

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.463.56

В.И. Маньковский, Д.В. Гринченко

Структура взвеси в водах Средиземного моря по измерениям индикатрис рассеяния света

По измерениям индикатрис рассеяния света, выполненным в Средиземном море в мае 1998 г., рассчитаны характеристики взвешенного вещества в поверхностных водах моря: массовая и численная концентрации взвеси разных фракций, средний размер частиц органической и минеральной фракций, параметр дисперсности минеральной взвеси. Показана связь пространственной изменчивости параметров взвеси с гидрологическими особенностями бассейна. Проведено сравнение параметров взвеси в Средиземном море в области Родосского антициклона (море Леванта) и в Индийском океане в зоне южной тропической конвергенции.

Ключевые слова: индикатриса рассеяния света, взвесь, обратные задачи.

Введение

Содержание взвеси в морской воде является одним из важных параметров, характеризующих состояние морской экосистемы. Морская взвесь неоднородна. Она состоит из терригенных и биогенных частиц. Терригенная взвесь – это минеральные частицы литосферы, попадающие в море в результате эрозии берегов и речного стока. Биогенная взвесь состоит из живых частиц – фито- и зоопланктона, бактерий, а также из мертвых частиц – детрита (остатки разложившихся клеток фитопланктона и фрагментов скелетов зоопланктона).

Широко используемый в океанографии весовой метод позволяет определять лишь общую концентрацию взвеси. В то же время, кроме общего содержания взвеси, важно знать ее состав, так как роль каждой из фракций различна в функционировании морской экосистемы. Такая информация может быть получена оптическим методом – путем измерения индикатрис рассеяния света.

Индикатрисы рассеяния света содержат информацию о параметрах дисперсной среды, которые можно рассчитать, решая обратные задачи светорассеяния. Процедура обращения характеристик светорассеяния упрощается при решении так называемых ограниченных обратных задач [1]. При решении таких задач используют показатели рассеяния света в отдельных направлениях $\sigma(\theta)$, содержащие информацию о концентрации тех или иных частиц в воде. Выбор оптимальных углов θ зависит от размера частиц – чем больше их радиус, тем меньше этот угол.

© В.И. Маньковский, Д.В. Гринченко, 2014

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 3

3

В настоящей работе приводятся результаты определения характеристик взвеси в водах Средиземного моря, полученных по измерениям индикатрис рассеяния света с помощью формул для обратных задач из работ [2, 3]. Измерения были выполнены в мае 1998 г. во 2-м рейсе НИС «Горизонт».

Аппаратура и методика измерений

Измерения индикатрис рассеяния света производились нефелометром, разработанным в отделе оптики Морского гидрофизического института НАН Украины [4]. В табл. 1 приведены технические характеристики образца, использовавшегося при измерениях в Средиземном море.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики нефелометра

Характеристика	Значение
Угол измерений, град	2; 7,5 и далее через 5 до 162,5
Расходимость пучка света, град	1,07
Угол зрения фотоприемника, град	1,07
Спектральная область измерений, нм	520(\pm 40)
Погрешность измерений $\sigma(\theta)$, %	10
Время измерения индикатрисы, мин	7

Индикатрисы измерялись в пробах воды, отбирившихся с поверхности. На рисунке показаны места отбора проб.



Места отбора проб воды (обозначены маркером) для измерения индикатрис рассеяния света

Необходимые для расчетов по формулам из работ [2, 3] показатели рассеяния света на углах менее 2° находились путем экстраполяции индикатрисы в эту область углов по формуле $\lg\sigma(\theta) = A + B\theta + C\theta^2$. Для определения коэффициентов A, B, C использовались результаты измерений в трех точках: $\sigma(2)$; $\sigma(7,5)$; $\sigma(12,5)$.

