

# Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.463.5

В.И. Маньковский

## **Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря**

Рассчитаны модельные спектры показателя ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря. По ним определен вклад компонентов морской воды (взвесь, желтое вещество, пигменты фитопланктона, чистая вода) в показатель ослабления направленного света в разных водах моря. Для поверхностных вод установлена формула связи показателя рассеяния света с показателем ослабления на длине волны 547 нм. Определено фоновое (предельное минимальное) значение показателя поглощения желтым веществом в водах Средиземного моря. Проведено его сравнение с аналогичным показателем в других водоемах – Черном море, оз. Байкал, Балтийском море, океанических водах.

**Ключевые слова:** показатель ослабления, взвесь, хлорофилл, желтое вещество.

### **Введение**

При проведении оптического мониторинга морских водоемов широко используются измерения показателя ослабления направленного света. Показатель ослабления света (ПОС) является интегральной оптической характеристикой, представляющей собой сумму показателей поглощения и рассеяния света взвешенными и растворенными в воде веществами.

В плане экологического мониторинга водоемов актуальной задачей является обращение величин ПОС с целью получения информации о содержащихся в воде веществах и их спектральном вкладе в этот показатель. Эффективным методом в решении таких обратных задач является моделирование.

В работе [1] расчеты вклада различных компонентов морской воды в ПОС проводились на основе спектральной физической модели ослабления света. При этом использовались экспериментальные данные о показателе рассеяния на длине волны 550 нм для углов 1 и 45° и спектральном поглощении света водой.

В работах [2, 3] для этих целей применена полуэмпирическая модель, построенная на базе спектральной физической модели [1] с использованием эмпирических связей между некоторыми оптическими характеристиками. При моделировании используется экспериментально измеренное спектральное распределение ПОС. Критерием адекватности полуэмпирической модели является ее соответствие эксперименту. Подобного типа модель применена и в настоящей работе.

При расчете модельных спектров использовались экспериментальные спектры ПОС, измеренные в Средиземном море в мае 1998 г. во время экспедиции Морского гидрофизического института НАН Украины во 2-м рейсе НИС «Горизонт». Измерения ПОС проводились лабораторным прозрачнотермом [4] в пробах воды с поверхности моря. Показатель ослабления измерялся в 13 спектральных участках: 416, 432, 468, 490, 506, 527, 547, 567, 587, 610, 625, 640, 677 нм.

Величины оптических характеристик даются в статье при десятичном основании.

### Конструкция модельных спектров ПОС

Спектральные показатели ослабления направленного света водой  $\varepsilon(\lambda)_в$  являются суммой спектральных показателей поглощения и рассеяния следующих компонентов [1]:

$$\varepsilon(\lambda)_в = \kappa(\lambda)_{хл} + \kappa(\lambda)_{жв} + \kappa(\lambda)_{чв} + \sigma(\lambda)_{взв} + \sigma(\lambda)_{молек}, \quad (1)$$

где  $\kappa(\lambda)_{хл}$ ,  $\kappa(\lambda)_{жв}$ ,  $\kappa(\lambda)_{чв}$  – показатели поглощения пигментами фитопланктона (хлорофилл, феофитин), желтым веществом, чистой водой;  $\sigma(\lambda)_{взв}$ ,  $\sigma(\lambda)_{молек}$  – показатели рассеяния взвесью и молекулярного рассеяния чистой водой. Сумма  $\sigma(\lambda)_{взв} + \sigma(\lambda)_{молек} = \sigma(\lambda)_в$  есть показатель рассеяния водой. В свою очередь  $\sigma(\lambda)_{взв} = \sigma(\lambda)_{взв.круп} + \sigma(\lambda)_{взв.мелк}$ , где  $\sigma(\lambda)_{взв.круп}$  и  $\sigma(\lambda)_{взв.мелк}$  – показатели рассеяния крупной (органической) и мелкой (минеральной) взвесью.

Поглощение света взвесью в формулу (1) не включено, так как считается, что оно незначительно [1].

### Методика расчета

По аналогии с методиками работ [2, 3] расчеты спектрального распределения ПОС проводились от опорной длины волны. В данном случае взята длина волны 547 нм. Для нее определялись величины всех компонентов в правой части формулы (1). Значение  $\kappa(547)_{чв}$  бралось из работы [5].

