

ПОГРУЖАЕМЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА МОРСКОЙ ВОДОЙ

© 2011 г. И. М. Левин, доктор физ.-мат. наук; М. А. Родионов; О. Н. Французов

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербург

E-mail: ocopt@yandex.ru

Описан новый погружаемый прибор для измерения показателя ослабления света морской водой и алгоритм его калибровки с помощью специально разработанного калибровочного устройства. Приведены результаты измерения глубинных распределений показателя ослабления, температуры и солености в Баренцевом и Черном морях и связь измеряемого показателя ослабления с прозрачностью воды по диску Секки.

Ключевые слова: показатель ослабления, прозрачномер, диск Секки.

Коды OCIS: 120.0120, 010.4450

Поступила в редакцию 01.11.2010

Введение

Показатель ослабления света водой c измерить проще, чем любую из других первичных гидрооптических характеристик (показателей поглощения, рассеяния, обратного рассеяния, индикатрисы рассеяния). В то же время это основная характеристика воды, наиболее часто используемая в различных задачах гидрооптики. Тем не менее, приборов для измерения показателя ослабления (прозрачномеров) относительно мало, они сложны и дороги, точность их не всегда достаточна, а стандартного измерителя показателя ослабления света водой не существует.

Нашей задачей было создание простого, дешевого и достаточно точного погружаемого прозрачномера, предназначенного для применения в задачах видения и активного дистанционного зондирования в прибрежных акваториях, где прозрачность воды по диску Секки не превышает 20 м. Его простота определяется, прежде всего, тем, что показатель ослабления измеряется в узком интервале длин волн (530–550 нм). В этой области спектра работают почти все системы подводного видения и локации, поэтому прибор может быть непосредственно использован для испытания таких систем. Кроме того, если известна величина c (550 нм), показатели рассеяния (b), поглощения ($a = c - b$) и обратного рассеяния (b_b) в этой области спектра, знание

которых также необходимо для решения задач подводного видения, могут быть определены из простых корреляционных зависимостей [1]

$$b = 0,944c - 0,048, \quad b_b = 0,018c. \quad (1)$$

Более того, значения этих показателей в других точках спектра могут быть найдены по их значениям в области 550 нм на основе имеющихся эмпирических малопараметрических моделей [2, 3]

$$c(\lambda) = (1,563 - 0,00115\lambda)c(490), \quad (2)$$

$$b(\lambda) = (1,6625 - 0,0013\lambda)b(550). \quad (3)$$

Измерители показателя ослабления чаще всего строятся по принципу сравнения двух электрических сигналов – опорного I_0 , пропорционального световому потоку P_0 , упавшему на слой воды толщиной l , и рабочего I , пропорционального потоку P , прошедшему этот слой воды без поглощения и рассеяния (интегральный закон Бугера)

$$I/I_0 = P/P_0 = \exp(-cl), \quad (4)$$

откуда следует

$$c = -l^{-1} \ln(I/I_0). \quad (5)$$

Двухканальные прозрачномеры, в которых рабочий и опорный каналы разделены в пространстве или формируются изменением толщины слоя l за счет перемещения элементов

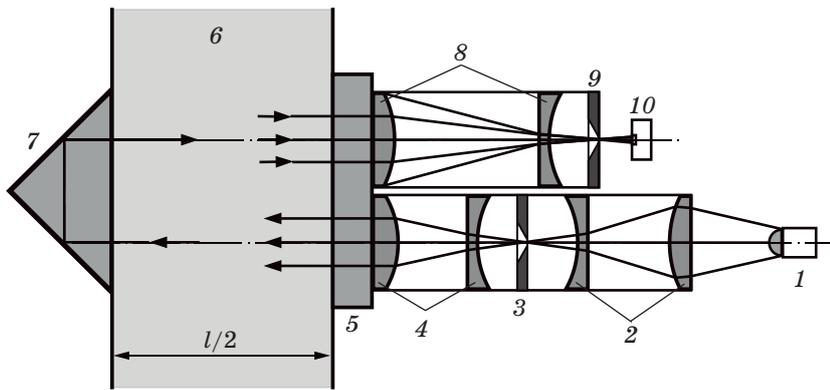


Рис. 1. Оптическая схема прибора. 1 – источник света, 2 – конденсор, 3 – диафрагма, 4 – двухлинзовый объектив, 5 – защитное стекло, 6 – испытуемая вода, 7 – призма, 8 – приемный объектив, 9 – диафрагма, 10 – фотоприемник.

