

В.И. Маньковский, М.В. Соловьев

## Индикатрисы рассеяния света и рассчитанный по ним состав взвеси в Черном море

Анализируются данные измерений индикатрис рассеяния света в Черном море зимой 1991 г. и летом 1998 г. Приводятся основные характеристики индикатрис, обсуждается их взаимосвязь и пространственная изменчивость. По данным о рассеянии света определена численная и весовая концентрация различных фракций взвешенных в воде частиц. Проведено сравнение характеристик рассеяния света и состава взвеси в Черном море по данным 1973 г., а также в Эгейском, Ионическом морях и Индийском океане.

### Введение

Первые данные об индикатрисах рассеяния света в водах Черного моря были получены в 1970 – 1973 гг. [1]. Эти годы характеризовались высокой прозрачностью воды:  $Z_6 = 14,9 - 18,1$  м (среднегодовая глубина видимости белого диска [3]). Начиная со второй половины 80-х годов, вследствие влияния антропогенных и естественных факторов в экосистеме моря произошли большие изменения, приведшие к повышению трофности его вод и снижению их прозрачности. К 1992 г. среднегодовая величина  $Z_6$  снизилась до 6,2 м. В последующие годы она стала повышаться, но так и не достигла тех высоких значений, которые наблюдались ранее; в 1997 – 2002 гг. величины  $Z_6$  находились в пределах 10 – 12 м. В связи с этим актуально рассмотреть данные об индикатрисах рассеяния света для нового состояния экосистемы моря.

В данной работе представлены характеристики индикатрис рассеяния света, измеренные в 1991 г., при  $Z_6 = 8,4$  м и в 1998 г. при  $Z_6 = 11$  м. В 1991 г. измерения были выполнены в 54-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (17,11 – 13,12) на крупномасштабном полигоне в северной части моря. В 1998 г. измерения проводились во 2-м рейсе НИС «Горизонт» (01 – 04.06) на небольшом полигоне западнее п-ова Крым в зоне Основного Черноморского течения.

Форма индикатрисы рассеяния света зависит от состава взвешенных в воде частиц, который можно определять, решая обратную задачу. Такие расчеты по измеренным индикатрисам были выполнены, и впервые для Черного моря получены характеристики численной и весовой концентрации различных фракций взвеси в поверхностных и глубинных водах.

### Аппаратура и методика

Измерения проводились нефелометром [2]. Пробы воды отбирались с поверхности моря пластмассовым ведром, а с глубин — батометром СТД-зонда.

Рассчитывались следующие характеристики рассеяния света: показатель рассеяния  $\sigma$ ,  $\text{м}^{-1}$ :

$$\sigma = 2\pi \int_0^{180} \sigma(\gamma) \sin(\gamma) d\gamma; \quad (1)$$

коэффициент асимметрии  $K$ :

$$K = \sigma^{\uparrow} / \sigma^{\downarrow} \int_0^{90} \sigma(\gamma) \sin \gamma d\gamma / \int_90^{180} \sigma(\gamma) \sin \gamma d\gamma, \quad (2)$$

где  $\sigma^{\uparrow}$  и  $\sigma^{\downarrow}$  — показатели рассеяния вперед и назад; средний косинус рассеяния:

$$\langle \cos \gamma \rangle = \int_0^{180} \sigma(\gamma) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma / \int_0^{180} \sigma(\gamma) \sin \gamma d\gamma; \quad (3)$$

кумулятивная функция рассеяния, показывающая относительную долю света, рассеянного в телесном угле  $\Omega$  при изменении его плоского угла  $\gamma$  от 0 до 180°:

$$\alpha(\Omega) / \sigma = \int_0^{\gamma} \alpha(\gamma) \sin \gamma d\gamma / \int_0^{180} \alpha(\gamma) \sin \gamma d\gamma; \quad (4)$$

вытянутость индикатрисы в переднем направлении:

$$S(0,25/90) = \log[\alpha(0,25/\sigma(90))]. \quad (5)$$

Для расчета интегральных характеристик индикатрисы функция рассеяния  $\alpha(\gamma)$ , измеренная нефелометром в диапазоне углов 2 – 162,5°, экстраполировалась в область углов менее 2° по формуле  $\log[\sigma(\gamma)] = A + B\gamma + C\gamma^2$ . Для нахождения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  использовались величины  $\alpha(\gamma)$ , измеренные на углах 2; 7,5; 12,5°. Для углов более 162,5° принималось  $\sigma(\gamma) = \text{const}$ . Проверка на модельных индикатрисах, рассчитанных от 0 до 180° для типичных параметров морской взвеси, показала расхождение интегральных характеристик в пределах 6%.

### Характеристики индикатрис и их изменчивость

В 1991 г. измерено 56 индикатрис, из них 51 — в пробах с поверхности моря и 5 — с глубин 50 – 160 м. В 1998 г. измерено 7 индикатрис в пробах с поверхности. В табл. 1 приведены пределы изменения характеристик индикатрисы. Показатели рассеяния в табл. 1 и далее в тексте даны при десятичном основании. В табл. 2 приведено пять индикатрис, измеренных в 1991 г.: три для поверхностных вод с разными коэффициентами асимметрии, индикатриса для промежуточных наиболее прозрачных вод моря ( $H = 85$  м) и индикатриса в мутном слое ( $H = 109$  м), существующем в редокс-зоне (редокснефелоидный слой).

Т а б л и ц а 1

Пределы изменения характеристик индикатрисы рассеяния на полигонах в 1991 и 1998 гг.

