

Характеристики подводной облученности в Черном море в весенний период (1993 и 1995 годы)

Приводятся данные о величинах показателя вертикального ослабления и коэффициента диффузного отражения дневного света в Черном море в весенний период 1993 и 1995 гг. Рассчитаны глубины однопроцентной квантовой облученности и параметр Λ , показывающий долю ослабления направленного света за счет рассеяния $\Lambda = \sigma / \varepsilon$. Проведено сравнение характеристик подводной облученности в море в различные сезоны в период 1989 — 1995 гг.

Введение. Гидрооптические характеристики Черного моря, начиная со второй половины 1980-х годов, существенно изменились, в результате уменьшилась прозрачность воды по сравнению с предшествующим периодом [1]. Это отразилось и на показателях вертикального ослабления дневного света, которые значительно увеличились, изменилось также и их спектральное распределение, проявившееся в смещении минимума ослабления солнечного излучения в область более длинных волн [2]. Указанные изменения оптических характеристик вод произошли вследствие изменения видового состава фитопланктона в море, обусловленного влиянием как антропогенных, так и естественных экологических факторов, приведших к массовому развитию водорослей нанопланктонной группы [1].

В связи с этим актуальна задача получения данных о характеристиках светового поля в море в условиях современного состояния его экосистемы в различные сезоны. Такие данные для лета 1989 г. и зимы 1991 г. были представлены в работе [2]. В нашей работе приводятся данные о характеристиках подводной облученности в весенний период 1993 и 1995 годов.

Аппаратура и методика. Измерения подводной облученности проводились фотометром [3] в спектральном участке 525 нм, где наблюдаются минимальные величины показателя вертикального ослабления дневного света $\alpha_{\downarrow}(\lambda)$ в современных водах Черного моря [2]. Измерения проводились до глубины 40 м на дискретных глубинах через каждые 5 м. Показатель вертикального ослабления нисходящего света определялся по формуле

$$\alpha = 1 / (Z_1 - Z_2) \log [E_1(\downarrow) / E_2(\downarrow)], \quad (1)$$

где $E_1(\downarrow)$ и $E_2(\downarrow)$ — облученность фотометра сверху на глубинах Z_1 и Z_2 .

По измерениям облученности сверху $E_z(\downarrow)$ и снизу $E_z(\uparrow)$ рассчитывался коэффициент диффузного отражения дневного света:

$$R = E_z(\uparrow) / E_z(\downarrow). \quad (2)$$

Одновременно с измерениями подводной облученности проводились измерения показателя ослабления направленного света ε на длине волны 525 нм

в пробах воды с помощью лабораторного прозрачномера [4]. Измерялись также глубина видимости белого диска Z_6 и цвет воды $N_{цв}$ в баллах по шкале цвета морских вод.

Измерения были выполнены в следующие сроки: в первой половине апреля 1993 г. (41-й рейс НИС «Профессор Водяницкий») на полигоне в северной части моря, западнее п-ова Крым (полигон охватывал глубоководную область и восточную часть северо-западного шельфа); во второй половине марта и в начале апреля 1995 г. (33-й рейс НИС «Профессор Колесников») в центральной и западной частях глубоководной области моря. Всего выполнено 27 измерений: на 23 станциях в 1993 г. и на четырех станциях в 1995 г.

Результаты. В табл. 1 приведены средние значения гидрооптических характеристик и их среднеквадратические отклонения в 1993 и 1995 гг. Все показатели в таблице и далее в тексте даются при десятичном основании.

