

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.463.5

В.И. Маньковский

Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря

Представлены результаты определений в Черном море в весенний и летний сезоны 1989 – 1995 гг. гидрооптического параметра «вероятность выживания фотона» A . Установлена тесная связь параметра A с показателем ослабления направленного света ε . Построена модель изменения параметра A в зависимости от ε . Связь $A = f(\varepsilon)$ использована для определения показателей поглощения и рассеяния света по измерениям показателя ослабления на гидрооптическом полигоне в западной части моря, выполнявшемся весной 1993 г.

Введение

При распространении оптического излучения в какой-либо среде часть его фотонов средой поглощается — они «погибают», а «выжившие» фотоны рассеиваются в разных направлениях. Вероятность выживания фотона в условиях однократного рассеяния (альbedo однократного рассеяния) определяется отношением показателя рассеяния излучения σ к сумме показателей рассеяния σ и поглощения κ :

$$A = \sigma / (\sigma + \kappa). \quad (1)$$

Величина $(\sigma + \kappa) = \varepsilon$ — показатель ослабления излучения.

Знание параметра A необходимо при построении моделей распространения оптического излучения в море. Непосредственное измерение величин σ и κ , по которым рассчитывается A , связано с использованием сложных приборов, а результаты их не всегда надежны. В то же время информацию о величинах σ и κ можно получить косвенным путем — через более простые и вполне надежные измерения в море показателя ослабления направленного света ε и подводной облученности E , по характеристикам которой можно определить показатель поглощения. Показатель рассеяния определится как $\sigma = \varepsilon - \kappa$. Такой метод определения параметра A по методике, описанной в [1], использован в данной работе.

Приборы и методика

Измерения были выполнены в западной глубоководной области моря в 41-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (апрель 1993 г.) и в 33-м рейсе НИС «Профессор Колесников» (март–апрель 1995 г.). Подводная облученность измерялась фотометром [2] на длине волны 525 нм. Измерения велись

на дискретных глубинах через каждые 5 м до глубины 20 м. Показатель ослабления света измерялся лабораторным прозрачномером [3] в пробах воды.

Показатель поглощения определялся по формуле из [1]:

$$K = 0,91 \alpha \downarrow (1 - 2,9 R), \quad (2)$$

здесь $\alpha \downarrow$ — показатель вертикального ослабления дневного света, R — коэффициент диффузного отражения света толщиной воды;

$$\alpha \downarrow = [\lg E \downarrow(Z1) - \lg E \downarrow(Z2)] / (Z2 - Z1), \quad (3)$$

$$R = E \uparrow(Zi) / E \downarrow(Zi), \quad (4)$$

где $E \downarrow(Z1)$ и $E \downarrow(Z2)$ — горизонтальная облученность сверху на глубинах $Z1$ и $Z2$; $E \uparrow(Zi)$ и $E \downarrow(Zi)$ — облученность снизу и сверху на глубине Zi . Для расчетов по формуле (2) бралась средняя величина R между горизонтами $Z1$ и $Z2$: $\langle R(Z1, Z2) \rangle = [R(Z1) + R(Z2)] / 2$.

По измерениям ε вычислялся показатель рассеяния $\sigma = \varepsilon - \kappa$. Вертикальное распределение гидрооптических характеристик в исследованном слое в наблюдениях 1993 и 1995 годов было практически однородным. Поэтому для характеристики этого слоя использованы величины A , осредненные в слое 0 – 20 м.

Обратим внимание, что значения σ , κ и ε рассчитывались и приводятся в статье при десятичном основании.

Результаты и их обсуждение

Величины A и ε изменялись в пределах: $A = 0,7 - 0,84$, $\varepsilon = 0,141 - 0,225 \text{ м}^{-1}$ в целом согласованно, а именно: с уменьшением величины ε уменьшалась и величина A .

Такая же закономерность наблюдалась и в работе [1] по данным измерений в Черном море летом 1989 г. Диапазон изменений величин в [1] был больше: $A = 0,42 - 0,90$, $\varepsilon = 0,050 - 0,380 \text{ м}^{-1}$ (длина волны 522 нм). Отметим, что величины A в [1] приведены для конкретных глубин, максимальная из которых составила 48 м.