Расчетные формулы

Формулы из работы [2]. В данной работе проводилось обращение индикатрис рассеяния света в морской воде с использованием для крупной взвеси – метода малых углов, а для мелкой (минеральной) взвеси – метода подбора по моделям рассеяния частицами с распределением их численности по размерам по формуле Юнге $N_{\text{мин}} \sim r^{-\gamma}$ [2], где γ – параметр дисперсности минеральных частиц. Взвесь разделена на три фракции с радиусами частиц: $r = 0,2 - 0,5$ мкм (минеральные), $r = 0,5 - 1,0$ мкм (минеральные), $r > 1,0$ мкм (органические). Для длины волны 546 нм получены параметры регрессии между концентрацией частиц и угловыми показателями рассеяния $\sigma(\theta)$: $y = m\sigma(\theta) + n$.

При расчетах весовой концентрации для минеральных частиц с $r = 0,2 - 1,0$ мкм плотность принималась равной 2 г/см^3 , для органических с $r > 1,0$ мкм плотность равнялась 1 г/см^3 . Величины оптимальных коэффициентов регрессии m, n и среднеквадратические относительные ошибки δ (коэффициенты вариации) определения параметров взвеси представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициентов регрессии m, n и среднеквадратических относительных ошибок δ определения параметров взвеси по формулам из работы [2]

Радиус частиц r , мкм	Угол рассеяния θ , град	Численность частиц N , млн. шт/л			Массовая концентрация C , мг/л		
		m	n	δN	m	n	δC
0,2 – 0,5	45,0	$6,9 \cdot 10^4$	-1,0	0,29	$2,05 \cdot 10^4$	-3,0	0,16
0,5 – 1,0	6,0	21,9	0,2	0,14	55,3	0,5	0,14
>1,0	1,0	0,46	0,3	0,35	27,6	16,0	0,20

Формулы из работы [3]. Формулы для определения параметров взвеси в статье [3] получены по расчетам модельных индикатрис рассеяния света морской взвесью. Численность мелких (минеральных) частиц с интервалом радиусов $r = 0,02 - 2,0$ мкм задавалась распределением Юнге $N_{\text{мин}} \sim r^{-\gamma}$ с параметром $\gamma = 2,5 - 6$. Распределение численности крупных (органических) частиц $N_{\text{орг}}$ описывалось логарифмически-нормальным законом с параметрами $r_0 = 4 - 10$ мкм, $\alpha = 4 - 8$:

$$N_{\text{орг}} \sim \frac{1}{r} \exp\left[-\alpha \left(\ln \frac{r}{r_0} - \frac{1}{2} \alpha\right)^2\right]. \quad (1)$$

В результате расчетов индикатрис рассеяния при различном составе взвеси для длины волны 546 нм применительно к обеим фракциям получено общее соотношение

$$\xi = A \left[B - \lg \frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)} \right]^P + C \lg \left[\frac{\sigma(\theta_1)}{\sigma(\theta_2)} \right] + D. \quad (2)$$

Значения коэффициентов A, B, C, D, P находятся по специальной таблице для двух вариантов структуры взвеси, определяемых по величине параметра $\lg[\sigma(15)/\sigma(90)]$. По измеренным значениям $\sigma(\theta_1 = 15)$ и $\sigma(\theta_2 = 90)$ рассчитываются параметр дисперсности γ (в данном случае $\xi = \gamma$) и объемная концентрация $C_{\text{мин}}$ минеральных частиц ($\xi = \lg[\sigma(15)/C_{\text{мин}}]$), а по измеренным значениям $\sigma(\theta_1 = 0,5)$ и $\sigma(\theta_2 = 2,0)$ – средний размер органических частиц $r_{\text{орг}}$ ($\xi = \lg r_{\text{орг}}$) и их объемная концентрация $C_{\text{орг}}$ ($\xi = \lg[\sigma(2,0)/C_{\text{орг}}]$). Средний радиус минеральных частиц рассчитывается через параметр дисперсности γ по формуле

$$\langle r_{\text{мин}} \rangle = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma - 2} \right) \left(\frac{r_{\text{max}}^{2-\gamma} - r_{\text{min}}^{2-\gamma}}{r_{\text{max}}^{1-\gamma} - r_{\text{min}}^{1-\gamma}} \right), \quad (3)$$

где $r_{\text{мин}} = 0,02$ мкм, $r_{\text{max}} = 2,0$ мкм. При пересчете объемной концентрации взвеси в весовую плотность минеральных частиц принимается равной 2 г/см^3 , органических – 1 г/см^3 .