Год	Характеристика			
	$\sigma, \text{м}^{-1}(\log)$	$K$	$\langle \cos \gamma \rangle$	$S(0,25/90)$
1991	0,096 – 0,287	43,7 – 137,1	0,915 – 0,968	4,33 – 5,41
1998	0,069 – 0,109	28,6 – 35,0	0,882 – 0,906	4,27 – 4,56

**Индикатрисы рассеяния света в Черном море  
и их интегральные параметры**

Угол рассеяния $\gamma$ , град	Log $\sigma(\gamma)$				
0,25	1,204	1,360	1,968	1,385	1,415
0,75	1,057	1,184	1,729	1,126	1,222
1,25	0,917	1,016	1,500	0,879	1,038
2	0,713	0,773	1,173	0,523	0,773
4,5	0,153	0,107	0,285	-0,424	0,055
7,5	-0,394	-0,544	-0,504	-1,324	-0,614
12,5	-0,825	-1,045	-0,945	-1,865	-1,045
17,5	-1,102	-1,312	-1,272	-2,232	-1,312
22,5	-1,387	-1,617	-1,567	-2,537	-1,617
27,5	-1,706	-1,876	-1,876	-2,746	-1,876
32,5	-1,890	-2,100	-2,060	-2,890	-2,060
37,5	-2,116	-2,266	-2,236	-3,096	-2,236
42,5	-2,190	-2,370	-2,370	-3,220	-2,410
47,5	-2,332	-2,542	-2,462	-3,422	-2,542
57,5	-2,564	-2,784	-2,734	-3,654	-2,834
67,5	-2,794	-3,014	-2,954	-3,734	-3,014
77,5	-3,060	-3,240	-3,170	-3,930	-3,300
87,5	-3,160	-3,370	-3,370	-3,980	-3,430
97,5	-3,264	-3,564	-3,464	-4,014	-3,514
107,5	-3,361	-3,551	-3,551	-3,991	-3,601
117,5	-3,352	-3,602	-3,552	-4,042	-3,552
127,5	-3,371	-3,581	-3,501	-3,971	-3,581
137,5	-3,340	-3,520	-3,460	-4,000	-3,590
147,5	-3,330	-3,390	-3,450	-4,050	-3,550
157,5	-3,257	-3,417	-3,417	-4,047	-3,417
162,5	-3,242	-3,362	-3,402	-4,002	-3,402
167,5	-3,242	-3,362	-3,402	-4,002	-3,402
177,5	-3,242	-3,362	-3,402	-4,002	-3,402
°с.ш.	31,7	33,7	35,2	37,7	33,7
°в.д.	44,75	43,5	44,76	43,5	43,23
Глубина, м	0	0	0	85	102
$\sigma$ , м <sup>-1</sup>	0,171	0,148	0,287	0,060	0,144
$K$	58	78	137	44	77
$\langle \cos \gamma \rangle$	0,924	0,943	0,968	0,915	0,943
$S(0,25/90)$	4,44	4,82	5,38	4,5	4,9

Для наиболее вытянутой индикатрисы  $S(0,25/90) = 5,41$  угол, в котором рассеивается половина всего рассеянного света  $\gamma(0,5\sigma)$ , составляет  $2,3^\circ$ , для наименее вытянутой  $S(0,25/90) = 4,33$  этот угол равен  $6,3^\circ$ . Для сравнения укажем, что для экстремальных индикатрис Атлантического океана [3] эти величины составили  $1,7$  и  $14,0^\circ$ , для Индийского океана [4] —  $2,0$  и  $10,0^\circ$ , для озера Байкал —  $2,5$  и  $11,5^\circ$  [5]. Таким образом, для наиболее вытянутых индикатрис во всех указанных водоемах величины  $\gamma(0,5\sigma)$  близки и лежат в пределах  $1,7 - 2,5^\circ$ . Для наименее вытянутой индикатрисы величина  $\gamma(0,5\sigma) = 6,3^\circ$  в Черном море значительно меньше, чем в других водоемах, где она составляла  $\gamma(0,5\sigma) = 10 - 14^\circ$ . Такая разница может быть обусловлена как особенностями состава взвеси в Черном море, так и недостаточным количеством измерений индикатрис рассеяния в его различных водах.

Ранее [6] было показано, что суммарный показатель рассеяния можно определять с достаточной для многих задач точностью, не измеряя всю индикатрису от  $0$  до  $180^\circ$ , а лишь измерив показатель рассеяния в одном направлении. Наиболее высокая корреляция между  $\sigma$  и  $\sigma(\gamma)$  наблюдается на небольших углах рассеяния света. Для индикатрис, измеренных в Атлантическом океане, Средиземном и Черном морях в 1970 – 1973 гг., было найдено, что наилучшим для данных целей является угол  $4,5^\circ$ , где коэффициент корреляции между суммарным показателем рассеяния и показателем рассеяния в данном направлении был максимален,  $r = 0,963$ . Для этого угла связь имеет вид

$$\sigma = 0,11 \alpha(4,5) + 0,007. \quad (6)$$

Для индикатрис Черного моря, измеренных в 1991 и 1998 гг., максимальная корреляция между  $\sigma$  и  $\sigma(\gamma)$  с коэффициентом  $r = 0,986$  наблюдается при угле  $3,5^\circ$ :