Наши наблюдения и данные из работы [1] спектрально близки, что позволяет объединить их в единый массив. Из девяти измерений A в [1] для рассмотрения взяты семь, выполненных, как и наши наблюдения, в глубоководных районах западной части моря. Два определения A в [1] в водах северо-западного шельфа не включены в объединенный массив данных. Они будут рассмотрены особо.

На рис. 1 представлены результаты наших измерений и данные работы [1]. Регрессия между величинами A и ε описывается формулой

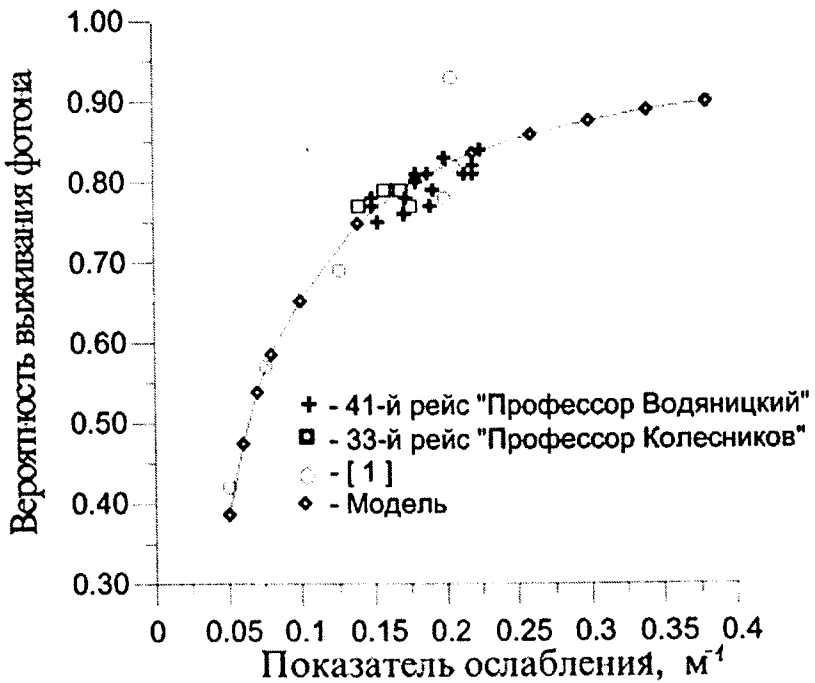
$$A = 0,98 - 0,0315/\varepsilon. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции составил $r = 0,998$, среднеквадратическая ошибка определения $\delta(A) = 0,0034$. Точка из [1], выпадающая из общей закономерности (рис. 1, $A = 0,93$, $\varepsilon = 0,205 \text{ м}^{-1}$), не включалась в эти расчеты. Возможно, там были ошибки измерений.

Рассмотрим вклад различных факторов, влияющих на связь между A и ε (мв), на основе физической модели показателя ослабления света:

$$\varepsilon(\text{мв}) = \sigma + \kappa = \sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч}) + \sigma(\text{в}) + \kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл}) + \kappa(\text{в}), \quad (6)$$

где ε (мв) — показатель ослабления света морской водой; $\sigma(\text{мч})$, $\sigma(\text{кч})$, $\sigma(\text{в})$ — показатели рассеяния света взвешенными в воде мелкими (минеральными) и крупными (органическими) частицами и чистой морской водой (молекулярное рассеяние); $\kappa(\text{ж})$, $\kappa(\text{хл})$, $\kappa(\text{в})$ — показатели поглощения желтым веществом, пигментами хлорофилла и самой водой. Строго говоря, в формулу (6) должны быть включены еще показатели поглощения минеральных частиц терригенного происхождения и органических частиц, в составе которых имеются как живые клетки фитопланктона, так и детрит, состоящий из отмерших клеток фитопланктона и фрагментов скелетов мелкого зоопланктона. Но вследствие слабого поглощения света этими частицами их влияние на ослабление света невелико, и в гидрооптических моделях эти составляющие поглощения, как правило, не учитываются [4].



Р и с. 1. Связь параметра A с показателем ослабления направленного света ε ($\lambda = 525$ нм) в поверхностных водах глубоководной области Черного моря в весенний и летний сезоны 1989 – 1995 гг.