прибора, приводят к усложнению конструкции и, соответственно, к появлению дополнительных погрешностей измерения s . Поэтому мы остановились на одноканальной схеме прибора, состоящего из одного рабочего канала. Опорный сигнал получают в результате специальной калибровки прибора. Такая калибровка является нетривиальной задачей и будет рассмотрена в разделе 4.

Оптическая схема и технические характеристики прибора

Оптическая схема прибора показана на рис. 1. Световой поток от источника света после прохождения конденсора, диафрагмы, двухлинзового объектива через защитное стекло выходит в воду в виде параллельного пучка. Пучок преломляется в призме и попадает на приемный объектив, который фокусирует его в плоскость точечной диафрагмы, непосредственно за которой располагается фотоприемник. Расстояние между защитным стеклом и призмой $l/2 = 250$ мм, общая оптическая база прибора $l = 500$ мм. Угловой размер диафрагмы $d/f = 20'$ (d – диаметр диафрагмы, f – фокусное расстояние приемного объектива). В этом случае в диафрагму попадает в основном только прямой (прошедший слой воды без рассеяния) свет и выполняется соотношение (4).

Источником света служит светодиод СДК-Л522-70-3/2 с шириной диаграммы направленности (по уровню 0,5) 3° , приемником – фотодиод ОРТ1-01. Сигнал сравнения, выра-



Рис. 2. Внешний вид прибора.

батываемый идентичным фотодетектором, помещенным рядом с фотодиодом, используется для исключения влияния флуктуаций температуры и нестабильности источника света.

Прибор состоит из герметичного корпуса, соединенного кабелем с блоком регистрации (портативным компьютером, оснащенный картой аналогового ввода). Технические характеристики прибора: пределы измерения s от 0,3 до 6,0 м⁻¹; абсолютная погрешность измерения $\Delta s = 0,03$ м⁻¹; предельная глубина погружения 100 м; размеры погружаемого модуля: длина 550 мм, наружный диаметр 89 мм, масса 6,5 кг; длина герметичного кабеля 150 м, масса 32 кг; электропитание +5 В, потребляемая мощность 3 Вт. Внешний вид прибора показан на рис. 2.

Методика и специальное оборудование для выполнения калибровки прибора

При одноканальном построении прибора главная проблема состоит в получении опорного сигнала I_0 . Для этого прибор необходимо поместить в эталонную среду с известным показателем ослабления. В принципе эталонной средой может быть и воздух. В этом случае

$$c = -l^{-1} \ln \frac{I(1-R_1)^4}{I_0(1-R_2)^4}, \quad (6)$$

где I_0 – отсчет прибора в воздухе, R_1 и R_2 – коэффициенты френелевского отражения на границе воздух–стекло и вода–стекло соответственно (четвертая степень соответствует отражению света от защитного стекла и призмы на пути от источника к призме и от призмы к приемнику). Несмотря на кажущуюся простоту, метод градуировки по опорному сигналу в воздухе, как правило, не применяется. Главная причина этого состоит в том, что из-за даже небольшой непараллельности защитных стекол световое пятно на приемной диафрагме при помещении прибора в воздух и в воде смещается, что может приводить к большим погрешностям. Поэтому более предпочтительным способом получения опорного сигнала является помещение прибора в воду с известным показателем ослабления c_0 . В этом случае из соотношения (4) следует

$$c = c_0 - l^{-1} \ln(I/I_0). \quad (7)$$

Этот метод – наиболее простой и точный, но при условии точного знания c_0 . А это – не простая проблема. Точно известен показатель ослабления оптически чистой воды: в области 550 нм он равен $0,058 \text{ м}^{-1}$ [4, 5]. В наших условиях получить идеально чистую воду невозможно – это требует сложной и дорогой установки. Дистиллированная вода двойной очистки имеет существенно больший показатель ослабления (до $c_0 \approx 0,3 - 0,4 \text{ м}^{-1}$). Проблема состоит в том, чтобы точно измерить эту величину, которая к тому же меняется со временем.