Ошибки определения параметров взвеси, рассчитанные в работе [3] с учетом погрешности оптических измерений 10%, составляют (методическая плюс приборная): параметра γ – в пределах 10 – 20%; объемной концентрации мелкой взвеси $C_{\text{мин}}$ – до 30%; объемной концентрации крупной взвеси $C_{\text{орг}}$ и среднего радиуса частиц для случая $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ менее 10 мкм – до 30%; для $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ более 10 мкм – до 60%.

Валидация расчетных формул

В статье [5] с использованием результатов измерений индикатрис рассеяния света нефелометром [4] в Черном море проводилось сравнение концентраций взвеси, полученных по расчетным формулам из работы [2], с результатами измерений весовым методом. По данным измерений в 25 пробах воды получилось в среднем соотношение $C_{\text{вес}} = 1,08 C_{\text{расч}}$, что находится в пределах методических ошибок (табл. 2).

На основе наших измерений индикатрис рассеяния света в Средиземном море по формулам из статьи [3] получена несколько бóльшая концентрация взвеси по сравнению с концентрацией по формулам из работы [2]: в среднем $C_{[3]}/C_{[2]} = 1,13$. Сравнение с возможными ошибками расчетов параметров взвеси, указанными в работах [2, 3], показывает, что отклонения рассчитанных концентраций взвеси находятся в пределах методических ошибок.

С учетом результатов проведенной валидации в данной работе для расчетов концентрации взвеси использовались формулы из работы [2], а по формулам из статьи [3] определялся средний радиус минеральных и органических частиц и параметр дисперсности γ минеральных частиц.

Результаты и их обсуждение

В табл. 3 приведены параметры взвеси в разных районах Средиземного моря. Пространственная изменчивость характеристик взвеси обусловлена его географическими и гидрологическими особенностями. Они состоят в следующем [6].

Т а б л и ц а 3

Характеристики взвеси в поверхностных водах Средиземного моря

Значение	$C_{\text{общ}}$, мг/л	$C_{\text{мин}} / C_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$, млн. шт/л	$N_{\text{мин}} / N_{\text{общ}}$	γ	$\langle r_{\text{орг}} \rangle$, мкм	$\langle r_{\text{мин}} \rangle$, мкм
Море Альборан							
max	0,21	0,088	79,6	0,932	4,25	3,49	0,027
min	0,46	0,152	132,8	0,961	4,69	3,91	0,029
среднее	0,35	0,124	102,3	0,950	4,44	3,73	0,028
Балеарское море (южная часть)							
max	0,35	0,081	80,9	0,919	4,05	3,50	0,028
min	0,42	0,168	132,3	0,964	4,52	3,87	0,030
среднее	0,38	0,126	110,5	0,946	4,32	3,68	0,029
Тунисский пролив							
max	0,32	0,155	124,2	0,963	4,11	3,62	0,029
min	0,32	0,155	124,2	0,963	4,11	3,62	0,029
среднее	0,32	0,155	124,2	0,963	4,11	3,62	0,029
Ионическое море							
max	0,24	0,079	69,2	0,934	4,18	3,73	0,028
min	0,37	0,118	86,3	0,951	4,58	4,25	0,029
среднее	0,29	0,096	77,4	0,944	4,40	4,03	0,028
Море Леванта							
max	0,19	0,061	62,5	0,908	4,54	3,69	0,027
min	0,37	0,156	96,8	0,966	4,85	4,15	0,028
среднее	0,26	0,109	74,7	0,945	4,65	3,93	0,028
Эгейское море (центральная часть)							
max	0,34	0,099	92,3	0,944	4,44	3,78	0,028
min	0,40	0,116	121,2	0,951	4,66	3,94	0,028
среднее	0,36	0,106	103,6	0,948	4,55	3,88	0,028
Эгейское море (около пролива Дарданеллы)							
max	0,90	0,178	406,1	0,970	4,52	3,58	0,028
min	0,90	0,178	406,1	0,970	4,52	3,58	0,028
среднее	0,90	0,178	406,1	0,970	4,52	3,58	0,028