$$\sigma = 0,0689 \alpha(3,5). \quad (7)$$

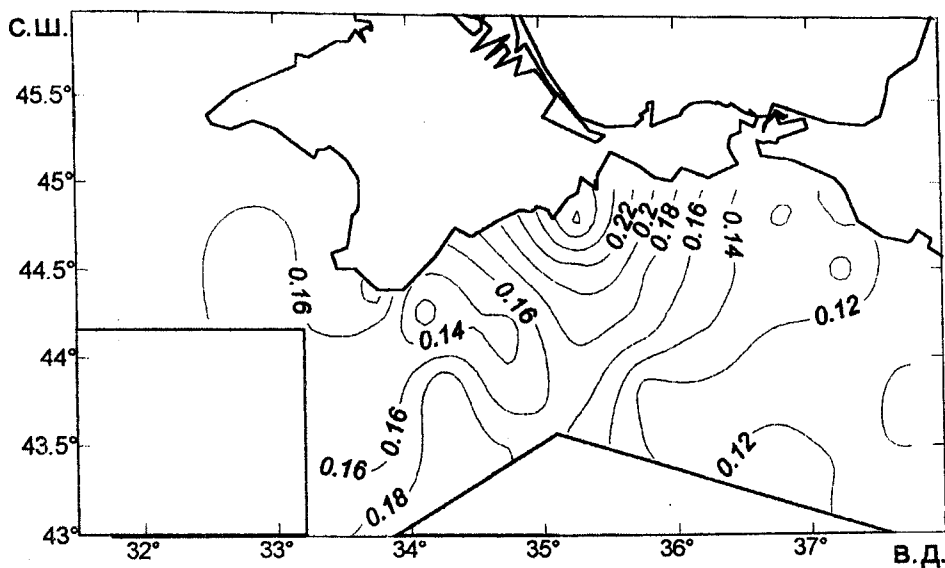
Для сравнения укажем, что такой же угол был определен и для индикатрис Байкала [5], а уравнение связи для них близко к полученному в Черном море:

$$\sigma = 0,063 \alpha(3,5) + 0,016. \quad (8)$$

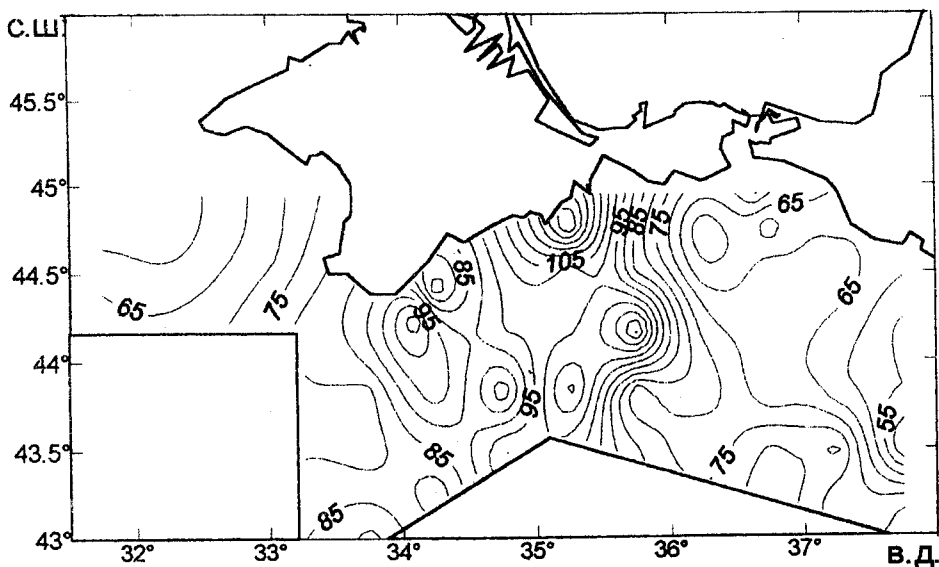
При сопоставлении показателей рассеяния с коэффициентом асимметрии в пробах с поверхности моря было установлено, что при увеличении  $\sigma$  возрастает и величина  $K$ . Для этих величин получено соотношение  $K = 680\sigma - 24$  с коэффициентом корреляции  $r = 0,84$ .

Подобные связи устанавливались ранее, и было показано, что они носят региональный характер, который определяется составом взвеси. Так, для поверхностных вод Байкала (глубины  $0 - 25$  м)  $K = 120\sigma + 45$ , для поверхностных вод Тропической Атлантики в западной ее части  $K = 550\sigma$ , в восточной части  $K = 800\sigma$ .

Было отмечено, что соотношение для  $K$  и  $\sigma$ , полученное для поверхностных вод Черного моря, не выполняется в промежуточных водах с минимальной прозрачностью. Коэффициент пропорциональности для  $K$  и  $\sigma$  на глубине  $85$  м значительно больше, чем в поверхностных водах, что свидетельствует об изменении состава взвеси. О характере этих изменений будет сказано далее.



Р и с. 1. Распределение показателя рассеяния  $\sigma$ ,  $\text{м}^{-1}$  (log) в северной части Черного моря в 1991 г.



Р и с. 2. Распределение коэффициента асимметрии индикатрис рассеяния в северной части Черного моря в 1991 г.

На рис. 1 и 2 показано распределение показателя рассеяния и коэффициента асимметрии в поверхностных водах северной части моря зимой 1991 г. Вблизи южного побережья Крыма в районе  $35^{\circ}15'$  в.д. наблюдался локальный

максимум этих параметров. Его происхождение связано с азовскими более мутными водами, поступающими в Черное море через Керченский пролив и переносимыми на запад круговым циклоническим течением. Линзы таких вод периодически регистрируются вдоль южного побережья Крыма.

### Состав взвеси

В ряде работ показаны возможности метода светорассеяния для определения состава морской взвеси и его преимущества перед методом микроскопического анализа. Кроме трудоемкости подсчета числа частиц под микроскопом, этим методом не определяется число мелких частиц с диаметром менее 1 мкм. В то же время, как показывают данные по светорассеянию, число таких частиц в морской взвеси огромно — порядка  $10^8 - 10^{10}$  шт./литр.