Т а б л и ц а 1

Характеристики подводной облученности в весенний период

Район	Параметр	Глубина, м 1993 г.			Глубина, м 1995 г.		
		0–20	20–40	0	0–20	20–40	0
Шельф	$\alpha_{\downarrow}(525), \text{ м}^{-1}$	0,048	0,050	Нет свед.	Нет свед.	Нет свед.	Нет свед.
	СКО (α_{\downarrow}), м^{-1}	0,003	0,020	–"–	–"–	–"–	–"–
	$R(525)$	0,030	0,033	–"–	–"–	–"–	–"–
	СКО(R)	0,004	Нет свед.	–"–	–"–	–"–	–"–
	$\epsilon(525), \text{ м}^{-1}$	Нет свед.	–"–	0,200	–"–	–"–	–"–
	СКО(ϵ), м^{-1}	–"–	–"–	0,027	–"–	–"–	–"–
	$Z_6, \text{ м}$	–"–	–"–	11,0	–"–	–"–	–"–
	СКО(Z_6), м	–"–	–"–	1,0	–"–	–"–	–"–
	$N_{цв}, \text{ балл}$	–"–	–"–	6–7	–"–	–"–	–"–
Глубоководный	$\alpha_{\downarrow}(525), \text{ м}^{-1}$	0,043	0,046	Нет свед.	0,041	0,049	Нет свед.
	СКО (α_{\downarrow}), м^{-1}	0,008	0,006	–"–	0,004	0,003	–"–
	$R(525)$	0,029	0,022	–"–	0,028	0,020	–"–
	СКО(R)	0,008	0,006	–"–	0,003	Нет свед.	–"–
	$\epsilon(525), \text{ м}^{-1}$	Нет свед.	Нет свед.	0,178	Нет свед.	–"–	0,162
	СКО(ϵ), м^{-1}	–"–	–"–	0,024	–"–	–"–	0,013
	$Z_6, \text{ м}$	–"–	–"–	11,5	–"–	–"–	14,8
	СКО(Z_6), м	–"–	–"–	1,0	–"–	–"–	1,9
	$N_{цв}, \text{ балл}$	–"–	–"–	6–8	–"–	–"–	6–8

По результатам измерений показателей вертикального ослабления солнечного излучения были рассчитаны по формулам из работы [5] показатели вертикального ослабления квантовой облученности Q в области фотосинтетически активной радиации 350 — 700 нм:

$$Q_z / Q_0 = [0,16 + 5,46 / (6,5 + z)] E_z(525) / E_0(525), \quad (3)$$

$$E_z = E_0 \exp [-\alpha \downarrow(525) z], \quad (4)$$

где E_z и E_0 — подводная облученность на глубинах z и 0 на длине волны 525 нм. Значения глубин, на которых квантовая облученность составляла 1% от поверхностной в 1993 и 1995 годах, показаны на рис. 1.

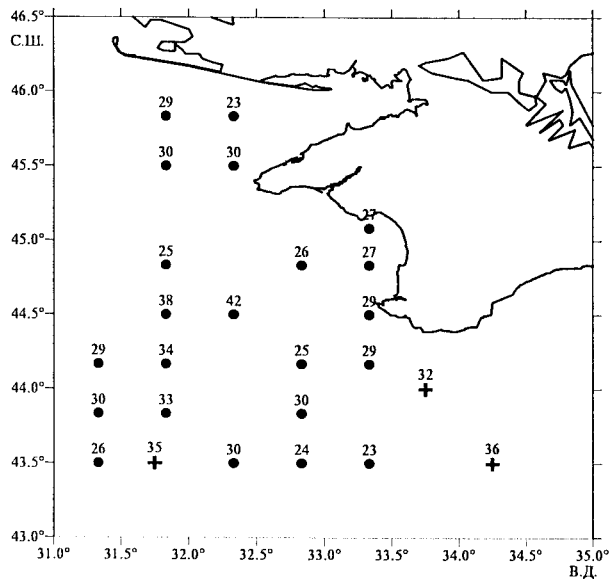


Рис. 1. Глубина однопроцентной квантовой облученности H_0 (1%), м, в весенний период в 1993 г. (кружочки) и в 1995 г. (крестики)