П р и м е ч а н и е: $C_{\text{общ}}$ – суммарная концентрация взвеси, $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}}$ – относительная концентрация минеральной взвеси, $N_{\text{общ}}$ – общая численность частиц, $N_{\text{мин}}/N_{\text{общ}}$ – относительная численность минеральных частиц, γ – параметр дисперсности минеральных частиц, $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ – средний радиус органических частиц, $\langle r_{\text{мин}} \rangle$ – средний радиус минеральных частиц.

Средиземное море является частью Атлантического океана, расположенной между Евразией и Африкой. Крупными полуостровами и островами оно разделяется на обособленные бассейны, называемые морями. В его западной части (от Гибралтарского пролива до о. Сицилия) находятся моря: Альборан, Балеарское, Лигурийское, Тирренское; в восточной (от о. Сицилия до пролива Дарданеллы) – Адриатическое, Ионическое, Леванта, Эгейское.

Из-за превышения испарения с поверхности моря над выпадающими в него осадками и притоком речных вод уровень Средиземного моря ниже, чем прилегающей части Атлантического океана. Вследствие этого из поверхностных слоев Атлантического океана идет постоянный приток вод в Средиземное море. Североатлантические поверхностные воды, входящие в него через Гибралтарский пролив, движутся вдоль берегов Северной Африки и постепенно растекаются по поверхности моря, поступая в отдельные его бассейны. Остатки североатлантических поверхностных вод, сильно измененные под действием испарения, достигают юго-восточной части бассейна, так называемого моря Леванта, где в зимние месяцы погружаются, образуя средиземноморскую глубинную воду повышенной солености, которая затем через Гибралтарский пролив возвращается в Атлантический океан.

Воды Средиземного моря бедны биогенными элементами. Объясняется это тем, что в него поступают через мелководный (глубины около 300 м) Гибралтарский пролив только североатлантические поверхностные воды, которые уже сильно истощены. Содержание биогенных элементов в этих водах уменьшается по мере их продвижения на восток вследствие потребления биогенов фитопланктоном. Накоплению биогенных элементов в глубинных водах Средиземного моря препятствует непрерывный отток этих вод обратно в Атлантический океан через Гибралтарский пролив. Вследствие этих факторов биологическая продуктивность морских вод и соответственно концентрация фитопланктона в них в целом не высоки, что проявляется главным образом в высокой прозрачности вод.

Низкая концентрация биогенных элементов в поступающих в Средиземное море североатлантических водах и характер циркуляции этих вод в средиземноморском бассейне обуславливают особенности пространственного распределения в море продуктивности вод и, как следствие, их прозрачности. Они проявляются в понижении продуктивности (повышении прозрачности) вод при их продвижении от Гибралтарского пролива в восточные районы моря. В юго-восточной части бассейна (море Леванта), где в водах наиболее низка концентрация биогенных веществ, прозрачность воды по глубине видимости белого диска может достигать 50 м [7].

При анализе распределения взвеси следует отметить, что места отбора проб, показанные на карте (рисунок), находились, согласно работе [6], в североатлантических водах, распространяющихся от Гибралтарского пролива в юго-восточную часть Средиземного моря. В Эгейское море североатлантические воды не доходят.

Как видно из табл. 3, в согласии с вышесказанным, при движении от моря Альборан к морю Леванта происходит снижение общей концентрации взвеси в воде. При этом изменяются характеристики фракционного состава взвеси: уменьшается относительное содержание минеральной фракции, увеличивается средний радиус органических частиц, снижается средний радиус минеральных частиц.