Для определения состава взвеси использованы соотношения, полученные в [7] на моделях индикатрис рассеяния морской водой (длина волны 546 нм) с типичными показателями преломления и параметрами распределения по размерам минеральных и органических частиц, содержащихся в морской воде. Взвесь разбита на три фракции с диаметром частиц: 0,4 – 1,0 мкм (минеральные); 1 – 2 мкм (минеральные); 2 – 30 мкм (органические). Распределение по размерам задавалось законом  $N \sim d^m$ , где  $d$  — диаметр частиц; для минеральных частиц  $m = 4$ , для органических —  $m = 3$ . Получены следующие регрессионные соотношения между угловыми показателями рассеяния (при десятичном основании) и числовой  $N$  (млн/л) и весовой  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) концентрациями частиц:

$$N(0,4 - 1,0) = 9,9 \cdot 10^4 \sigma(45) - 1,0, \quad (9)$$

$$C(0,4 - 1,0) = 2,05 \cdot 10^4 \sigma(45) - 3,0, \quad (10)$$

$$N(1 - 2) = 21,9 \sigma(6) + 0,2, \quad (11)$$

$$C(1 - 2) = 55,3 \sigma(6) + 0,5, \quad (12)$$

$$N(2 - 30) = 0,46 \sigma(1) + 0,3, \quad (13)$$

$$C(2 - 30) = 27,6 \sigma(1) + 16. \quad (14)$$

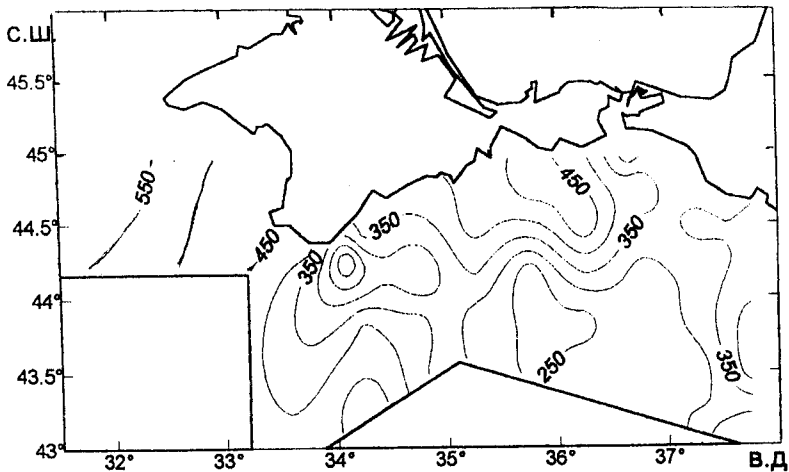
По данным формулам для 25 индикатрис Черного моря была рассчитана общая концентрация взвеси. В этих же пробах определена концентрация взвеси весовым методом. В результате сопоставления двух методов получено соотношение

$$C_{\text{вес}} = 1,08 C_{\text{рас}}. \quad (15)$$

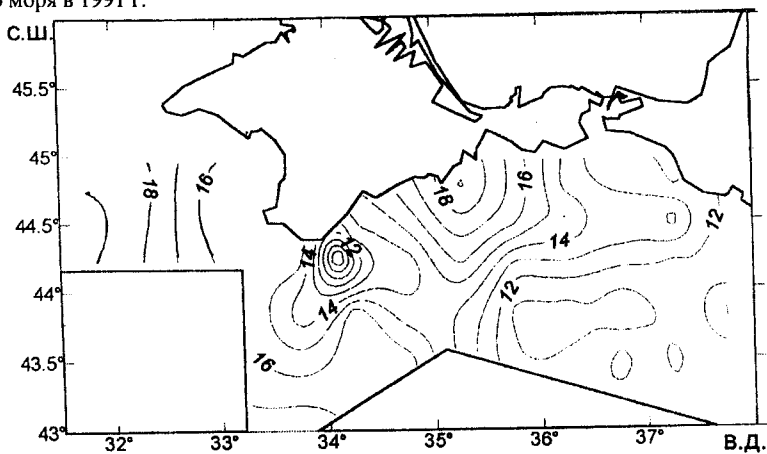
Т а б л и ц а 3

**Пределы изменения числа частиц  $N$  и их весовой концентрации  $C$  в поверхностных и глубинных водах на полигонах в 1991 и 1998 гг.**

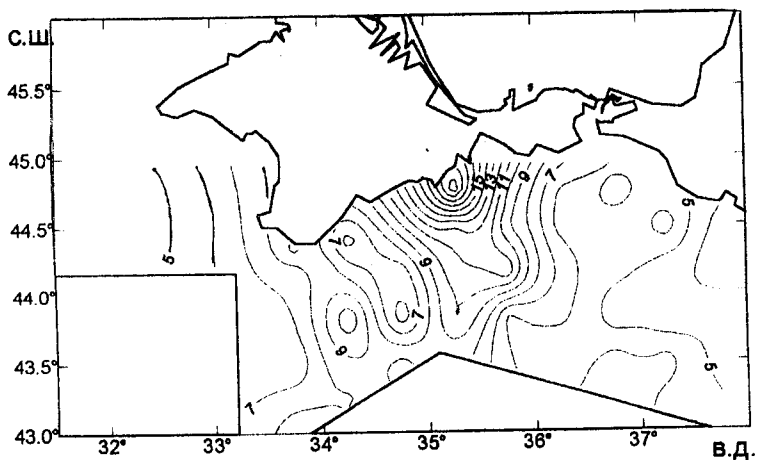
$N(0,4 - 1)$ млн/л	$C(0,4 - 1)$ мг/л	$N(1 - 2)$ млн/л	$C(1 - 2)$ мг/л	$N(2 - 30)$ млн/л	$C(2 - 30)$ мг/л	$C_{\text{общ}}$		$C_{2\text{мкм}}/$ $C_{\text{общ}}$
						млн/л	мг/л	
46 – 541	0,007 – 0,109	3,5 – 19,6	0,009 – 0,049	3,1 – 19,9	0,18 – 1,19	55 – 571	0,32 – 1,31	0,049 – 0,38



