

Спектральные характеристики показателя ослабления света в тропических водах Атлантического океана

© 2016 В.И. Маньковский, Е.В. Маньковская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

E-mail: emankovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2016 г. После доработки 01.11.16 г.

Приводятся результаты измерений спектрального распределения показателя ослабления направленного света $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностных водах тропических районов северной части Атлантического океана. Представлены спектры $\varepsilon(\lambda)$ в водах основных течений. Для массива спектров показателя ослабления света получена система ортогональных функций. Показана возможность восстановления спектров при измерении показателя ослабления на одной длине волны. Установлены связи спектральных показателей ослабления с концентрацией хлорофилла.

Ключевые слова: показатель ослабления света, спектральные характеристики, восстановление спектров, концентрация хлорофилла.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-1-43-55

Введение

Исследованиям показателя ослабления направленного света $\varepsilon(\lambda)$ в тропической области Атлантического океана посвящен ряд работ, однако в большинстве из них показатель ослабления рассматривается в каком-либо одном участке спектра. Спектральная изменчивость показателя ослабления $\varepsilon(\lambda)$ в широком диапазоне длин волн менее исследована. Как пример можно указать работы [1, 2]. В первой из них приведены результаты измерения спектрального распределения показателя ослабления в диапазоне длин волн $\lambda = 473\div 649$ нм в водах Саргассова моря [1], во второй показана форма спектров в диапазоне $\lambda = 400\div 675$ нм в некоторых течениях северной тропической области Атлантики (СТА) [2].

Восполнить этот пробел позволяют данные, полученные в 27-м рейсе НИС «Академик Вернадский» (январь – апрель 1984 г.). На рис. 1 показан его маршрут. В этом рейсе были выполнены многочисленные измерения спектров $\varepsilon(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 440\div 675$ нм в поверхностных водах СТА с целью получить на обширных акваториях океана в различных океанографических условиях данные о структуре спектральной функции $\varepsilon(\lambda)$, а также исследовать возможности восстановления спектров $\varepsilon(\lambda)$ по измерениям на одной длине волны (автомодельность спектров) и возможности использования показателей ослабления для определения оптическим методом концентрации хлорофилла.

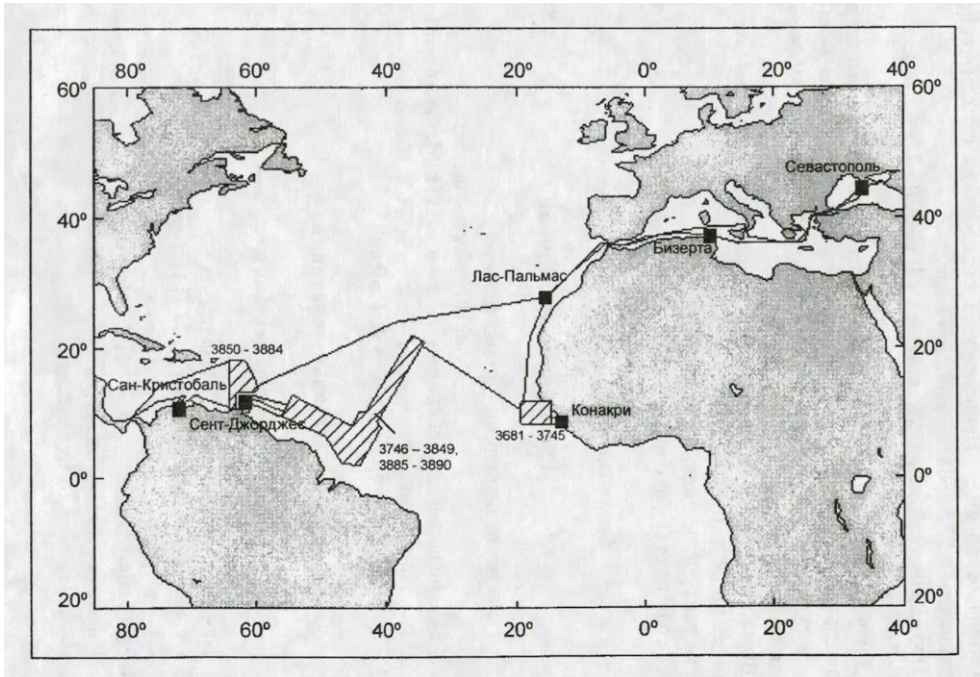


Рис. 1. Маршрут 27-го рейса НИС «Академик Вернадский»

Аппаратура и методика измерений

Измерения показателя ослабления $\epsilon(\lambda)$ проводились в пробах воды с помощью лабораторного прозрачномера [3] в 12 спектральных участках (440, 450, 461, 474, 500, 517, 527, 551, 582, 607, 622, 675 нм), выделявшихся с помощью интерференционных светофильтров. Среднеквадратическая ошибка измерений составляет $0,023 \text{ м}^{-1}$.

