the effects of absorption and multiple scattering of light in water. The effect of an abnormally weak dependence of the visual brightness of the Snell-window boundary on the water turbidity, which along with the effect of the Snell-window boundary "blurring" because of the light scattering in water can be used to determine the absorption and scattering indices of water using the corresponding processing of the Snell window images, is discovered. We propose and experimentally check the algorithms for determining the inherent hydrooptical characteristics from the Snell-window images using the empirical correlation relationships among various properties.