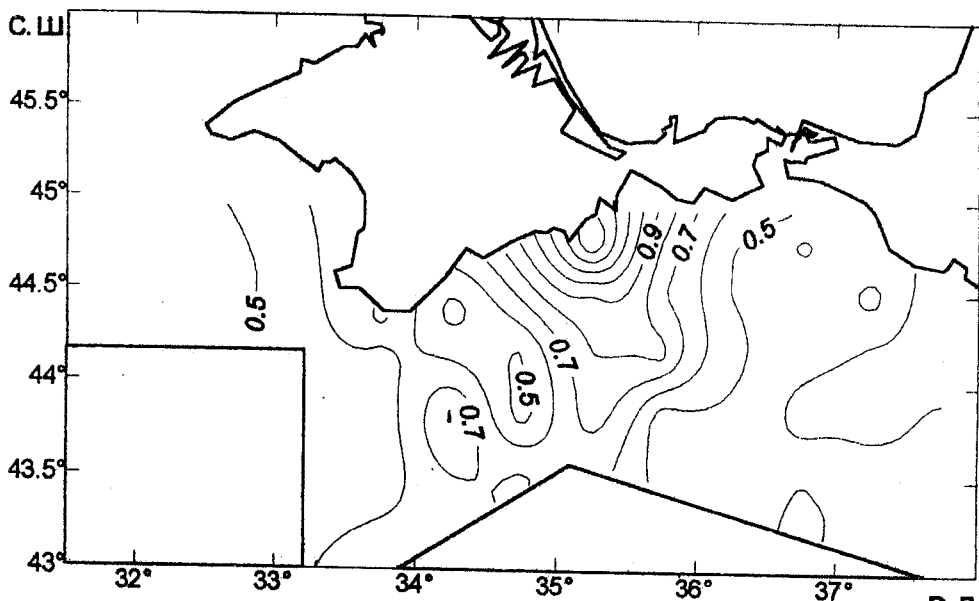
Р и с. 3. Распределение численности частиц размером 0,4 – 1,0 мкм (млн/л) в северной части Черного моря в 1991 г.



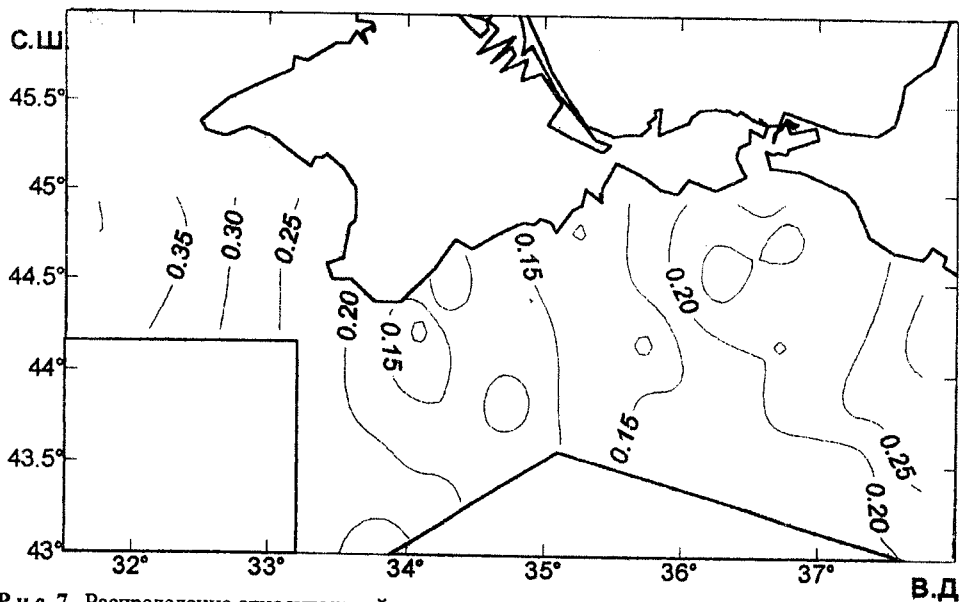
Р и с. 4. Распределение численности частиц размером 1,0 – 2,0 мкм (млн/л) в северной части Черного моря в 1991 г.



Р и с. 5. Распределение численности частиц размером >2,0 мкм (млн/л) в северной части Черного моря в 1991 г.



Р и с. 6. Распределение полной концентрации частиц  $C$  (мг/л) в северной части Черного моря в 1991 г. В.Д.



Р и с. 7. Распределение относительной концентрации мелких частиц  $C_{2\text{мкм}}/C_{\text{общ}}$  в северной части Черного моря в 1991 г. В.Д.

Коэффициент корреляции составил  $r = 0,822$ , относительная среднеквадратическая ошибка 20 %. Разница между двумя методами определения концентрации взвеси, равная 8 %, а также достаточно высокий коэффициент корреляции свидетельствуют о соответствии модели [7] реальным условиям в Черном море. С учетом соотношения (15) в формулы (9) – (14) была внесена поправка и по ним рассчитана численная и весовая концентрация различных фракций взвеси. Их экстремальные значения приведены в табл. 3, а на рис. 3 – 7 показана



но распределение численной и весовой концентрации взвеси в поверхностном слое северной части моря зимой 1991 г.