Учитывая сказанное, мы выбрали другой способ формирования и измерения опорного сигнала. Был изготовлен калибровочный эталон – цилиндр из оптического стекла К-8 длиной 248 мм. Он устанавливается на специальной оправке между защитным стеклом и призмой так, что между защитным стеклом и цилиндром и между цилиндром и призмой остается зазор около 1 мм. Пропускание цилиндра было измерено с высокой точностью: $T_{\text{ц}} = 0,9046$. Прибор с укрепленным цилиндром помещается в дистиллированную воду так, что вода заполняет промежутки между цилиндром и защитным стеклом, цилиндром и призмой, и измеряется опорный сигнал I_0 . Опорный и рабочий (измеряемый в исследуемой воде без цилиндра) сигналы могут быть выражены в виде

$$I_0 = A(1-R_2)^8 T_{\text{ц}}^2, \quad I = A(1-R_2)^4 \exp(-cl), \quad (8)$$

где A – постоянный коэффициент, откуда

$$c = -l^{-1} \ln \left(\frac{I}{I_0} T_{\text{ц}}^2 (1-R_2)^4 \right) = -l^{-1} \ln \left(0,8054 \frac{I}{I_0} \right). \quad (9)$$

Преимущество данного способа получения опорного сигнала состоит в том, что в нем использован известный метод иммерсии (помещение воды между стеклами), позволяющий существенно уменьшить изменение хода лучей в оптическом приборе, связанное с дисперсией света на защитных стеклах. В результате световое пятно в плоскости диафрагмы при наблюдении с цилиндром и без него практически не смещается, что и обеспечивает минимизацию погрешности, обусловленную преломлением света. Измерение величины I_0 (с цилиндром) периодически повторяется для проверки стабильности показаний прибора.

Точность прибора определялась многократным измерением сигналов I и I_0 (при этом калибровочный цилиндр каждый раз устанавливался заново и поворачивался на 180°) в водах различной мутности, которая менялась за счет изменения в среде как поглощения (добавлением нигрозина), так и рассеяния (добавлением молока). Суммарная абсолютная ошибка в измерении показателя ослабления вычислялась как среднеквадратичное отклонение от среднего с добавлением систематической ошибки, определяемой неточным знанием показателя преломления воды $n_{\text{в}}$, и, следовательно, коэффициента отражения $R_2 = (n - 1)^2 / (n + 1)^2$, где $n = n_{\text{ст}} / n_{\text{в}}$, $n_{\text{ст}}$ – показатель преломления стекла К8 (предполагалось, что $n_{\text{в}}$ лежит в пределах $1,33-1,34$). Оказалось, что реальная максимальная ошибка измерений составляет $\Delta c = 0,03 \text{ м}^{-1}$.

Примеры использования измерителя показателя ослабления света морской водой

На рис. 3 показаны результаты измерения показателя ослабления, температуры и плотности воды в водах Баренцева и Черного морей. Температура, электропроводность и давление измерялись гидрологическим зондом ОЛД-1 и пересчитывались в плотность стандартным методом. Из рисунка, в частности, видно, что