Наблюдавшееся увеличение размера органических частиц при уменьшении концентрации взвеси (при этом происходит также уменьшение концентрации органических частиц) не является случайным, а согласуется с известным в морской биологии эффектом: в олиготрофных (слабопродуктивных) водах размер клеток фитопланктона больше по сравнению с эвтрофными (высокопродуктивными) водами.

Минеральная фракция в массовом выражении составляет небольшую часть общего содержания взвеси в водах Средиземного моря. По всем районам, кроме района Эгейского моря около пролива Дарданеллы, ее доля варьирует в пределах $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}} = 0,096 - 0,155$. В численном выражении концентрация минеральных частиц в среднем в 20 раз превышает концентрацию органических. Однако, как видно из табл. 3, размеры минеральных частиц очень малы – они примерно в сто раз меньше, чем размеры органических.

Отметим некоторые особенности в изменении характеристик взвеси в центральной части Эгейского моря (табл. 3). Так, при значительно большей концентрации взвеси в Эгейском море по сравнению с соседствующими с ним морями Ионическим и Леванта (0,36 мг/л – Эгейское; 0,29 мг/л – Ионическое; 0,26 мг/л – Леванта) относительное содержание минеральной фракции в этих морях практически одинаково (0,106 – Эгейское; 0,096 – Ионическое; 0,109 – Леванта). Это следует отнести к региональным особенностям формирования взвеси в водах Эгейского моря.

Существенное повышение доли минеральной фракции в общей взвеси в Эгейском море около пролива Дарданеллы ($C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}} = 0,178$) обусловлено влиянием вод Мраморного моря, поступающих в Эгейское через данный пролив. В связи с этим следует сказать, что состав взвеси в поверхностных водах Мраморного моря в значительной мере определяется составом взвеси в поверхностных водах Черного моря, поступающих в Мраморное через пролив Босфор. В статье [5] по измерениям индикатрис рассеяния света в глубоководной области Черного моря доля минеральной фракции в поверхностных водах составляла $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}} = 0,15 - 0,25$, а в водах северо-западного шельфа $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}} = 0,25 - 0,35$. Такие высокие значения $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}}$ в водах Черного моря обусловлены большим количеством минеральной взвеси, поступающей на северо-западный шельф моря с водами Дуная, Днепра, Днестра. Эти воды захватываются Основным Черноморским течением и кратчайшим путем поступают в пролив Босфор [8].

Т а б л и ц а 4

**Характеристики взвеси в море Леванта
в области Родосского антициклона (36° с.ш.; 29° в.д.)
и в Индийском океане в зоне южной тропической конвергенции (20° ю.ш.; 77° в.д.)**

Район	Глубина, м	$C_{\text{общ}}$, мг/л	$C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}}$	$\langle r_{\text{орг}} \rangle$, МКМ	γ	$\langle r_{\text{мин}} \rangle$, МКМ
Море Леванта (Родосский антициклон)	0	0,19	0,13	3,79	4,68	0,027
Индийский океан (зона конвергенции)	0	0,39	0,23	3,90	4,20	0,029

В заключение приводим для сравнения (табл. 4) характеристики взвеси в море Леванта в области Родосского антициклона и в водах Индийского океана в зоне южной тропической конвергенции, рассчитанные в работе [3] также по измерениям индикатрис рассеяния света. Сравнение таких вод представляет интерес, так как и те и другие находятся в зонах опускания.

В зоне опускания вод в Индийском океане по сравнению с зоной опускания в море Леванта концентрация взвеси выше. В то же время в сравниваемых водах (табл. 4) между параметрами взвеси наблюдается соотношение, отмеченное для вод Средиземного моря (табл. 3): при более высокой общей концентрации взвеси $C_{\text{общ}}$ относительное содержание в ней минеральной фракции $C_{\text{мин}}/C_{\text{общ}}$ и средний радиус минеральных частиц $\langle r_{\text{мин}} \rangle$ – больше, а параметр дисперсности γ минеральной фракции – меньше. Средний радиус органических частиц $\langle r_{\text{орг}} \rangle$ в сравниваемых водах практически одинаков.