По распределению числа частиц разных размерных фракций видно, что максимальная численность органических частиц наблюдалась в районе максимальных величин показателя рассеяния и коэффициента асимметрии; здесь она составила 19,9 млн/л. Для наиболее мелких частиц с размерами 0,4 – 1,0 мкм максимум численности был на северо-западном шельфе. Тут же наблюдались наиболее высокие величины относительного содержания частиц с диаметром менее 2 мкм —  $C_{<2\text{мкм}} / C_{\text{общ}} = 0,30 - 0,35$ , что является следствием выноса в этот район моря больших количеств минеральной взвеси с водами Дуная, Днепра и Днестра.

### Обсуждение

Расчеты концентрации частиц разных размерных фракций объясняют отмеченное выше изменение связи коэффициента асимметрии с показателем рассеяния наблюдавшееся в промежуточных наиболее прозрачных водах Черного моря ( $H = 85$  м) по сравнению с поверхностными (табл. 4). Это вызвано резким уменьшением на глубине 85 м содержания мелких частиц. Так, на ст.6701 на поверхности отношение  $C_{<2\text{мкм}} / C_{\text{общ}}$  составило 0,18, а на глубине 85 м — 0,069; на ст. 6732 эти величины равнялись соответственно 0,28 на поверхности и 0,049 на глубине 85 м. Индикатрисы рассеяния мелких (минеральных) частиц имеют намного меньшую вытянутость по сравнению с индикатрисами рассеяния крупной (органической) взвеси. Вследствие этого при уменьшении численности мелких частиц и их относительного содержания во взвеси вытянутость совокупной индикатрисы рассеяния возрастает и коэффициент ее асимметрии увеличивается. Это и наблюдалось на глубине 85 м, несмотря на уменьшение общего показателя рассеяния по сравнению с поверхностью.

Т а б л и ц а 4

**Характеристики индикатрис рассеяния и состав взвеси: на поверхности, в прозрачных промежуточных водах (глубина 85 м), в мутном слое редокс-зоны моря (глубины 102 и 160 м)**

Глубина, м	$\sigma_{-1}$ , $M^{-1}$	$K$	$\langle \cos \gamma \rangle$	$S(0,25/90)$	$N(0,4-1)$ , млн/л	$N(1-2)$ , млн/л	$N(2-30)$ , млн/л	$C_{\text{общ}}$ , мг/л	$C_{<2\text{мкм}} / C_{\text{общ}}$
Станция 6701									
0	0,19	92	0,951	4,88	378,6	16,4	8,85	0,65	0,181
85	0,114	122	0,971	5,38	112,3	7,1	8,7	0,56	0,069
102	0,114	77	0,943	4,88	329,6	12,3	6,6	0,49	0,196
Станция 6732									
0	0,12	44	0,915	4,50	401,1	10,6	4,6	0,38	0,28
85	0,06	96	0,969	5,41	46,2	3,5	5,1	0,32	0,049
Станция 6733									
160	0,108	82	0,942	4,80	270,9	9,8	4,1	0,32	0,24

Следует отметить, что численность крупных частиц на глубине 85 м в обоих случаях была такой же, как и на поверхности моря, и уменьшение показателя рассеяния произошло за счет уменьшения численности мелких частиц. Возможно, это является основным фактором происхождения слоя минимума в вертикальном распределении показателя ослабления света.

Обращают на себя внимание высокие концентрации мелкой взвеси в редокс-нефелюидном слое (табл. 4, глубины 102 и 160 м). Объясняется это специфической природой данного слоя, образующегося за счет высокой концентрации взвешенных форм окиси марганца и железа в редокс-зоне. В сероводородной зоне эти элементы находятся в растворимой форме. Попадая из сероводородной в редокс-зону, они в ней окисляются, в результате чего образуются нерастворимые в воде гидроксиды данных металлов, замутняющие воду.

Во 2-м рейсе НИС «Горизонт» (май 1998 г.) нами были проведены измерения индикатрис рассеяния в глубоководных районах Эгейского и Ионического морей. В Эгейском море число частиц с размерами менее 2 мкм (минеральные) составляло  $N_{<2\text{мкм}} = 124 - 131$  млн/л, а их относительная концентрация  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,099 - 0,117$ ; в Ионическом море:  $N_{<2\text{ мкм}} = 94 - 116$  млн/л,  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,081 - 0,121$ . В то же время по всему маршруту судна в Черном море — от пролива Босфор до крымского полигона и на полигоне — эти величины были следующими:  $N_{<2\text{мкм}} = 218 - 446$  млн/л;  $C_{<2\text{ мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,219 - 0,297$ , то есть такого же порядка, как и в 54-м рейсе НИС «Михаил Ломоносов» (рис. 3 – 7). Данное сравнение показывает, что численность и относительное содержание минеральных частиц во взвеси в Черном море намного выше по сравнению с Эгейским и Ионическим. Это обусловлено намного большим объемом стока рек в Черное море, являющихся основным поставщиком минеральной взвеси в водоем.