Пробы воды отбирались насосом из сквозной шахты, имеющейся в центральной части корпуса судна, с глубины 6 м (нижний урез шахты). Отбор проб производился как на станциях, так и на ходу судна.

Отрядом биологов из Института биологии южных морей АН Украины определялась концентрация хлорофилла (C_{chl}) в пробах.

Характеристики спектров

Весь массив, содержащий 172 спектра, разбит на три группы по показателю ослабления света на длине волны 500 нм: 1-я группа (94 спектра) – $\epsilon(500) \leq 0,15 \text{ м}^{-1}$; 2-я группа (54 спектра) – $0,15 < \epsilon(500) \leq 0,30 \text{ м}^{-1}$; 3-я группа (24 спектра) – $0,30 < \epsilon(500) \leq 0,45 \text{ м}^{-1}$. Средняя концентрация хлорофилла по группам составила: 0,03; 0,05; 0,31 мг/м^3 , то есть 1-я и 2-я группы спектров относятся к водам олиготрофного типа (океанические воды), 3-я группа – к мезотрофным водам (прибрежные воды). На рис. 2 показаны средние спектры в каждой группе.

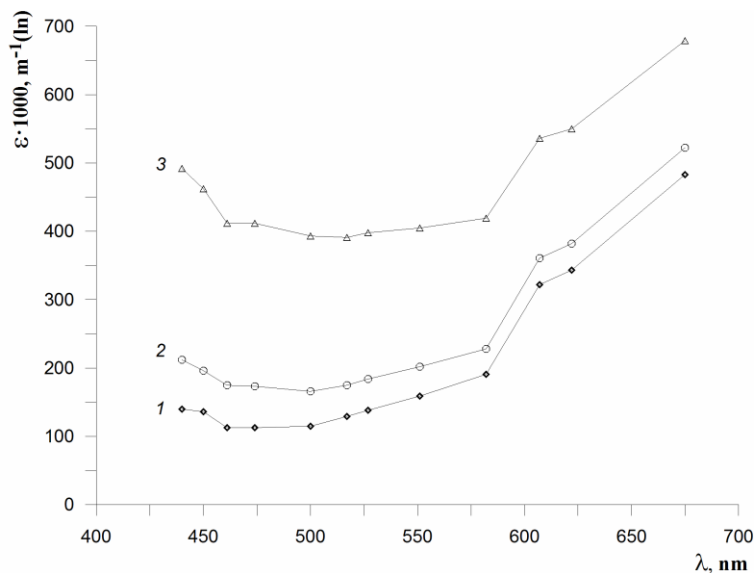


Рис. 2. Средние спектры для трех групп: 1 (◆) – 1-я группа спектров, 2 (○) – 2-я группа спектров, 3 (Δ) – 3-я группа спектров

Из всего массива выбраны спектры, измеренные в водах крупномасштабных течений СТА, а также в прибрежных водах. Эти спектры представлены на рис. 3, их характеристики приведены в табл. 1.

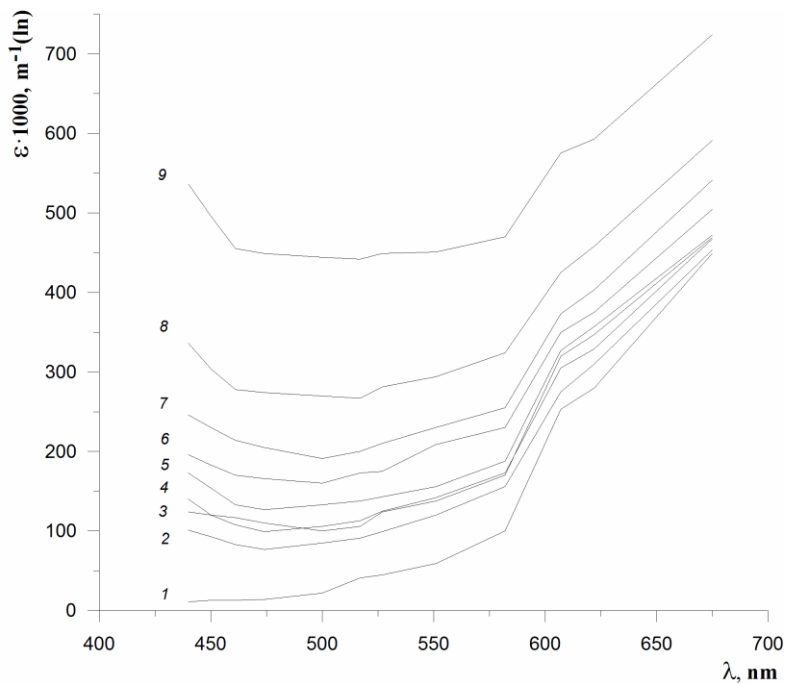


Рис. 3. Спектры показателя ослабления света в водах крупномасштабных течений и в прибрежных водах тропической Атлантики: 1 – 9 – номер спектра в табл. 1

