

**О ВОЗМОЖНОСТИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ
ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ
ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО
ИЗМЕРЕНИЯМ НА ОДНОЙ ДЛИНЕ
ВОЛНЫ**

В.И. Маньковский, М.В. Соловьев
Морской гидрофизический институт НАН
Украины
г. Севастополь

Введение.

Спектральное распределение показателя ослабления излучения (ПОИ) в воде является важной характеристикой состояния морской среды. Однако измерения спектрального распределения ПОИ довольно сложны, поэтому в морских гидрофизических зондах часто ограничиваются измерением ПОИ на одной, иногда на двух длинах волн, например в зондах ОГХ и ШИК [1,2], используемых в последние годы в экспедиционных исследованиях Морского гидрофизического института. В то же время существует возможность и по таким измерениям восстанавливать спектральное распределение ПОИ. Это можно сделать с помощью системы собственных ортогональных векторов описывающих спектральное распределение ПОИ в данном водоеме. В нашем случае речь будет идти о восстановлении таким методом спектрального распределения ПОИ в поверхностных водах Черного моря.

Аппаратура и методика измерений.

Исходный массив для обработки составили измерения спектрального распределения ПОИ производившиеся в Черном море в период 1991-1998гг. Пробы воды отбирались с поверхности моря. Измерения спектрального распределения ПОИ производились с помощью лабораторного прозрачномера ЛАП [3] на 16-ти длинах волн: 416, 432, 443, 468, 490, 506, 527, 547, 567, 574, 587, 610, 625, 640, 677, 700 нм. Для их выделения в спектре источника излучения использовались интерференционные светофильтры. Ширина полосы пропускания светофильтров на уровне 0,5 от максимума составляет 10нм. Ошибка измерений ПОИ - 0,007 м⁻¹ (Log).

Показатель ослабления излучения ϵ рассчитывался при десятичном основании:

$$\epsilon, \text{ м}^{-1} = 1 / L * \text{Log} (B_L / B_0) \quad (1)$$

где: B_0 и B_L - соответственно: яркость пучка света вошедшего в воду и прошедшего в ней путь длиной L.

Исходные данные.

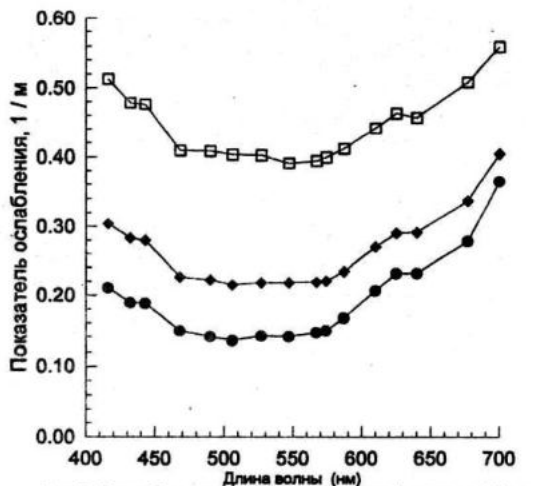
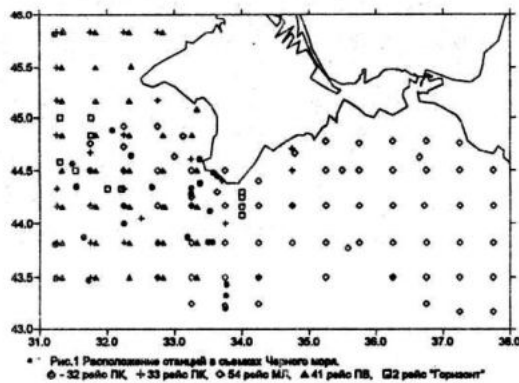
В таблице 1 приведены данные по рейсам о времени проведения измерений, их количестве, пределах изменения ПОИ на длине волны 416нм и глубины видимости белого диска. Расположение точек с отбором проб показано на рис.1. На рис.2 показана средняя спектральная функция ПОИ и вид спектральных функций, наблюдавшихся при минимальном и максимальном значении ПОИ при длине волны 416нм.