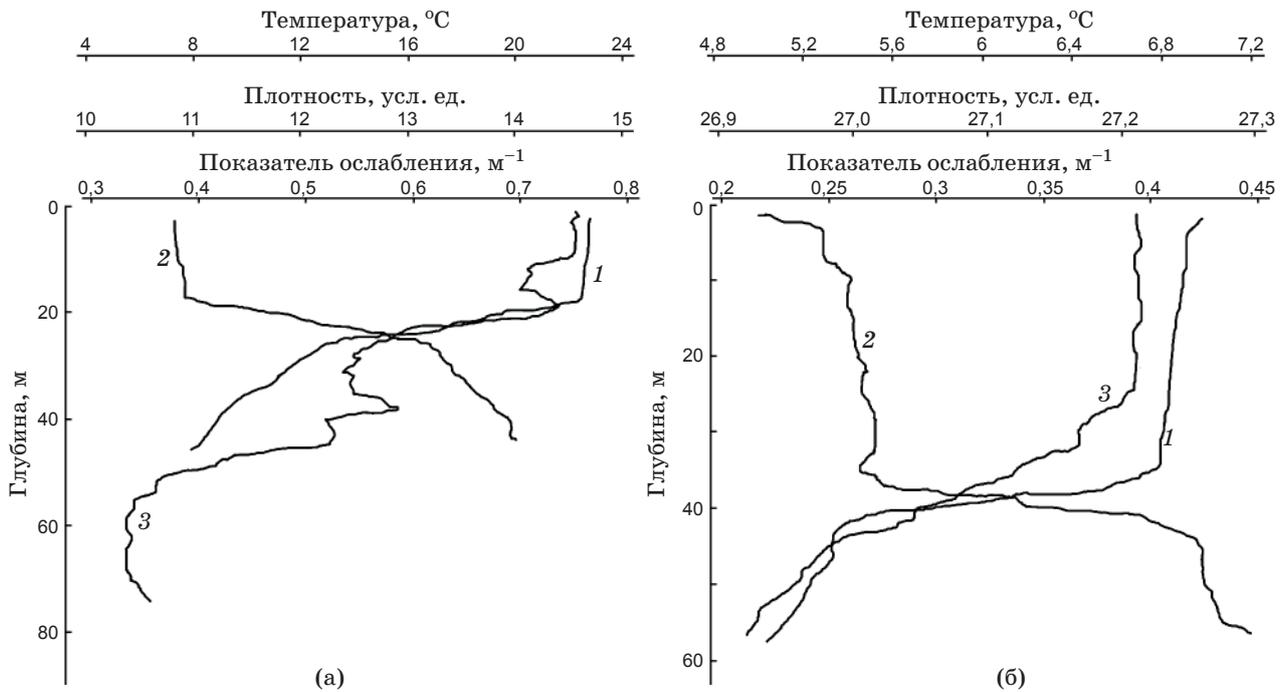


Рис. 3. Глубинные распределения температуры (1), плотности (2) и показателя ослабления (3) в Черном (а) и Баренцевом (б) морях.

между показателем ослабления, температурой и плотностью воды наблюдается достаточно сильная корреляция в области пикноклина.

Другим примером применения созданного измерителя показателя ослабления является его использование для проверки теории диска Секки.

Поскольку приборов, измеряющих c , крайне мало, а чаще суда не имеют вообще никаких гидрооптических приборов, и единственным средством измерения прозрачности воды является диск Секки, важно иметь возможность определять c по данным о прозрачности, используя диск Секки (z_d).

По последней версии теории диска Секки [6]

$$cz_d = -\frac{1}{1 + F_1 D_d} \ln \frac{1}{A_1} \times \left(9,5 \cdot 10^{-4} y + 6,875 \cdot 10^{-3} A_2 \frac{F_2}{F_1} \right), \quad (10)$$

$$F_1 = 0,074 + 0,048/c, \quad F_2 = 0,018, \quad (11)$$

$$D_d = 1,04 \left[(1 - y) \mu_0^{-1} + 1,2y \right] \quad (12)$$

при открытом и $D_d = 1,16$ при закрытом солнце, $\mu_0 = \cos(\arcsin(\theta_0/n_B))$, $n_B = 1,34$ – показатель