**Характеристики спектров, представленных на рис. 3,
и концентрация хлорофилла в отобранных пробах**

№ спектра	Место отбора проб	Географические координаты	Показатель ослабления света $\epsilon(500)$, м^{-1}	Концентрация хлорофилла C_{chl} , мг/м^3
1	Работа [4] (чистая вода)	–	0,022	0,00
2	Саргассово море	19° 02' с. ш. 46° 02' з. д.	0,085	0,01
3	Межпассатное противотечение	06° 34' с. ш. 45° 00' з. д.	0,105	0,02
4	Канарское течение	27° 31' с. ш. 17° 50' з. д.	0,100	–
5	Гвианское течение	04° 00' с. ш. 46° 34' з. д.	0,133	0,05
6	Северное пассатное течение	11° 20' с. ш. 41° 12' з. д.	0,160	0,07
7	Карибское море	13° 59' с. ш. 70° 54' з. д.	0,191	–
8	Прибрежные африканские воды	10° 00' с. ш. 16° 45' з. д.	0,270	0,20
9	Прибрежные африканские воды	10° 24' с. ш. 15° 45' з. д.	0,444	0,57

Форма спектров во всех водах характеризуется наличием минимума показателя ослабления в средней части, от него в сторону коротких и – особенно сильно – в сторону длинных волн значения $\epsilon(\lambda)$ увеличиваются.

В области длинных волн во всех спектрах большой вклад в показатель ослабления вносит чистая вода. На рис. 3 показан спектр показателя ослабления для чистой воды

$$\epsilon(\lambda)_w = \kappa(\lambda)_w + \sigma(\lambda)_{mv},$$

где $\kappa(\lambda)_w$ – показатель поглощения чистой воды [4]; $\sigma(\lambda)_{mv}$ – показатель молекулярного рассеяния чистой морской воды [5, с. 157].

В табл. 2 представлен вклад показателя ослабления чистой морской воды в показатели ослабления для спектров вод, показанных на рис. 3.

**Вклад P показателя ослабления чистой морской воды в показатели
ослабления ε в водах тропической Атлантики**

Длина волны λ , нм	Номер спектра в табл. 1							
	2		6		8		9	
	ε , M^{-1}	P , %	ε , M^{-1}	P , %	ε , M^{-1}	P , %	ε , M^{-1}	P , %
582	0,156	64	0,230	43	0,324	31	0,470	21
622	0,310	90	0,375	75	0,458	61	0,593	41
675	0,453	99	0,504	89	0,521	76	0,724	63

Как видно из рис. 3, при возрастании показателей ослабления форма спектров изменяется – это происходит вследствие более быстрого роста $\varepsilon(\lambda)$ в коротковолновой области, чем в длинноволновой. Так, для спектра 9 прирост показателя ослабления относительно спектра 2 составил: на длине волны 440 нм – 0,435 M^{-1} , на длине волны 675 нм – 0,271 M^{-1} .

При этом происходит смещение минимума показателя ослабления в сторону более длинных волн: спектр 2 – $\lambda(\varepsilon_{\min}) = 474$ нм, спектр 9 – $\lambda(\varepsilon_{\min}) = 517$ нм. С положением минимума связан цвет воды, и в данном случае для спектра 2 он характеризуется как синий, для спектра 9 – как зеленый.