Таблица 1. Даты и количество проведенных измерений ПОИ

Рейс НИС	Даты	Колич. . измерений	Пределы изменения	
			ПОС(416нм), м ⁻¹	Z _б , м
54 МЛ	17.11-13.12.91	69	0.27-0.45	7 - 9
41 ПВ	02.04-17.04.93	38	0.21-0.34	9 - 14
32 ПК	02.12-27.12.94	24	0.22-0.47	10 - 15
33 ПК	16.03-06.04.95	34	0.21-0.51	4,5 - 17,5
2 Горизонт	07.05-05.06.98	15	0.26-0.35	9,5 - 12

ИТОГО: 170

Обозначения: МЛ - "Михаил Ломоносов", ПВ - "Профессор Водяницкий", ПК - "Профессор Колесников", Гориз. - "Горизонт".



Результаты статистической обработки и их анализ.

Для всего массива наблюдаемых спектральных функций ПОИ рассчитаны корреляционные матрицы $\Gamma[\epsilon(\lambda_i); \epsilon(\lambda_j)]$ и проведено разложение эмпирических функций $\epsilon(\lambda_i)$ на собственные векторы [4,5].

$$\epsilon(\lambda_i) = \langle \epsilon(\lambda_i) \rangle + \sum_{k=1}^m C_k \psi_k(\lambda_i);$$

$$i=1,2,\dots,n; m = \langle n, \quad (2)$$

где: $\langle \epsilon(\lambda_i) \rangle$ - средние значения величины $\epsilon(\lambda_i)$; $\psi_k(\lambda_i)$ - собственные векторы ее ковариационной матрицы; C_k - коэффициенты

разложения. Основные свойства собственных векторов таковы: они ортогональны, то есть представляют статистически независимые факторы вариаций экспериментальных кривых; первый вектор отображает наибольшую дисперсию экспериментальных кривых и с увеличением номера вектора описываемая им дисперсия быстро убывает.

В таблице 2 представлена корреляционная матрица, показывающая степень взаимной корреляции ПОИ в различных участках видимой области спектра от 416 до 700 нм. В диапазоне длин волн 416-587 нм наблюдается высокая степень взаимной корреляции величин ПОИ: $r=0.989-0.911$. По мере разнесения коррелируемых ПОИ по спектру коэффициент корреляции снижается. Например, коэффициент корреляции $r[\epsilon(416); \epsilon(\lambda_j)]$ при изменении λ_j от 432 нм до 587 нм снижается с 0.955 до 0.926; далее, в длинноволновой области спектра, снижение идет быстрее - с 0.901 на 610 нм до 0.737 на 700 нм.

Уменьшение коэффициента корреляции $r[\epsilon(416); \epsilon(\lambda_j)]$ при увеличении λ_j объясняется разными факторами влияющими на изменчивость ПОИ в коротковолновой и длинноволновой частях спектра. В длинноволновой части спектра практически 100% вклад в дисперсию ПОИ вносит морская зель, а в коротковолновой кроме зельси на изменчивость ПОИ значительно влияют еще растворенные органические вещества, их "желтая субстанция". Показатель поглощения света желтым веществом изменяется с длиной волны по закону:

$$k_{жв}(\lambda) = k_{уд} C_{жв} \exp(-\mu\lambda) \quad (3)$$

где: $k_{уд}$ - удельный показатель поглощения желтым веществом, $C_{жв}$ - концентрация желтого вещества, $\mu=15-17 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$.

Величина $k_{жв}$ быстро уменьшается с длиной волны и в красной области спектра практически не влияет на показатель ослабления. По оценкам [6] при длине волны 430 нм вклад желтого вещества в дисперсию ПОИ для поверхностных океанических вод составлял 16%, при 510 нм он уменьшался до 2%, а при 670 нм был равен нулю.

Результаты разложения функций $\epsilon(\lambda_i)$ на собственные ортогональные векторы представлены в таблице 3.