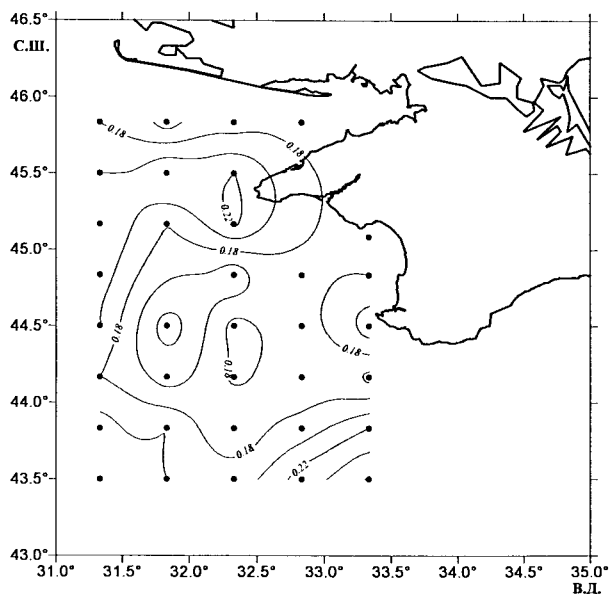


Рис. 2. Распределение на полигоне весной 1993 г. величин показателя ослабления направленного света $\epsilon(525)$, м^{-1} , при десятичном основании

На рис. 2 приведено распределение на полигоне в 1993 г. величин $\epsilon(525)$.

По данным измерений $\alpha \downarrow$, R и ϵ рассчитан параметр $\Lambda = \sigma / \epsilon$, физический смысл которого представляет собой вероятность выживания фотонов в процессе взаимодействия света со средой. Этот параметр используется во многих моделях формирования светового поля в море. Величина показателя рассеяния определялась как $\sigma = \epsilon - \kappa$, где κ — показатель поглощения света, который вычислялся по формуле из работы [6]:

$$\kappa = 0,91 \alpha \downarrow (1 - 2,9 R). \quad (5)$$

Расчеты проведены по средним величинам $\alpha \downarrow$ и R в слое $0 - 20$ м. Величина ϵ , измерявшаяся только в пробах воды с поверхности, принята постоянной в слое $0 - 20$ м, так как вертикальное распределение $\alpha \downarrow$ показывало, что этот слой был практически оптически однородным. Результаты расчетов Λ следующие: в 1993 г. на шельфе и в глубоководной области $\Lambda = 0,8$, в 1995 г. (глубоководная область) $\Lambda = 0,79$.

Обсуждение. На шельфе значения α_{\downarrow} в 1993 г. в слоях 0 — 20 и 20 — 40 м выше, чем в глубоководной области, однако отличия не столь значительны — 0,005 и 0,004 м⁻¹ соответственно. Объяснить это можно тем, что измерения на шельфе проводились в его восточной части, куда происходит постоянный заток более прозрачных вод из глубоководной области моря вдоль западного берега Крымского п-ова. Обращает на себя внимание разное изменение с увеличением глубины величины R в глубоководной области и на шельфе: в первом случае она уменьшилась с 0,029 до 0,022, во втором — возросла с 0,030 до 0,033. Возможно, на шельфе это было обусловлено влиянием отражения света от дна, что приводит к увеличению восходящего потока света и соответственно — величины R .

В распределении глубин с однопроцентной квантовой облученностью на полигоне в 1993 г. выделяется ряд станций с высокими величинами $H_Q(1\%)$, равными 34 — 42 м, по сравнению с фоновыми, составлявшими менее 30 м. Гидрологические данные показывают, что эти станции находились в антициклоническом вихре, который периодически образуется в указанном районе. В области антициклонического вихря наблюдалось и значительное уменьшение величин ε (рис. 2).