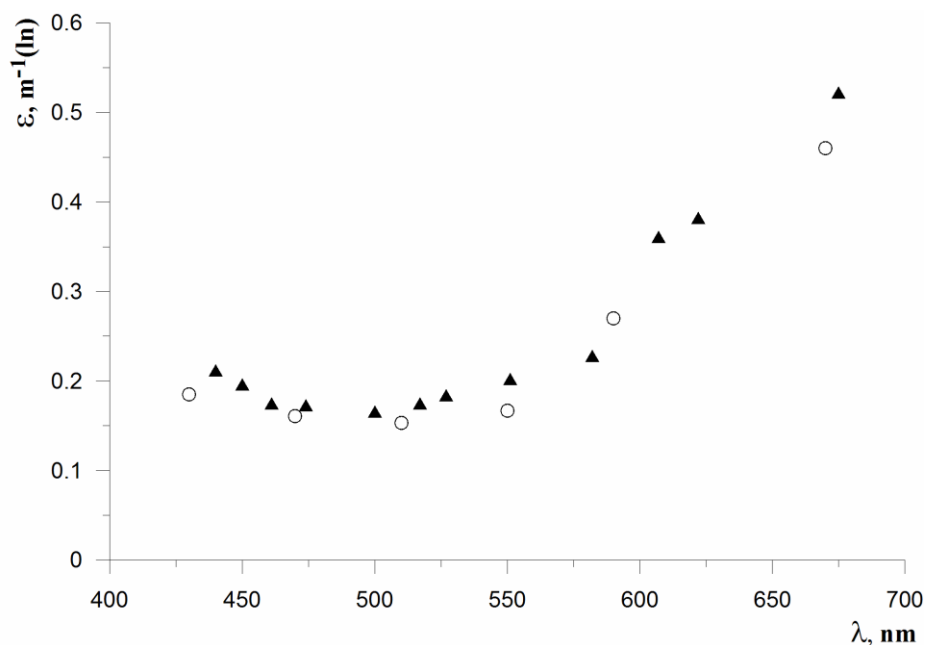


Рис. 4. Средние спектры в олиготрофных водах тропической Атлантики (▲) и Тихого океана (○)

Деформация спектров при возрастании показателей ослабления связана с увеличением в воде содержания растворенного органического вещества (РОВ), образующегося в результате разложения планктонных организмов, от концентрации которых зависит прозрачность воды. РОВ наиболее сильно

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ № 1 2017 47

ослабляет свет в коротковолновой части спектра, его влияние слабо сказывается в длинноволновой области [6].

Проведено сравнение спектральных характеристик показателя ослабления в водах СТА и в водах Тихого океана из работы [7], из которой взят средний спектр (59 проб) в океанических водах с глубинами менее 100 м при средней концентрации хлорофилла $0,027 \text{ мг/м}^3$. Для вод СТА взят средний спектр для 2-й группы. Результат сравнения показан на рис. 4.

Характер спектрального распределения показателя ослабления в обоих случаях одинаков. Несколько большая величина спектральных показателей в водах СТА согласуется с большей концентрацией в них хлорофилла – $0,050 \text{ мг/м}^3$ в СТА, $0,027 \text{ мг/м}^3$ в Тихом океане.

Анализ спектров методом ортогональных векторов

В каждой группе спектров рассчитаны корреляционные матрицы $R[\varepsilon(\lambda_i), \varepsilon(\lambda_j)]$ и проведено разложение эмпирических функций $\varepsilon(\lambda)$ на собственные ортогональные векторы:

$$\varepsilon(\lambda_i) = \langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle + \sum_{k=1}^n C_k \Psi_k(\lambda_i),$$

где $\langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle$ – средние значения спектрального показателя ослабления; $\Psi_k(\lambda_i)$ – собственные векторы корреляционной матрицы; C_k – коэффициенты разложения, собственные числа; $i = 1, \dots, n$ – число векторов (в нашем случае $n = 12$, число спектральных каналов).

Корреляционные матрицы для разных типов спектров показывают, что по мере возрастания показателя ослабления коэффициент корреляции между значениями $\varepsilon(\lambda)$ в различных участках спектра увеличивается и в наиболее мутных водах (3-я группа) вариации $\varepsilon(\lambda)$ во всем рассматриваемом диапазоне длин волн очень тесно взаимосвязаны.

Такая же закономерность поведения $R[\varepsilon(\lambda_i), \varepsilon(\lambda_j)]$ отмечена автором работы [8] по измерениям $\varepsilon(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 390\div 590 \text{ нм}$ в Индийском океане. Так, значения $R[\varepsilon(440), \varepsilon(590)]$ для 1-й, 2-й и 3-й выборок составляют соответственно 0,59; 0,75; 0,97 [8]. Для рассматриваемых в данном исследовании 1-й, 2-й и 3-й групп спектров, диапазон изменения $\varepsilon(\lambda)$ в которых примерно соответствует выборкам в работе [8], значения $R[\varepsilon(440), \varepsilon(590)]$ примерно такие же: 0,61; 0,70; 0,95. То есть закономерность изменчивости показателя ослабления в водах Мирового океана одинакова.

В результате разложения функций $\varepsilon(\lambda)$ на собственные ортогональные векторы получено, что относительная дисперсия функций, описываемая первым собственным вектором, составляет для вод в 1-й, 2-й, 3-й группах 0,78; 0,83; 0,98, для суммы двух первых собственных векторов – 0,80; 0,91; 0,99 соответственно.

Высокая величина относительной дисперсии $\varepsilon(\lambda)$, описываемой первым вектором разложения, указывает на то, что вариации $\varepsilon(\lambda)$ в целом по спектру зависят главным образом от одного фактора, которым, как известно, в усло-

виях открытого океана является биологическая взвесь. Это подтверждается в нашем случае высоким коэффициентом корреляции концентрации хлорофилла с коэффициентом разложения при первом собственном векторе, составившим по всему массиву $R^2 = 0,87 \pm 0,02$.