Таблица 2. Корреляционная матрица.

	416	432	443	468	490	506	527	547	574	610	640	700
416	1	0.955	0.974	0.920	0.942	0.933	0.930	0.934	0.923	0.9011	0.861	0.737
432		1	0.955	0.942	0.954	0.948	0.942	0.951	0.944	0.9193	0.886	0.748.
443			1	0.941	0.962	0.953	0.951	0.952	0.934	0.9199	0.880	0.741
468				1	0.975	0.986	0.976	0.983	0.974	0.9628	0.944	0.799
490					1	0.984	0.986	0.980	0.975	0.9593	0.936	0.796
506						1	0.988	0.989	0.981	0.9715	0.953	0.816
527							1	0.985	0.979	0.9661	0.946	0.812
547								1	0.980	0.9716	0.954	0.809
574									1	0.9712	0.958	0.831
610										1	0.9798	0.888
640											1	0.914
700												1

Таблица 3. Средние значения ПОИ, их среднеквадратические отклонения и значения первых трех ортогональных векторов

Длина волны, нм	Средний спектр, м ⁻¹	СКО, м ⁻¹	1 орт.вектор	2 орт.вектор	3 орт. вектор
416	0,304	0,058	0,298	-0,409	-0,484
432	0,283	0,058	0,302	-0,309	-0,172
443	0,280	0,058	0,305	-0,361	-0,256
468	0,226	0,050	0,267	-0,010	0,309
490	0,222	0,050	0,269	-0,078	0,158
506	0,215	0,048	0,259	0,002	0,194
527	0,218	0,048	0,256	0,002	0,213
547	0,218	0,047	0,254	-0,006	0,189
567	0,219	0,045	0,239	-0,003	0,340
574	0,220	0,044	0,236	0,057	0,141
587	0,234	0,043	0,233	0,084	0,071
610	0,270	0,042	0,224	0,196	-0,013
625	0,290	0,042	0,221	0,196	-0,120
640	0,291	0,040	0,209	0,306	-0,004
677	0,337	0,040	0,207	0,294	-0,035
700	0,404	0,040	0,183	0,578	-0,525

Относительная дисперсия спектрального распределения ПОИ описываемая первым вектором составляет 94,1%, двумя векторами - 96,92%, тремя - 97,92%. Эти данные показывают, что подавляющее влияние на изменчивость ПОИ в поверхностных водах Черного моря имеет один фактор. Из экспериментальных данных и модельных расчетов известно, что таковым фактором является морская взвесь. По оценкам [6] вклад взвеси в дисперсию показателя ослабления в видимой области в поверхностных водах составлял: для открытых океанических районов 84-100%, для прибрежных вод 99-100%.

Подтверждением вышесказанному о влиянии взвеси на изменчивость ПОИ в поверхностных водах Черного моря может служить характер спектрального распределения значений первого ортогонального вектора - они постепенно уменьшаются с увеличением длины волны. Подобная спектральная изменчивость наблюдается у показателя рассеяния морской взвеси, удельный вес которого в ослаблении света может достигать 90% [6]. Спектральную изменчивость показателя рассеяния обычно аппроксимируют формулой

$$\sigma(\lambda_1) / \sigma(\lambda_2) = (\lambda_1 / \lambda_2)^{-n}; \lambda_1 < \lambda_2 \quad (4)$$

Показатель n варьирует в зависимости от состава взвеси таким образом, что при увеличении размеров частиц его величина уменьшается. Согласно литературным данным величина n для морских взвесей варьирует от 0,9 (преобладают крупные частицы) до 1,8 (преобладают мелкие частицы). Аппроксимация по формуле (4) методом наименьших квадратов спектральной изменчивости первого ортогонального вектора дает близкую к указанным данным величину $n=0,88$. Таким образом, первый ортогональный вектор можно рассматривать как фактор отражающий изменчивость показателя ослабления за счет рассеяния излучения морской взвесью.