Сравнение данных измерений в глубоководной области в 1993 и 1995 гг. показывает небольшое уменьшение величин α_{\downarrow} в 1995 г. в слое 0 — 20 м — на 0,002 м⁻¹ и их увеличение в слое 20 — 40 м — на 0,003 м⁻¹. Относительно изменения величин α_{\downarrow} в слое 0 — 20 м следует сказать, что, хотя они лежат в пределах среднеквадратических отклонений, их можно считать достоверными, так как соответственно изменились и другие показатели, характеризующие прозрачность воды в поверхностных слоях: уменьшилась величина показателя ослабления направленного света ε — с 0,178 до 0,162 м⁻¹ и увеличилась глубина видимости белого диска Z_b — с 11,5 до 14,8 м.

Т а б л и ц а 2

Сопоставление характеристик подводной облученности в глубоководных районах Черного моря в различные сезоны 1989 — 1995 гг.

Характеристика	Время проведения измерений, районы моря, глубины				
	Лето 1989 г. Центральный, южный, восточный районы, 0 — 20 м	Зима 1991 г. Центр восточного круговорота, 0 — 20 м	Зима 1991 г. Периферия круговоротов, 0 — 35 м	Весна 1993 г. Западный район, около Крыма, 0 — 20 м	Весна 1995 г. Центральный, западный районы, 0 — 20 м
α_{\downarrow} , м ⁻¹	0,045	0,069	0,047 - 0,052	0,043	0,041
R	0,026	0,055	Нет свед.	0,029	0,028
$H_Q(1\%)$, м	34	25	29 — 33	23 — 42	32 — 36

Приведено сравнение наших измерений в весенний период 1993 и 1995 гг. с результатами измерений подводной облученности летом 1989 г. и зимой 1991 г. в глубоководных районах моря при $\lambda = 522$ нм [2]. Следует от-

метить, что районы измерений сопоставляемых величин не совпадают, в то же время в [2] отмечается высокая пространственная изменчивость характеристик в глубоководной области. Поэтому проводимое сравнение недостаточно корректно. Однако оно все же дает представление о порядке величин гидрооптических характеристик в море в различные сезоны.

Данные табл. 2 показывают, что значения гидрооптических характеристик в весенний и летний периоды близки. В зимний период они заметно выше. Это же относится и к величинам Λ . По нашим данным, в 1993 и 1995 гг. они составили (в среднем) соответственно 0,80 и 0,79, а, по данным [2], в центральных районах моря летом 1989 г. $\Lambda = 0,78$, зимой 1991 г. $\Lambda = 0,87$.

Выводы. Показатели вертикального ослабления дневного света, коэффициенты диффузного отражения и параметры рассеяния света Λ в глубоководной области моря в весенний период 1993 и 1995 гг. и в летний период 1989 г. [2] были близки. В зимний период 1991 г., согласно [2], соответствующие показатели были значительно выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 1980-х — начале 1990-х годов. — Севастополь, 1996. — 32 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ. ИНБЮМ).
2. Николаев В.П. Новые результаты измерений вертикального ослабления подводной облученности в Черном море // Океанология. — 1996. — 36, № 3. — С. 377 – 383.
3. Вайнерман Б.А. Измерения фотосинтетически активной радиации в океане // Световые поля в океане. — М.: ИО АН СССР, 1979. — С. 39 – 49.
4. 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.
5. Левин И.М., Николаев В.П. Об оценке вертикального ослабления квантовой облученности в области фотосинтетически активной радиации в Черном море // Океанология. — 1992. — 32, вып. 2. — С. 241 – 245.
6. Левин И. М., Николаев В.П. Новый метод определения спектральных значений показателя поглощения и параметра вытянутости индикатрисы рассеяния света водой // Там же. — 1992. — 32, вып. 6. — С. 1145 – 1150.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 04.11.03

ABSTRACT Data on the values of the vertical attenuation index and the diffusive reflection coefficient of daylight in the Black Sea in vernal periods in 1993 and 1995 are presented. The depth of one-percent quantum irradiance and parameter Λ showing a portion of the directed light attenuation due to scattering $\Lambda = \sigma / \epsilon$ are calculated. Characteristics of underwater irradiance in the sea in 1989 — 1995 are compared.