Высокий уровень относительной дисперсии, описываемой первым вектором, дает возможность восстанавливать спектральное распределение $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностных тропических водах Атлантического океана по измерениям показателя ослабления в одном участке спектра. В табл. 3 приведены необходимые для этого средние значения спектрального показателя ослабления $\langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle$ и первых двух ортогональных векторов $\Psi_1(\lambda_i), \Psi_2(\lambda_i)$.

Оптимальная длина волны, которую следует использовать для восстановления спектров с помощью первого вектора, находится в области нулевых значений второго ортогонального вектора. По данным табл. 3, для 1-й группы спектров – это диапазон длин волн $\lambda = 500 \div 517$ нм, для 2-й группы – $\lambda = 474 \div 500$ нм, для 3-й группы – $\lambda = 461 \div 474$ нм.

Т а б л и ц а 3

Средние значения показателя ослабления $\langle \varepsilon \rangle$ и двух первых ортогональных векторов Ψ_1, Ψ_2 для трех групп спектров

Длина волны λ , нм	1-я группа спектров $\varepsilon(500) \leq 0,15 \text{ м}^{-1}$			2-я группа спектров $0,15 < \varepsilon(500) \leq 0,30 \text{ м}^{-1}$			3-я группа спектров $0,30 < \varepsilon(500) \leq 0,45 \text{ м}^{-1}$		
	$\langle \varepsilon \rangle, \text{ м}^{-1}$	Ψ_1	Ψ_2	$\langle \varepsilon \rangle, \text{ м}^{-1}$	Ψ_1	Ψ_2	$\langle \varepsilon \rangle, \text{ м}^{-1}$	Ψ_1	Ψ_2
440	0,140	0,283	0,329	0,212	0,297	-0,342	0,492	0,306	-0,228
450	0,136	0,301	0,272	0,196	0,294	-0,199	0,462	0,287	-0,140
461	0,113	0,251	0,197	0,175	0,289	-0,105	0,412	0,265	-0,037
474	0,113	0,268	0,087	0,173	0,264	-0,159	0,412	0,273	0,014
500	0,115	0,234	0,033	0,166	0,266	0,078	0,393	0,259	0,124
517	0,129	0,228	-0,151	0,175	0,262	0,239	0,391	0,244	0,205
527	0,138	0,234	-0,123	0,184	0,253	0,190	0,398	0,244	0,197
551	0,159	0,238	-0,153	0,202	0,256	0,193	0,405	0,235	0,222
582	0,191	0,257	-0,350	0,228	0,222	0,300	0,419	0,205	0,315
607	0,322	0,237	-0,405	0,361	0,208	0,346	0,536	0,198	0,287
622	0,343	0,250	-0,314	0,382	0,190	0,336	0,550	0,187	0,289
675	0,483	0,245	-0,300	0,522	0,218	0,226	0,679	0,174	0,317

На рис. 5 показаны примеры восстановления спектров по измерениям показателя ослабления на длине волны 500 нм. Значения величины $\varepsilon(\lambda_i)$ рассчитывались по формуле

$$\varepsilon(\lambda_i) = \langle \varepsilon(\lambda_i) \rangle + C_1 \Psi_1(\lambda_i).$$

Коэффициент C_1 определялся из условия

$$\varepsilon(500) = \langle \varepsilon(500) \rangle + C_1 \Psi_1(500),$$

где $\varepsilon(500)$ – измеренный показатель ослабления на длине волны 500 нм; $\langle \varepsilon(500) \rangle$ – среднее значение показателя ослабления для данного массива спектров; $\Psi_1(500)$ – значение первого ортогонального вектора.

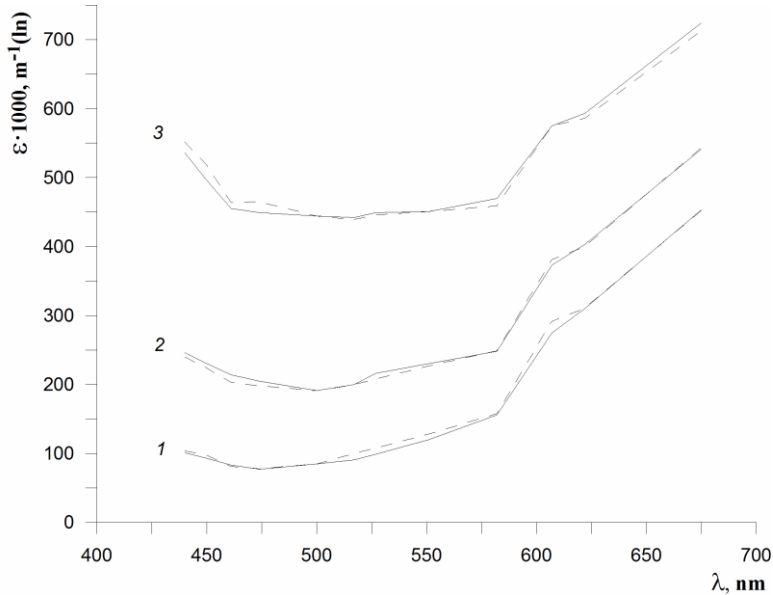


Рис. 5. Примеры восстановления спектров с помощью первого ортогонального вектора по измерениям показателя ослабления на длине волны 500 нм: измеренные спектры (—), восстановленные спектры (- - -); 1,2,3 – группы спектров