преломления воды, θ_0 – зенитный угол Солнца, y – доля рассеянного света неба в освещенности поверхности моря. Для чистого неба: $\lambda = 550$ нм; $\theta_0 = 20^\circ, 40^\circ$ и 60° ; $y = 0,16, 0,19$ и $0,21$ соответственно [6]. Коэффициенты A_1 и A_2 зависят от положения наблюдателя относительно Солнца. При наблюдении с солнечного борта $A_1 = 1$ и $A_2 = 1$; с теневого (если судно дает достаточно длинную тень, но диск остается на солнце), $A_1 = 1, A_2 = y$; если и диск и поверхность моря в тени или солнце закрыто облаками, $A_1 = y$ и $A_2 = y$. В общем случае наблюдения с теневого борта при произвольной длине тени $1 > A_2 > y$.

Соотношения (10)–(12) позволяют, зная высоту Солнца и положение наблюдателя относительно Солнца, найти показатель c (550 нм) из измеренной величины z_d , а используя (1) и (2), – и другие характеристики воды, нужные для расчета видимости.

Мы измерили соотношение между величинами cz_d и c в прибрежных водах Черного моря (рис. 4). Измерения показали, что в интервале $c = 0,45 - 1,3$ м⁻¹ и $z_d = 5 - 12$ м среднее значение $cz_d = 5,88$ со среднеквадратической ошибкой 0,33. Теоретические значения cz_d , рассчитанные по уравнениям (10)–(12) в ходе эксперимента

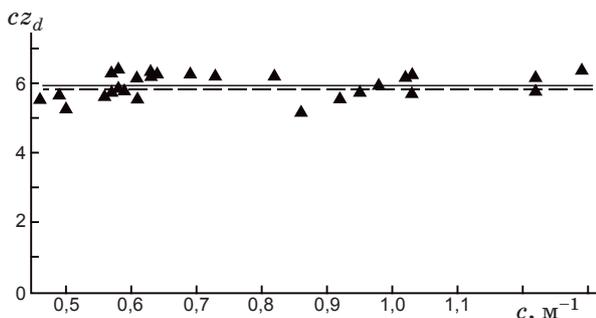


Рис. 4. Экспериментальная взаимосвязь оптической глубины диска Секки cz_d с коэффициентом ослабления c . Точками обозначены измеренные значения для данного района Черного моря. Горизонтальными линиями обозначены верхний и нижний уровень теоретических значений cz_d с учетом зенитного угла в ходе эксперимента.

с учетом зенитного угла, варьируются от 5,75 до 5,85. Таким образом, для значений c и z_d , полученных в ходе измерений в отдельно взятом районе Черного моря, погрешность теории

составляет около 6%. Оценка возможной погрешности в определении c по данным о прозрачности по диску Секки [6] показала, что общая относительная погрешность может достигать 10–15%.

Заключение

Таким образом, новый погружаемый (до 100 м) измеритель показателя ослабления c на длине волны 550 нм может применяться в прибрежных водах ($c \geq 0,30 \text{ м}^{-1}$) с абсолютной погрешностью $\Delta c = 0,03 \text{ м}^{-1}$.

Результаты измерений могут быть использованы при испытаниях систем подводного наблюдения, работающих при естественном и искусственном освещении и в совместных измерениях гидрооптических и гидрофизических параметров, важных в задачах изучения гидрофизических процессов, происходящих в толще воды (внутренние волны, турбулентность и прочее) методами лидарного дистанционного зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 10-05-00311.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин И.М., Копелевич О.В. Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в области спектра около 550 нм // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 344–348.
2. Gould R.W., Arnone R.A., Martinolich P.M. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. № 12. P. 2377–2383.
3. Voss K. A spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas // *Limnology and Oceanography*. 1992. V. 37. № 3. P. 501–509.
4. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 33. P. 8710–8723.
5. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. № 2. P. 177–184.
6. Levin I.M., Radomyslskaya T.M. Secchi disk theory: a reexamination // *Current Research on Remote Sensing, laser Probing, and Imagery in Natural Waters*, edited by Levin I.M., Gilbert G.D., Haltrin V.I., Trees C. // *Proc. of SPIE*. 2007. V. 6615. 661500 (11 pages).