Вероятность выживания фотона с учетом формулы (6) определяется следующим образом:

$$A = [\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч}) + \sigma(\text{в})] / [\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч}) + \sigma(\text{в}) + \kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл}) + \kappa(\text{в})]. \quad (7)$$

Для проведения расчетов по формуле (7) изменчивости параметра A в зависимости от изменения показателя ослабления света ε возьмем за отправную точку наблюдавшуюся в работе [1] величину $A = 0,9$ при $\varepsilon = 0,38 \text{ м}^{-1}$. То есть в данном случае 90% ослабления обусловлено рассеянием $\sigma = 0,38 \cdot 0,9 = 0,342 \text{ м}^{-1}$ и 10% — поглощением $\kappa = 0,38 - 0,342 = 0,038 \text{ м}^{-1}$.

Оценим вклад каждой составляющей в ослабление света при длине волны 525 нм.

Показатель рассеяния света водой равен $\sigma(\text{в}) = 0,0009 \text{ м}^{-1}$ (табл. 6.2 из [4]), и вклад $\sigma(\text{в})$ в ослабление света в данном случае составляет $\sigma(\text{в})_{\text{отн}} = (0,0009/0,38) \cdot 100 = 0,24\%$; остальные 89,76% приходятся на рассеяние взвесью.

Согласно [5], показатель поглощения морской водой $\kappa(\text{в}) = 0,0181 \text{ м}^{-1}$, то есть $\kappa(\text{в})_{\text{отн}} = (0,0181/0,38) \cdot 100 = 4,8\%$. Остальные 5,2% — поглощение желтым веществом и пигментами хлорофилла, но в какой пропорции — не известно. Это можно оценить лишь примерно. Согласно табл. 6.5 из работы [4], $\kappa_{\text{уд}}(\text{хл}) = 0,0046 \text{ м}^2/\text{мг}$. По данным [6], среднее содержание хлорофилла летом 1989 г. в поверхностных водах глубоководной области западной части моря составило $0,8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Согласно [1], в этом районе моря $A = 0,9$, $\varepsilon = 0,38 \text{ м}^{-1}$ (глубина 7 м). Это дает величину $\kappa(\text{хл}) = 0,0046 \cdot 0,8 = 0,00368 \text{ м}^{-1}$, то есть около 1%. Тогда на долю желтого вещества приходится 4,2%. Хотя точное соотношение нам не известно, расчеты можно провести, используя изменчивость суммарного поглощения желтым веществом и пигментами.

Соотношение всех факторов, влияющих на ослабление света, приведено в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Вклад различных факторов (%) в показатель ослабления света для длины волны $\lambda = 522 \text{ нм}$

$\varepsilon, \text{ м}^{-1}$	A	Рассеяние		Поглощение	
		$\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч})$	$\sigma(\text{в})$	$\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})$	$\kappa(\text{в})$
0,38	0,90	89,76	0,24	5,2	4,8

Из всех факторов, влияющих на ослабление света, постоянными являются поглощение и рассеяние света водой, переменными — рассеяние взвесью, поглощение желтым веществом и пигментами. Для расчетов по формуле (7) величин A при разных ε необходимо задать закономерность изменения входящих в формулу переменных величин. Для этого есть два варианта: метод подбора и использование экспериментальных данных. Воспользуемся вторым методом.

По экспериментальным данным, при изменении показателя ослабления света изменение показателя поглощения происходило неравномерно в различных диапазонах изменения ε . При уменьшении ε от 0,38 до 0,1 м^{-1} показатель поглощения снизился на $0,0032 \text{ м}^{-1}$, а в диапазоне $\varepsilon = 0,1 - 0,05 \text{ м}^{-1}$ снижение составило $0,0041 \text{ м}^{-1}$. Таким образом, скорость снижения $[\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})]$ в указанных диапазонах изменения ε соответственно составляла: $d[\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})]/d\varepsilon = 0,0114$ и $d[\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})]/d\varepsilon = 0,082$.

Изменение величины $\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч})$ определим следующим образом. Продифференцируем уравнение (6) с учетом того, что $\sigma(\text{в}) = \text{const}$, $\kappa(\text{в}) = \text{const}$:

$$d[\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч})] + d[\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})] = d\varepsilon. \quad (8)$$

Подставляя в (8) соответствующие величины $d[\kappa(\text{ж}) + \kappa(\text{хл})]$ для диапазонов $\varepsilon = 0,38 - 0,1 \text{ м}^{-1}$ и $\varepsilon = 0,1 - 0,05 \text{ м}^{-1}$, определим величину $\sigma(\text{мч}) + \sigma(\text{кч})$ при разных ε и по формуле (7) рассчитаем параметр Λ . Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 1. В табл. 2 приведены также величины Λ , рассчитанные по формуле (5).