Оценка ошибок представления функций $\varepsilon(\lambda)$ собственными векторами проводилась по формуле

$$S_m = [1/n \cdot \delta^2(n-m) \sum_n D(\lambda)]^{0,5},$$

где n – число всех векторов в анализе; m – число векторов, используемых для восстановления $\varepsilon(\lambda)$; $D(\lambda)$ – стандартное отклонение функции $\varepsilon(\lambda)$; $\delta(n-m)$ – относительная дисперсия собственных векторов, не используемых для восстановления.

Т а б л и ц а 4

Показатели отклонения спектров $\varepsilon_{\text{вос}}$, восстановленных с помощью первого ортогонального вектора, от измеренных спектров $\varepsilon_{\text{изм}}$

Группа спектров	Средне-квадратичное отклонение $\sigma_{\text{вос}}, \text{M}^{-1}$	Максимальное отклонение $\varepsilon_{\text{вос}} - \varepsilon_{\text{изм}}, \text{M}^{-1}$	Максимальное относительное отклонение $\varepsilon_{\text{вос}} / \varepsilon_{\text{изм}}, \%$
1-я	0,006	0,017	1,06
2-я	0,005	-0,011	0,95
3-я	0,011	0,022	1,04

Для 1-й, 2-й, 3-й групп спектров значение S_m для $m = 1$ составило соответственно 0,012; 0,014; 0,023 m^{-1} .

В табл. 4 приведены показатели отклонения восстановленных спектров от измеренных. Среднеквадратические ошибки отклонения составили для 1-й, 2-й, 3-й групп 0,006; 0,005; 0,011 m^{-1} соответственно, и, как видно, они не превышают теоретические значения.

Связь спектральных показателей ослабления с концентрацией хлорофилла

Для приведенных на рис. 3 спектров в табл. 1 указана концентрация хлорофилла в воде C_{chl} . Видна количественная связь между величинами $\epsilon(500)$ и C_{chl} .

Анализ данных показал, что связь между этими величинами нелинейная и в линейном виде может быть представлена в двойном логарифмическом масштабе:

$$\lg C_{chl} = A \lg \epsilon(\lambda) + B.$$

При расчете коэффициентов регрессии данные были разбиты на два массива: океанические и прибрежные воды. Это было сделано потому, что соотношение $C_{chl} = f[\epsilon(\lambda)]$ в океанических и прибрежных водах отличаются (рис. 6).

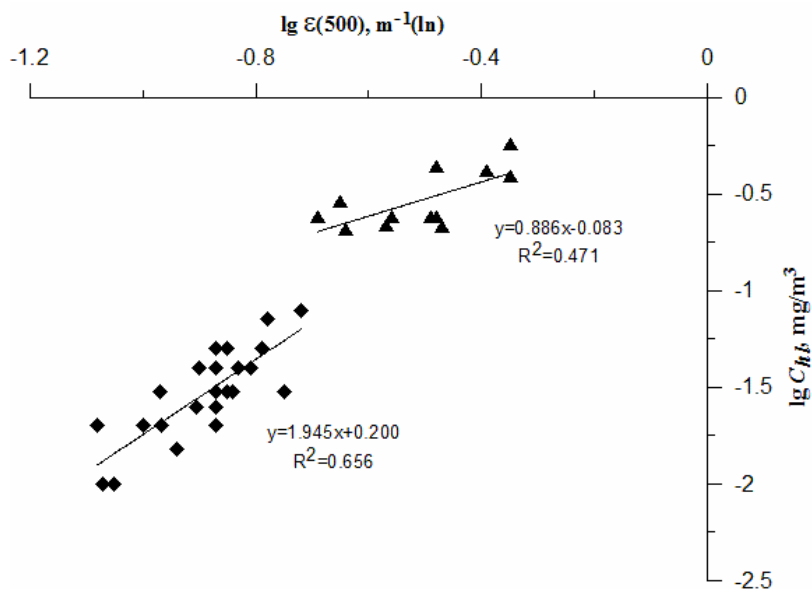


Рис. 6. Связь концентрации хлорофилла с показателем ослабления света на длине волны 500 нм в океанических (◆) и прибрежных (▲) водах

В табл. 5 приведены результаты расчета для океанических вод коэффициентов регрессии концентрации хлорофилла (диапазон изменчивости

$C_{chl} = 0,01 \div 0,08$ мг/м³) со спектральными показателями ослабления в трех участках спектра: 440, 500, 551 нм.