Средняя по спектру теоретическая ошибка S_m представления m векторами функции $\epsilon(\lambda)$ оценивается формулой:

$$S_m = [1 / \delta^2(n - m) \sum_{i=1}^n D\epsilon(\lambda_i)]^{0,5} \quad (5)$$

где m - число векторов используемых для аппроксимации, $D\epsilon(\lambda_i)$ дисперсия показателя ослабления света в i -м участке спектра, $\delta^2(n - m)$ - суммарная относительная дисперсия собственных векторов не используемых для аппроксимации. Строго говоря, данная формула справедлива в предположении равномерного распределения суммарной дисперсии по спектру. В нашем случае дисперсия изменяется с длиной волны, но эти изменения незначительны и поэтому формулу (5) можно использовать для примерных оценок. Ошибки аппроксимации спектральных функций ПОИ в поверхностных водах Черного моря одним, двумя и тремя собственными векторами составляют: 0.012, 0,008, 0,007 м⁻¹(Log). Такие величины S_m приемлемы для решения многих гидрооптических задач.

Для выбора оптимальных опорных длин волн при восстановлении спектров ПОИ с помощью собственных векторов были рассчитаны факторные нагрузки, представляющие собой коэффициенты корреляции между C_k и $\epsilon(\lambda_i)$. Опорные длины волн целесообразно выбирать в спектральных областях, где коэффициенты корреляции максимальны, то есть изменчивость ПОИ сильнее всего сказывается на колебании собственных векторов. Для первого вектора наибольшие величины коэффициента

корреляции наблюдались в коротковолновой области области спектра в участке 416-443нм с максимумом при 416нм, для второго вектора это имело место в длинноволновой области при 640-700нм с максимумом на 700нм.

В таблице 4 приведены примеры аппроксимации минимальной и максимальной функций ПОИ, представленных на рис.2, с помощью первого ортогонального вектора, используя опорную длину волны 416нм. Видна хорошая степень аппроксимации. Спектр ПОИ в данном случае описывается функцией

$$\epsilon(\lambda_i) = \langle \epsilon(\lambda_i) \rangle + C_1 \psi_1(\lambda_i) \quad (6)$$

Значения $\langle \epsilon(\lambda_i) \rangle$ и $\psi_1(\lambda_i)$ берутся из таблицы 3, а величина C_1 определяется из уравнения

$$\epsilon(416)_{изм} = \langle \epsilon(416) \rangle + C_1 \psi_1(416) \quad (7)$$

В той же таблице 4 приведен пример аппроксимации ПОС двумя первыми векторами при опорных длинах волн 416 и 640нм для максимальной функции ПОИ. Эти длины волн в данном случае выбраны ориентируясь на прозрачный зонд ОГХ [1], используемый в последнее время в экспедиционных исследованиях МГИ. В данном прозрачном измерении ПОИ ведутся синхронно на двух длинах волн: 418 и 659нм, ближайшими к которым являются длины волн 416 и 640-677 нм в рассчитанных нами ортогональных векторах. Необходимые значения ортогонального вектора при 659 нм могли быть определены путем интерполяции, но в данном примере это не сделано вследствие незначительной изменчивости 2-го вектора между 640 и 677 нм.

Для каждого случая аппроксимации спектров ПОИ собственными векторами рассчитаны среднеквадратические ошибки σ отклонения аппроксимированных величин ПОИ от измеренных и максимальное относительное отклонение аппроксимации $\delta\epsilon_{\max}$:

$$\sigma = [1 / n \sum [\epsilon_{\text{аппр}}(i) - \epsilon_{\text{изм}}(i)]^2]^{0,5} \quad (8)$$

$$\delta\epsilon_{\max}, \% = [(\epsilon_{\text{аппр}} - \epsilon_{\text{изм}})_{\max} / \epsilon_{\text{изм}}] * 100 \quad (9)$$

Величины σ и $\delta\epsilon_{\max}$ приведены в таблице 4. Видно, что при подключении второго вектора к аппроксимации максимального спектра ПОИ среднеквадратическая ошибка уменьшилась с 0.014 до 0.010 м⁻¹.