Т а б л и ц а 5

**Характеристики индикатрис рассеяния и состав взвеси  
в Черном море в 1973 г.**

Глубина, м	$\sigma_s, \text{м}^{-1}$	$S(0,25/90)$	Число частиц, млн/л			Концентрация, мг/л			$C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}}$
			0,4 – 1	1 – 2	2 – 30	0,4 – 1	1 – 2	2 – 30	
Станция 725									
0	0,09	4,17	286	9,1	2,0	0,056	0,023	0,138	0,364
Станция 727									
2	0,10	4,39	321	9,3	3,0	0,063	0,023	0,174	0,331
5	0,09	4,25	296	9,3	2,5	0,058	0,024	0,145	0,360
Станция 782									
0	0,19	3,58	1437	13,3	2,7	0,294	0,034	0,158	0,675
Станция 739									
0	0,14	3,66	876	12,4	1,9	0,178	0,031	0,114	0,647

В табл. 5 приведены характеристики индикатрис рассеяния и параметры взвеси по измерениям в ноябре 1973 г. на четырех станциях. Станции 725 и 727 располагались в глубоководной области (на 43°с.ш.), ст. 728 и 739 — на северо-западном шельфе. Рассмотрим, какие изменения произошли в составе взвеси и характеристиках индикатрисы.

Число минеральных частиц в глубоководной области в 1973 г. на 43° с.ш. было в пределах  $N(<2\text{мкм}) = 295 - 330$  млн/л, в 1991 г. в полосе 43°00' – 43°30' с.ш. —  $N(<2\text{мкм}) = 269 - 395$  млн/л. Таким образом, численность минеральных частиц в центральных глубоководных районах моря практически не изменилась. Это можно объяснить тем, что основным поставщиком минеральной взвеси в водоем являются реки, расход которых существенных изменений за эти годы не претерпел.

Число органических частиц в глубоководной области в 1973 г. составляло  $N_{>2\text{мкм}} = 2,3 - 2,5$  млн/л, в 1991 г. —  $N_{>2\text{мкм}} = 4,6 - 9,4$  млн/л, то есть в 1973 г. оно было значительно меньше. Это отразилось на относительной концентрации мелкой взвеси в глубоководной области, которая в 1973 г. составила  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,36 - 0,37$  по сравнению с  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,16 - 0,28$  в 1991 г. Более высокое относительное содержание мелких частиц в 1973 г. проявилось в меньшей вытянутости индикатрис в глубоководной области,  $S(0,25/90) = 4,07 - 4,25$ , в то время как в 1991 г.  $S(0,25/90) = 4,7 - 5,1$ . На северо-западном шельфе в 1991 г. число минеральных частиц было намного больше,  $N_{<2\text{мкм}} = 900 - 1464$  млн/л, а их относительная концентрация  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,647 - 0,675$ . Соответственно здесь была значительно меньше вытянутость индикатрис —  $S(0,25/90) = 3,58 - 3,66$ .

Более высокая численность крупных частиц во взвеси в 1991 г. сказалась на положении точки пересечения индикатрис, в которой корреляция между  $\sigma$  и  $\sigma(\gamma)$  максимальна. В работе [6] показано, что при увеличении численности крупных (биологических) частиц точка пересечения сдвигается в область меньших углов. Это и произошло в природе: для индикатрис Черного моря в 1970 – 1973 гг. такая точка находилась на угле 4,5°, а в 1991 г. — на угле 3,5°.

Т а б л и ц а 6

Численность частиц (млн/л)

Бассейн/район/станция	Глубина, м	Диаметр частиц, мкм		
		0,4 – 1,0	1,0 – 2,0	>2,0
Индийский океан/глубоководный/ст. 770	10	78	1,8	2,2
Индийский океан/шельф/ст. 783	10	450	11,0	13,0
Черное море 1991/глубоководный	0	193 – 461	9,7 – 16,4	3,1 – 10
Черное море 1991/шельф	0	396 – 541	6,9 – 15,6	4,8 – 19
Ионическое море/глубоководный	0	92 – 111	2,3 – 5,3	3,7 – 5,7
Эгейское море/глубоководный	0	119 – 126	4,7 – 4,9	5,1 – 5,2

В табл. 6 для сравнения приведены наши данные о численности частиц в Черном, Эгейском и Ионическом морях и данные из работы [8] — о численности частиц в Индийском океане, рассчитанной также по светорассеянию. Станция 770 сделана в высокопрозрачных водах центральной глубоководной области океана в районе экватора, ст. 783 — на шельфе в северной части Бенгальского залива, в 42 милях к югу от дельты р. Ганг.

Сопоставление численности частиц на ст. 783, сделанной в Индийском океане на шельфе в районе впадения р. Ганг, и на станции в шельфовых водах Черного моря в 1991 г. показывает одинаковый порядок величин. Наи-

меньшая численность частиц в сравниваемых районах приходится на глубоководную часть Индийского океана, воды которого известны своей высокой прозрачностью —  $Z_6 = 35 - 40$  м. Невысокая численность частиц в Ионическом море также согласуется с высокой прозрачностью его вод —  $Z_6 = 30 - 35$  м.

В ноябре 1991 г. в западной части Черного моря проводились биологические исследования на НИС «Профессор Водяницкий». По данным Л.В. Георгиевой (частное сообщение, ИнБЮМ НАН Украины), на станции, выполненной в глубоководной области западной части моря ( $43^\circ\text{с.ш.}; 32^\circ\text{в.д.}$ ), в пробе с поверхности на долю нанопланктона (размеры  $2 - 15$  мкм) приходилось 84% всей численности водорослей, при этом 98% нанопланктона было представлено кокколитофоридами; их численность составила 0,505 млн/л. По данным о светорассеянии в ноябре 1991 г. на ближайших (к биологической) станциях ( $43^\circ 15'\text{с.ш.}, 33^\circ 45'\text{в.д.}; 43^\circ 15'\text{с.ш.}, 34^\circ 15'\text{в.д.}$ ), общая численность органических частиц ( $2 - 30$  мкм) равнялась  $7,9 - 8,9$  млн/л. При принятом в модели распределении биологических частиц по размерам ( $N \sim d^3$ ) подавляющую численность составляют мелкие частицы — на их долю в диапазоне  $2 - 6$  мкм приходится  $\sim 87\%$ . Численность частиц в диапазоне размеров кокколитофорид  $6 - 12$  мкм на указанных станциях составляла  $0,77 - 0,87$  млн/л. Принимая во внимание, что в данном размерном диапазоне во взвеси находятся еще частицы детрита, которые при биологических подсчетах не учитывались, видим, что порядок величин по биологическим и оптическим данным неплохо согласуется.