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты связи $\lg C_{chl} = A \lg \varepsilon(\lambda) + B$ в океанических водах, коэффициент корреляции R , его ошибка δR и ошибка определения концентрации хлорофилла $S(C_{chl})$

Длина волны λ , нм	Коэффициенты связи		R (δR)	$S(C_{chl})$, мг/м ³
	A	B		
440	1,99	0,05	0,81 (0,08)	0,008
500	1,94	0,20	0,81 (0,08)	0,008
551	2,51	0,42	0,85 (0,07)	0,007

Корреляция концентрации хлорофилла с показателем ослабления света отражает связь с показателем ослабления концентрации органической взвеси. Органическая взвесь в поверхностных океанических водах вносит подавляющий вклад в изменчивость показателя ослабления, составляющий, по данным работы [7], 76 – 97 % в спектральной области 430 – 670 нм.

Разные соотношения в уравнениях связи хлорофилла с показателем ослабления в океанических и прибрежных водах, наблюдавшиеся в нашем случае (рис. 6), связаны с изменением внутриклеточной концентрации хлорофилла в водорослях, зависящей от ряда факторов: видового состава, световых условий обитания, температуры воды, содержания биогенных веществ. В работе [9] установлено, что при одинаковых условиях концентрация хлорофилла в клетках диатомовых и пиррофитовых водорослей может отличаться в два раза. В работе [10] приводятся графики соотношения хлорофилла и взвешенного органического вещества (ВОВ) в водах Черного моря в разные сезоны года. Весной концентрация ВОВ примерно в два раза выше, чем зимой, при той же концентрации хлорофилла в воде.

То есть связи концентрации хлорофилла с показателем ослабления носят региональный характер и в данном районе могут изменяться во времени в связи с изменением условий обитания водорослей.

С учетом этого установленные в данной работе связи хлорофилла с показателем ослабления в океанических водах СТА следует характеризовать как региональные. Гидрологические условия в тропических водах на протяжении года изменяются незначительно, и данные связи, предположительно, можно принять неизменными во времени.

Формулы связи $C_{chl} = f[\varepsilon(\lambda)]$, полученные для вод СТА, были применены к другим океаническим водам. Из работы [7] взят средний спектр $\varepsilon(\lambda)$ для олиготрофных океанических вод Тихого океана при средней концентрации хлорофилла $C_{chl} = 0,027$ мг/м³. В табл. 6 приведены рассчитанные по формулам из табл. 5 значения концентрации хлорофилла в водах СТА (2-я группа спектров, $C_{chl} = 0,050$ мг/м³) и Тихого океана.

Значения концентрации хлорофилла C_{chl} , рассчитанные по формулам табл. 5 для средних спектров в Атлантическом (54 пробы, $\langle C_{chl} \rangle = 0,050$ мг/м³ [7]) и Тихом океанах (59 проб, $\langle C_{chl} \rangle = 0,027$ мг/м³ [7])

Длина волны λ , нм	Атлантический океан		Тихий океан	
	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹	C_{chl} , мг/м ³	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹	C_{chl} , мг/м ³
440	0,212	0,051	0,184	0,039
500	0,166	0,049	0,153	0,041
551	0,202	0,047	0,169	0,030
	$\langle 0,049 \rangle^*$		$\langle 0,037 \rangle^*$	

* $\langle \dots \rangle$ – среднее значение

Рассчитанные по разным формулам концентрации хлорофилла в водах Тихого океана дали среднее значение $C_{chl} = 0,037$ мг/м³, что на 37 % выше, чем указано в работе [7], наиболее близким получился результат для длины волны 551 нм ($C_{chl} = 0,030$ мг/м³). В водах СТА (2-я группа спектров) рассчитанная средняя концентрация хлорофилла $C_{chl} = 0,049$ мг/м³ практически такая же, как по натурным наблюдениям ($C_{chl} = 0,050$ мг/м³).