Таблица 4. Примеры восстановления спектров ПОИ ортогональными векторами и через корреляционные связи

Длина волны, нм	$\epsilon, \text{ м}^{-1} (\text{Log})$		$\epsilon, \text{ м}^{-1} (\text{Log})$			
	Измерено мин. ПОИ	Аппроксим. 1-м вект. (416нм)	Измерено макс. ПОИ	Аппроксим. 1-м вект. (416нм)	Аппроксим. 1-м и 2-м векторами (416 и 640нм)	Аппроксим. корреляц. соотношение м
416	0.211	0.211	0.513	0.513	0.513	0.513
432	0.189	0.189	0.478	0.495	0.498	0.479
443	0.188	0.185	0.476	0.494	0.496	0.482
468	0.149	0.143	0.409	0.413	0.424	0.389
490	0.140	0.138	0.408	0.411	0.420	0.391
506	0.135	0.134	0.403	0.397	0.408	0.375
527	0.141	0.138	0.402	0.398	0.409	0.376
547	0.140	0.130	0.391	0.396	0.407	0.375
567	0.146	0.144	0.394	0.387	0.397	0.366
574	0.149	0.146	0.399	0.386	0.397	0.365
587	0.167	0.161	0.411	0.397	0.410	0.377
610	0.206	0.200	0.441	0.427	0.443	0.406
625	0.231	0.221	0.462	0.445	0.461	0.425
640	0.231	0.226	0.456	0.438	0.456	0.415
677	0.278	0.272	0.508	0.482	0.500	0.460
700	0.354	0.347	0.558	0.532	0.558	0.509
$\sigma, \text{ м}^{-1}$		0.005		0.014	0.010	0.031
$\delta\epsilon_{\text{ макс. \%}}$		- 7.1		- 5.1	4.2	- 7.8

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации минимального спектра ПОИ только одним вектором невелика - 0,005 м⁻¹. Фактические среднеквадратические ошибки σ близки к теоретическим S_m , рассчитанным по формуле (5). Максимальное относительное отклонение аппроксимаций от измеренных функций находится в пределах 4,2-7,1%.

Восстановление спектра ПОИ возможно и через корреляционные связи между величинами ПОИ в различных участках спектра. В таблице 4 приведен пример восстановления спектрального распределения ПОИ, используя уравнения линейной регрессии, рассчитанные по данным того же массива наблюдений

$$\epsilon(\lambda_i) = A(\lambda_i) + B(\lambda_i) * \epsilon(416) \quad (10)$$

Как видно из таблицы, отклонения величин ПОИ, рассчитанных по регрессионным соотношениям (10) от измеренных значительно больше по сравнению с аппроксимацией первым ортогональным вектором, что отражает и среднеквадратическая ошибка для такой аппроксимации - она составляет 0,031 м⁻¹.

Данный пример показывает преимущество восстановления спектров ПОИ при помощи системы ортогональных функций. Это подтверждается и теоретическими оценками ошибок регрессий, определяемых формулой:

$$S_{\text{рег}} = [\sigma_{\epsilon} (1 - r^2)]^{0.5} \quad (11)$$

Они в данном случае составляют от 0,017 в коротковолновой области спектра до 0,027 м⁻¹ при длине волны 700нм.

Сравнение с литературными данными.

Возможность восстановления спектральных величин ПОИ морской водой с использованием системы ортогональных векторов впервые была рассмотрена в работе [7]. Использовались данные спектральных измерений ПОИ в диапазоне длин волн 270-590нм в водах Индийского океана, Красного и Средиземного морей. Относительная дисперсия двух первых векторов в видимой области спектра составляла для разных выборок, отличающихся величиной ПОИ, 95-99%. Для выборки содержащей пробы воды с показателями ослабления $\epsilon(410) > 0,18 \text{ м}^{-1}$,

сопоставимыми с ПОИ в водах Черного моря в наших измерениях, в видимой области спектра 410-590нм в [4] получена такая же как и у нас ошибка аппроксимации двумя векторами $S_2=0,008 \text{ м}^{-1}$. Проведенная нами аппроксимация спектральной изменчивости первого вектора в [7] в видимой области формулой λ^{-n} дает величину $n=1,14$, что соответствует более мелкой взвеси, чем в Черном море, где для 1-го вектора такая аппроксимация дала величину $n=0,88$.