Т а б л и ц а 7

**Относительное содержание минеральной взвеси по данным о светорассеянии на ст. 725 в ноябре 1973 г.**

Глубина, м	$C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}}$	Глубина, м	$C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}}$
5	0,364	49	0,263
12	0,433	77	0,176
20	0,408	112	0,235
35	0,385		

В заключение сравним соотношения содержания минеральной и органической взвеси в Черном море, определенные по индикатрисам рассеяния света и весовым методом. Для этого воспользуемся результатами измерений индикатрис в ноябре 1973 г. и данными, полученными весовым методом (органическая взвесь выжигалась) в феврале 1971 г. [9]. Прозрачность воды в море в 1971 – 1973 гг. была высокой и относительно стабильной,  $Z_6 = 16,5 \pm 1,6$  м. В плане сезонной изменчивости величины  $Z_6$  в ноябре и феврале отличаются незначительно — около 6 % (климатические данные за 1922 – 1985 гг.). По данным табл. 19 из работы [9], среднее содержание минеральной взвеси в слое  $0 - 100$  м в центральной части моря над глубинами 2100 и 1160 м в феврале 1971 г. составило  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,272 - 0,264$ . По нашим данным (табл. 7), среднее содержание минеральной взвеси в слое  $0 - 100$  м в ноябре 1973 г.  $C_{<2\text{мкм}}/C_{\text{общ}} = 0,290$ . Таким образом, результаты обоих методов близки.

В табл. 7 обращает на себя внимание значительное уменьшение содержания минеральной взвеси на глубине 77 м. Такой же эффект наблюдался в 1991 г. на глубине 85 м (табл. 4).

### Выводы

В результате проведенного исследования установлено следующее.

1. Изменения в экосистеме Черного моря, начавшиеся со второй половины 1980-х годов и приведшие к повышению трофности его вод, отразились на составе взвеси, что в свою очередь проявилось в изменении характеристик индикатрис рассеяния света.

2. Во взвеси значительно увеличилась численность органических частиц, в то время как численность минеральных частиц не изменилась. Вследствие этого возросла вытянутость индикатрис, а угол максимальной корреляции между  $\sigma$  и  $\sigma(\gamma)$  уменьшился.

3. Спецификой промежуточного слоя наиболее прозрачных вод Черного моря является резкое снижение в них численности минеральных частиц и их относительного содержания в общей взвеси.

4. Редокс-нефелоидный слой характеризуется высокой численностью минеральных частиц, что согласуется с геохимической природой его образования за счет наличия в редокс-зоне высоких концентраций взвешенных форм марганца и железа.

5. В Эгейском и Ионическом морях численность минеральных частиц намного ниже, чем в Черном море, что связано с малым стоком рек в эти средиземноморские водоемы.

6. По численности минеральных и органических частиц шельфовые воды Черного моря сопоставимы с шельфовыми водами на севере Бенгальского залива.

7. Оценки соотношения минеральной и органической фракций во взвеси Черного моря по светорассеянию согласуются с данными, полученными весовым методом. Численность органических частиц, определенная по светорассеянию, согласуется с данными биологических определений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маньковский В.И. Некоторые характеристики индикатрис рассеяния света водами Черного моря // Морские гидрофизические исследования. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1974. — С. 55 – 61.
2. Маньковский В.И. Морской импульсный нефелометр // Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 87 – 89.
3. Маньковский В.И. Экстремальные индикатрисы рассеяния света морской водой // Морские гидрофизические исследования. — 1973. — № 3(63). — С. 100 – 108.
4. Kopelevich O.V. The current low-parametric models of sea water optical properties // Proc. Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». — St. Peterburg. — 2001. — P. 18 – 23.
5. Маньковский В.И. Характеристики индикатрис рассеяния света в водах озера Байкал // Автоматизация научных исследований и световой режим водоемов. — Новосибирск: Наука, 1984. — С. 125 – 137.
6. Маньковский В.И. Экспериментальные и теоретические данные о точке пересечения индикатрис рассеяния света морской взвесью // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1975. — 11, № 12. — С. 1284 – 1293.

7. *Копелевич О.В., Маштаков Ю.Л., Буренков В.И.* Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды с помощью погружаемого малоуглового измерителя рассеяния // *Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане*. — М.: Наука, 1975. — С. 54 – 60.
8. *Буренков В.И., Гашко В.А., Копелевич О.В., Шифрин К.С.* Сопоставление различных методов определения состава морской взвеси // *Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане (10-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев»)*. — М.: Наука, 1975. — С. 74 – 82.
9. *Витюк Д.М.* Взвешенное вещество и его биогенные компоненты // Киев: Наук. думка, 1983. — 209 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 05.08.03  
После доработки  
03.10.03

ABSTRACT Measurement data of light scattering phase functions in the Black Sea in winter 1991 and summer 1998 are analyzed. Main characteristics of the phase functions are given, their interconnection and spatial variability are discussed. The data on light scattering is used for determining the numerical and weight concentration of various fractions of suspended matter. The light scattering characteristics and the suspended matter concentration in the Black Sea are compared with those in the Aegean and the Ionic seas and in the Indian Ocean.