Т а б л и ц а 2

Изменение параметра Λ с изменением ε ($\lambda = 525 \text{ нм}$)

$\varepsilon, \text{ м}^{-1}$	Λ , физическая модель, формула (7)	Λ , эксперимент, формула (5)
0,380	0,900	0,897
0,340	0,890	0,887
0,300	0,876	0,875
0,260	0,859	0,859
0,220	0,836	0,837
0,180	0,802	0,805
0,140	0,748	0,755
0,100	0,652	0,665
0,080	0,585	0,586
0,070	0,538	0,530
0,060	0,474	0,455
0,050	0,386	0,350

Как видно из табл. 2 и рис. 1, физическая модель хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Два комментария по экспериментальным данным.

1. Формула (5) выражает линейную связь между показателями рассеяния и ослабления света морской водой:

$$\sigma(\text{мв}) = 0,98 \cdot \varepsilon(\text{мв}) - 0,0315. \quad (9)$$

Рассмотрим, что дает формула (9) в предельном случае, когда в воде отсутствует взвесь, то есть $\sigma(\text{мч}) = 0$, $\sigma(\text{кч}) = 0$ и показатель рассеяния морской водой будет равен показателю рассеяния чистой водой: $\sigma(\text{мв}) = \sigma(\text{в})$. Показатель ослабления света морской водой составит

$$\varepsilon(\text{мв}) = \sigma(\text{в}) + \kappa(\text{в}) + \kappa(\text{ж}_0). \quad (10)$$

Определим из формул (9) и (10) величину $\kappa(\text{ж}_0)$:

$$\kappa(\text{ж}_0) = [\sigma(\text{в}) + 0,0315]/0,98 - \sigma(\text{в}) - \kappa(\text{в}). \quad (11)$$

Подставляя в (11) соответствующие величины, получим $\kappa(\text{ж}_0) = 0,014 \text{ м}^{-1}$. Величину $\kappa(\text{ж}_0)$ можно интерпретировать в этом случае как фоновый показате

тель поглощения света желтым веществом в поверхностных водах глубоководной области моря. Другими словами, $\kappa(\lambda_0)$ является показателем некоторой постоянной концентрации желтого вещества в этих водах.

2. Согласно [1], вероятность выживания фотона в водах северо-западного шельфа при гораздо более высоких показателях ослабления была значительно ниже по сравнению с водами глубинных районов: $A = 0,77$, $\varepsilon = 0,62 \text{ м}^{-1}$ ($H = 3 \text{ м}$); $A = 0,62$, $\varepsilon = 0,17 \text{ м}^{-1}$ ($H = 18 \text{ м}$). Это объясняется как высоким содержанием желтого вещества в поступающих на шельф водах Дуная, Днепра и Днестра, так и более высокими концентрациями хлорофилла в этих водах. Станция 4125 находилась в западной части шельфа в зоне влияния речных вод [1].

Сравним полученные нами данные с результатами других работ. Впервые на такую связь обратили внимание авторы работы [7], где эксперимент проводился на длине волны 495 нм. Ввиду малого количества данных (9 точек) в [7] эмпирического соотношения между A и ε не дано, приведен только график.

В дальнейшем этот вопрос исследовался в [8], где на основе 67 измерений в Тихом и Атлантическом океанах для длины волны 550 нм получено соотношение

$$A = 0,975 - 0,0152/\varepsilon. \quad (12)$$

В [9] на основе данных из [8] сделано уточнение данной связи и для диапазона $\varepsilon = 0,035 - 0,304 \text{ м}^{-1}$ дается формула:

$$A = 0,944 - 0,0209/\varepsilon. \quad (13)$$

Ввиду значительной разницы в длинах волн, использованных при наших измерениях ($\lambda = 525 \text{ нм}$) и в работах [8, 9] ($\lambda = 550 \text{ нм}$), сопоставление величин A не будет корректным. Для корректного сравнения используем данные из [10] по Гданьскому заливу. Залив, являющийся эстуарием реки Висла, мелководный -- глубины до 40 м. Для $\lambda = 525 \text{ нм}$ в диапазоне $\varepsilon = 0,09 - 1,18 \text{ м}^{-1}$ в [10] установлена связь $\sigma = 0,66 \cdot \varepsilon - 0,0174$, из которой следует:

$$A = 0,66 - 0,0174/\varepsilon. \quad (14)$$

В табл. 3 дано сравнение величин A в Гданьском заливе, рассчитанных по формуле (14), с результатами измерений из [1] на северо-западном шельфе Черного моря при одинаковых значениях ε .