В работе [8] метод разложения на ортогональные векторы был использован применительно к спектрам ПОИ, измеренным прозрачномером ЛФП [9] до глубин 200м в 1984г на северо-западном шельфе и примыкающей к нему склоновой области Черного моря. Измерения велись в 6 участках спектра в интервале 422-625нм. Коэффициент взаимной корреляции ПОИ для любых пар длин волн находился в пределах 0,86-0,99; по нашим данным в этой области спектра $r=0,89-0,99$. Вклад первого и второго векторов в суммарную дисперсию в [8] составил 96,4 и 2,8%, по нашим данным - 94,6 и 2,8%. Вследствие высокого уровня спектральной дисперсии описываемой первым вектором в [8] делается вывод о возможности восстановления с его помощью спектрального распределения ПОИ в области длин волн 422-625нм, но ошибки восстановления не рассчитывались и конкретных примеров не приводится.

Аппроксимация спектральной изменчивости первого ортогонального вектора в [8] функцией λ^{-n} дает величину $n=0,77$, что соответствует содержанию в воде более крупной взвеси по сравнению с нашими измерениями $n=0,88$. Различия в величинах показателя n можно объяснить изменчивостью видового состава фитопланктона в Черном море произошедшем за эти годы - он значительно помельчал [10]. Начиная со второй половины 80-х годов и в 90-е годы за счет массового развития кокколитофорид и перидиней изменился размерный состав фитоцены - в нем стал преобладать нанопланктон - до 90% и более.

Литература.

1. Оптико-гидролого-химический зонд - ОГХ (МГИ 4113) // Техническое описание опытного образца зонда МГИ 4113. СКТБ МГИ НАНУ, Севастополь, 1992.
2. Шельфовый измерительный комплекс - ШИК (МГИ 4116) // Техническое описание опытного образца зонда МГИ 4116. СКТБ МГИ НАНУ, Севастополь, 1994.

3. В.И. Маньковский, М.Н. Кайгородов - Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // Автоматизация научных исследований морей и океанов. Севастополь, МГИ АН УССР, 1980, с. 91-92.

4. А.М. Обухов - О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР, сер. геофизич., М., 1960, N3, с.432-439.

5. Д.И. Казакевич - Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии // Гидрометиздат, Л., 1977.

6. О.В. Копелевич.- Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. т.1 Физическая оптика океана. "Наука", М., 1983, с.208-234.

7. О.В. Копелевич.- О возможности восстановления показателя ослабления света морской водой в области 270-590 нм по данным измерений для двух длин волн // Океанология, т.23, вып. 3, 1982, с.392-397.

8. Е.И. Афонин, В.Л. Владимиров, Е. Пизик, В.А. Урденко, Г. Циммерман.- Спектры показателя ослабления и их разложение по эмпирическим ортогональным функциям // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Под ред. В.А. Урденко, Г. Циммермана. с.162-167. Изд. Института космич. иссл. АН ГДР. Берлин 1985.

9. М.Е. Ли, Э.А. Михайлов, Г.Г. Неуймин.- Новый логарифмический фотометр-прозрачномер // Экспресс информация МГИ АН УССР, Севастополь, 1969, N16, с.71-76.

10. В.И. Маньковский, В.Л. Владимиров, Е.И. Афонин, А.В. Мишонон, М.В. Соловьев, Б.Е. Аннинский, Л.В. Георгиева, О.А. Юнев.- Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие её сильное снижение в конце 80-х начале 90-х годов // Препринт МГИ НАНУ, ИнБЮМ НАНУ, Севастополь, 1996, 32с.