Заключение

1. Определены характеристики структуры взвеси в водах Средиземного моря с использованием методов обращения индикатрис рассеяния света.

2. Показана связь пространственной изменчивости параметров взвеси с гидрологическими особенностями бассейна. При движении от моря Альборан к морю Леванта происходит снижение общей концентрации взвеси в воде. При этом изменяются характеристики ее состава: уменьшается относительное содержание минеральной фракции, увеличивается средний радиус органических частиц, снижается средний радиус минеральных частиц.

3. Проведено сравнение параметров взвеси в зонах опускания вод: в Средиземном море – в области Родосского антициклона в море Леванта, в Индийском океане – в зоне южной тропической конвергенции. В сравниваемых водах между параметрами взвеси наблюдается соотношение, характерное в целом для вод Средиземного моря: при более высокой общей концентрации относительное содержание минеральной фракции и средний радиус минеральных частиц – больше, параметр дисперсности – меньше, а средний радиус органических частиц – практически одинаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – С. 207 – 264.
2. *Копелевич О.В., Маштаков Ю.А., Буренков В.И.* Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды // *Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане.* – М.: Наука, 1975. – С. 54 – 60.
3. *Ощепков С.Л., Сорокина Е.А.* Методика экспрессного восстановления дисперсности и концентрации морской взвеси из измерений индикатрис рассеяния // *Океанология.* – 1988. – 28, вып. 1. – С. 157 – 161.
4. *Маньковский В.И.* Морской импульсный нефелометр // *Приборы для научных исследований и системы автоматизации в АН УССР.* – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 87 – 89.

5. *Маньковский В.И., Соловьев М.В.* Индикатрисы рассеяния света и рассчитанный по ним состав взвеси в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 1. – С. 63 – 76.
6. *Океанографическая энциклопедия. Средиземное море* / Под ред. Р.У. Фейрбриджа. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – С. 489 – 495.
7. *Mankovsky V.I., Mishonov A.V., Vladimirov V.L. et al.* Optical studies by the Eastern Mediterranean available data and some results // The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems / Eds. P. Malanotte-Rizzoli, V.N. Eremeev. – Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999. – P. 127 – 139.
8. *Практическая экология морских регионов. Черное море* // Под ред. В.П. Кеонджяна, А.М. Кудина, Ю.В. Терехина. – Киев: Наукова думка, 1990. – С. 11 – 33.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: emankovskaya@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 24.12.12
После доработки 12.02.13

АНОТАЦІЯ За вимірюваннями індикатрис розсіювання світла, виконаними в Середземному морі в травні 1998 р., розраховані характеристики зваженої речовини в поверхневих водах моря: масова та числова концентрації суспензії різних фракцій, середній розмір часток органічної та мінеральної фракцій, параметр дисперсності мінеральної суспензії. Показаний зв'язок просторової мінливості параметрів суспензії з гідрологічними особливостями басейну. Проведено порівняння параметрів суспензії в Середземному морі в зоні Родоського антициклону (море Леванту) та в Індійському океані в зоні південної тропічної конвергенції.

Ключові слова: індикатриса розсіювання світла, суспензія, обернені задачі.

ABSTRACT Based on the measurements of light diffusion indicatrixes performed in the Mediterranean Sea in May, 1998, calculated are the characteristics of suspended matter in surface waters: mass and numerical concentrations of suspension of different fractions, average size of organic and mineral fractions' particles, and a parameter of mineral suspension dispersivity. Relationship between spatial changeability of suspended matter parameters and hydrological features of the basin is shown. The suspended matter parameters in the Mediterranean Sea in the Rhodes anticyclone region (the Levant Sea) are compared with those in the Indian Ocean in the south tropical convergence zone.

Keywords: light diffusion indicatrix, suspension, inverse problems.