Т а б л и ц а 3

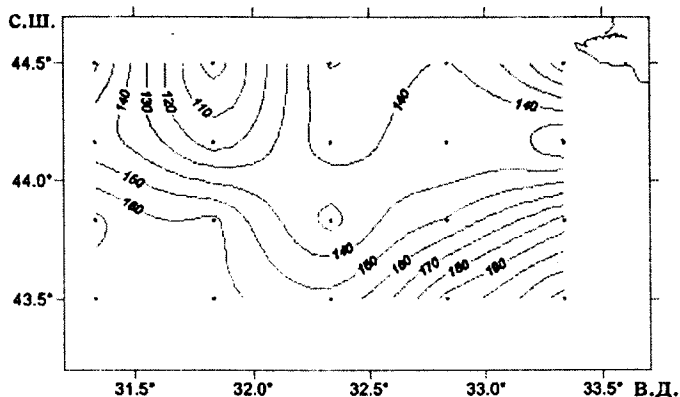
Величина параметра A при одинаковых значениях ε
на северо-западном шельфе Черного моря и в Гданьском заливе

$\varepsilon, \text{ м}^{-1}$	A , Черное море [1]	A , Гданьский залив [10]
0,17	0,62	0,56
0,62	0,77	0,63

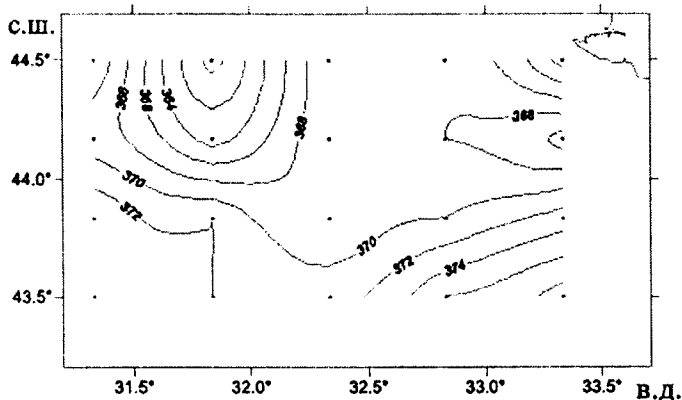
Значительно меньшие величины A в Гданьском заливе по сравнению с водами северо-западного шельфа Черного моря свидетельствуют о более высокой концентрации желтого вещества и хлорофилла в водах Гданьского залива.

Расчеты величины $\kappa(\lambda_0)$ дают в водах Гданьского залива $0,009 \text{ м}^{-1}$. Это ниже, чем для глубоководной области Черного моря, где $\kappa(\lambda_0) = 0,014 \text{ м}^{-1}$. Несоответствие, возможно, объясняется следующим. В [10] приведены возможные ошибки в уравнении регрессии коэффициента $0,0174$, составляющие $\pm 0,0087$. Если взять коэффициент равным $0,0174 + 0,0087 = 0,0261$, то получим для Гданьского залива $\kappa(\lambda_0) = 0,022 \text{ м}^{-1}$, то есть больше, чем в глубоководной области Черного моря.

Отметим, что вычисление $\kappa(\lambda_0)$ по формуле (13) из [9] дает отрицательную величину $- 0,0024 \text{ м}^{-1}$. О возможных причинах такого «парадокса» сказать затруднительно.



а



б

Р и с. 2. Распределение на полигоне в западной части Черного моря в апреле 1993 г. показателей: *а* — рассеяния $\sigma \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$; *б* — поглощения $\kappa \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$. Рассчитано по формуле (5) с использованием измерения на полигоне показателя ослабления света ϵ для длины волны 525 нм

Заключение

Найденная в экспериментах связь параметра A с величиной ε в поверхностных водах глубоководной области Черного моря позволяет по имеющимся данным о величинах ε определить отдельно величины: $\sigma = \varepsilon A$ и $\kappa = \varepsilon(1 - A)$. Зная κ , можно оценить показатель вертикального ослабления дневного света $\alpha \downarrow$ по формуле (2), используя в ней среднюю величину R . Согласно [11], летом 1989 г. $\langle R \rangle = 0,026 \pm 0,01$; по нашим данным, в 1993 и 1995 гг. $\langle R \rangle = 0,028 \pm 0,008$.