В работе [11] исследовалась связь показателя ослабления с концентрацией хлорофилла в тропических водах Тихого океана. Район исследования находился в восточной части приэкваториальной области (10° с. ш. – 10° ю. ш.). Для установления связи с хлорофиллом использовался показатель ослабления морской воды на длине волны 660 нм, из которого вычитался показатель ослабления чистой воды $\varepsilon(600)_{pg} = \varepsilon(600)_{measured} - \varepsilon(600)_w$. Расчет уравнения связи выполнен с величинами C_{chl} и $\varepsilon(600)_{pg}$ в натуральном виде без преобразования. Концентрация хлорофилла в исследуемых водах изменялась в пределах значений $C_{chl} = 0,02 \div 0,32$ мг/м³. Все данные, без разделения по концентрации хлорофилла, объединены в один массив, и рассчитано уравнение связи (коэффициент корреляции $R = 0,91$):

$$C_{chl} = 2,6 \varepsilon(600)_{pg} - 0,014.$$

Следует отметить, что в указанной работе на графике (рис. 4С) [11, с. 441] выделяется группа точек для вод с самыми низкими концентрациями хлорофилла $C_{chl} = 0,02 \div 0,07$ мг/м³. То есть, как и в случае с океаническими олиготрофными водами тропической Атлантики, в подобных водах Тихого океана существует свойственная только данному району связь между хлорофиллом и показателем ослабления.

Заключение

По данным измерений спектров показателя ослабления направленного света в поверхностных водах северной части тропической Атлантики получены характеристики спектров (диапазон 440 – 675 нм) и рассмотрено изменение формы спектров в водах СТА при возрастании показателя ослабления. Приведены спектральные распределения показателя ослабления в водах основных крупномасштабных течений СТА и в прибрежных африканских во-

дах. Проведено сравнение средних спектров в олиготрофных водах тропической Атлантики и Тихого океана, которое показало одинаковый характер спектрального распределения показателя ослабления в этих районах.

Для массива эмпирических функций $\varepsilon(\lambda)$ в водах СТА выполнено разложение на собственные ортогональные векторы. Показана возможность восстановления спектров с помощью первого ортогонального вектора, то есть по измерениям показателя ослабления на одной длине волны. Указаны значения оптимальной длины волны, которые следует использовать для восстановления спектров.

Установлена связь концентрации хлорофилла в поверхностных океанических водах СТА с показателями ослабления света в трех участках спектра с длинами волн 440, 500 и 551 нм. В прибрежных водах СТА связь $C_{chl} = f[\varepsilon(\lambda)]$ следует рассматривать отдельно, поскольку она существенно отличается от связи в океанических водах. Установленные в данной работе связи хлорофилла с показателем ослабления в океанических водах СТА следует характеризовать как региональные.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0827-2014-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.М. Прозрачность морской воды // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. – М.: Наука, 1974. – С. 127 – 139.
2. Ли М.Е., Маньковский В.И. Гидрооптические исследования морей и океанов. Тропическая зона Атлантического океана // Развитие наук и технологий в Морском гидрофизическом институте НАН Украины за 75 лет. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004. – С. 280 – 286.
3. Маньковский В.И. Спектральный лабораторный прозрачномер с переменной базой // Системы контроля окружающей среды. – 2012. – Вып. 17. – С. 56 – 60.
4. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380 – 700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36, Issue 33. – P. 8710 – 8723.
5. Копелевич О.В. Факторы, определяющие оптические свойства морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, 1983. С. 150 – 166.
6. Копелевич О.В. Растворенные органические вещества // Там же. – С. 157 – 160.
7. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Там же. – С. 208 – 235.
8. Копелевич О.В. «Восстановление» спектральных величин показателя ослабления света морской водой в области 270 – 590 нм по данным измерений для двух длин волн // Океанология. – 1982. – 22, № 3. – С. 392 – 397.
9. Finenko Z.Z., Hoepffner N., Williams R., Piontkovski S.A. Phytoplankton carbon to chlorophyll a ratio: response to light, temperature and nutrient limitation // Mar. Ecol. J. – 2003. – 2, No. 2. – P. 40 – 64.
10. Кукушкин А.С. Многолетняя и сезонная изменчивость содержания взвешенного органического вещества в верхнем слое в глубоководных районах Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. – С. 242 – 263.
11. Behrenfeld M.J., Boss E. Beam attenuation and chlorophyll concentration as alternative optical indices of phytoplankton biomass // J. Mar. Res. – 2006. – 64, No. 3. – P. 431 – 451. – doi: <https://doi.org/10.1357/002224006778189563>

Spectral characteristics of the beam attenuation coefficient in the Atlantic Ocean tropical area

V.I. Man'kovsky, E.V. Man'kovskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: emankovskaya@mail.ru*

The results of measurements of the spectral beam attenuation coefficient (BAC) $\epsilon(\lambda)$ in the surface waters of the North Atlantic tropical area are represented. The spectra $\epsilon(\lambda)$ are shown for the basic currents' waters. The system of orthogonal functions is obtained for the array of the beam attenuation coefficient spectra. The orthogonal functions' system is obtained for the beam attenuation coefficient spectra array. Possibility of reconstructing the spectra while measuring the beam attenuation coefficient on a certain wavelength is shown. The relations between the spectral beam attenuation coefficients and the chlorophyll concentration are revealed.

Keywords: beam attenuation coefficient, spectral characteristics, reconstruction of spectra, chlorophyll concentration.