Для примера на рис. 2, а, б показано распределение на глубине 0 м показателей рассеяния и поглощения для длины волны 525 нм, рассчитанных с использованием формулы (5), по измерениям показателя ослабления весной 1993 г. в 41-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий». Картины пространственного распределения величин σ и κ подобны, но диапазоны их изменчивости на полигоне резко различаются. Показатель рассеяния изменяется значительно ($\sigma = 0,094 - 0,225 \text{ м}^{-1}$), а изменения показателя поглощения невелики ($\kappa = 0,0359 - 0,0379 \text{ м}^{-1}$). Параметр A на данном полигоне изменялся в пределах 0,724 – 0,856 единиц.

Относительно изменчивости на полигоне показателя поглощения морской воды отметим, что если из указанных на рис. 2, б его значений вычесть показатель поглощения чистой морской водой $\kappa(w) = 0,018 \text{ м}^{-1}$ и показатель поглощения фоновой концентрации желтого вещества $\kappa(j_0) = 0,014 \text{ м}^{-1}$, то диапазон изменения переменной части показателя поглощения морской водой, обусловленный поглощением света хлорофиллом и частью желтого вещества, превышающего его постоянную фоновую концентрацию, составит 0,004 – 0,006 м^{-1} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин И.М., Николаев В.П. Новый метод определения спектральных значений показателя поглощения и параметра вытянутости индикатрисы рассеяния света водой // *Океанология*. — 1992. — 32, вып. 6. — С. 1145 – 1150.
2. Вайнерман Б.А., Неуймин Г.Г. Прибор для измерения подводной облученности // *Экспериментальные методы исследования океана*. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1978. — С. 144 – 150.
3. Маньковский В.И., Кайгородов М.Н. Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // *Автоматизация научных исследований морей и океанов*. 5-я Всесоюзная школа. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. — С. 91 – 92.
4. Копелевич О.В. Факторы, определяющие оптические свойства морской воды / *Оптика океана*. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Моница. — М.: Наука, 1983. — С. 150 – 165.
5. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380 – 700 nm) of pure water. II Integrating cavity measurements // *Appl. Optics*. — 1997. — 36, № 33. — P.8710 – 8723.
6. Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И. и др. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х — начале 90-х годов. — Севастополь, 1996. — 32 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ. ИНБИОМ.).

7. Прокудина Т.М., Пелевин В.Н. Определение величины параметра выживания кванта света по характеристикам световых полей в море // Оптика океана и атмосферы / Под ред. К.С. Шифрина. — Л.: Наука, 1972. — С. 157 – 168.
8. Дорогин А.М., Копелевич О.В., Левин И.М. и др. Корреляции между некоторыми гидрооптическими характеристиками // Оптика моря и атмосферы. Тезисы докладов 10-го пленума «Оптика океана». — Л.: ГОИ, 1988. — С. 136 – 137.
9. Levin I.M., Kopelevich O.V. Relationships between the seawaters optical properties at 550 nm // II International Conference «Current problem in optics of natural waters». — St. Peterburg. — 2003. — P. 289 – 292.
10. Dera J., Gosh L., Wozniak B. Experimental study of the composite of the light-beam attenuation process in the waters of the gulf of Gdansk // Oceanologia. — Polska Akademia Nauk. — 1978. — № 10. — P. 5 – 24.
11. Николаев В.П. Новые результаты измерений вертикального ослабления подводной облученности в Черном море // Океанология. — 1996. — 36, № 3. — С. 377 – 383.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 09.07.04
После доработки 20.08.04

ABSTRACT Results of determination of hydrooptic parameter of “single scattering albedo” A in the Black Sea in spring-summer seasons, 1989-1995 are presented. Close relation of parameter A to the beam attenuation coefficient ϵ is revealed. The model of its variability depending on the beam attenuation coefficient is constructed. Relation $A - f(\epsilon)$ is used for determining the absorption and scattering coefficients based on the measurements of the beam attenuation coefficient on the hydro-optical polygon in the west part of the Black Sea in spring 1993.