Показатель поглощения света пигментами рассчитывался через хлорофилл по формуле  $\kappa(547)_{хл} = C_{хл} \kappa(547)_{уд.хл}$ , где  $C_{хл}$  – концентрация хлорофилла в мг/м<sup>3</sup>,  $\kappa(547)_{уд.хл}$  – удельный показатель поглощения света хлорофиллом в м<sup>2</sup>/мг [6]. По одновременным измерениям в пробах воды показателя ослабления света и концентрации хлорофилла получена следующая формула:

$$\lg C_{хл} = 2,036 \lg \varepsilon(547)_в + 0,932. \quad (2)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка определения концентрации хлорофилла  $\delta C_{хл}$  по формуле (2) составляет 20%.

Для определения показателя рассеяния света водой  $\sigma(547)_в$  использовалась эмпирическая формула связи показателя рассеяния с показателем ослабления в океанических водах для длины волны 550 нм из работы [7]

$$\sigma(550)_в = 0,944\varepsilon(550)_в - 0,0209. \quad (3)$$

Оценки по данным [1] показали, что поправка на спектральную изменчивость показателя рассеяния при изменении длины волны от 550 до 547 нм незначительна, и практически при расчетах можно принять  $\sigma(547)_в = \sigma(550)_в$ .

Показатель поглощения желтым веществом определялся из формулы (1) как остаточный член:

$$\kappa(547)_{жв} = \varepsilon(547)_в - \kappa(547)_{хл} - \kappa(547)_{чв} - \sigma(547)_в. \quad (4)$$

После определения значений всех компонентов при длине волны 547 нм задавалась их спектральная изменчивость. Спектральные значения  $\kappa(\lambda)_{чв}$  брались из работы [3].

Значения показателя поглощения желтым веществом на различных длинах волн рассчитывались по формуле

$$\kappa(\lambda)_{жв} = \kappa(547)_{жв} \exp(-\mu(547 - \lambda)). \quad (5)$$

Параметр  $\mu$  при длинах волн  $\lambda \leq 490$  нм принимался равным  $0,019 \text{ м}^{-1}$ , при  $\lambda > 490$  нм  $\mu = 0,011 \text{ м}^{-1}$  [8, 9]. Значения  $\kappa(\lambda)_{уд.хл}$  взяты из [6].

Спектральная изменчивость показателя рассеяния света водой задавалась формулой

$$\sigma(\lambda)_в = \sigma(547)_в (547 / \lambda)^n. \quad (6)$$

Расчет модельных спектров, наилучшим образом отображающих экспериментальные спектры, проводился методом вариации параметра  $n$ . В первых расчетах выяснилось, что использование формулы (3) при  $\varepsilon(547) < 0,1 \text{ м}^{-1}$  не позволяет получить хорошее соответствие модели с экспериментом. Вследствие этого в дальнейших расчетах значение  $\sigma(547)_в$ , определенное в первом приближении с использованием формулы (3), тоже варьировалось. Оптимальное сочетание параметров  $n$  и  $\sigma(547)_в$  определялось методом наименьших квадратов отклонений модельного спектра от экспериментального.

### Результаты и их обсуждение

Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в водах Средиземного моря. Для модельных расчетов взято шесть спектров ПОС, измеренных в водах, отличающихся значениями показателя ослабления и концентрации хлорофилла (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

**Измеренные значения ПОС и  $C_{\text{ХЛ}}$ ,  
используемые для расчета модельных спектров**

Номер спектра	Район Средиземного моря	$\varepsilon(547)_{\text{в.эксп}}$ , $\text{м}^{-1}$	$C_{\text{ХЛ}}$ , $\text{мг/м}^3$
1	Апвеллинг у юго-восточного побережья о. Сицилия	0,308	0,78
2	Море Альборан, пелагиаль в западной части	0,214	0,37
3	Море Альборан, пелагиаль в центральной части	0,157	0,20
4	Ионическое море, пелагиаль в южной части	0,092	0,07
5	Эгейское море, пелагиаль в южной части	0,084	0,05
6	Тунисский пролив	0,054	0,02

Оптимальные значения  $n$  и  $\sigma(547)_{\text{в}}$  для модельных спектров ПОС даны в табл. 2. Результаты модельных расчетов представлены в табл. 3 и 4 и на рисунке. В табл. 5 – 10 приведен спектральный вклад отдельных компонентов в общий показатель ослабления света водой, рассчитанный по модельным спектрам.

Т а б л и ц а 2

**Оптимальные значения параметра  $n_{\text{мод}}$   
и показателя рассеяния  $\sigma(547)_{\text{в.мод}}$  для модельных спектров**

Номер спектра	$\sigma(547)_{\text{в.мод}}$ , $\text{м}^{-1}$	$n_{\text{мод}}$
1	0,277	0,5
2	0,184	0,5
3	0,128	0,5
4	0,064	0,6
5	0,056	0,7
6	0,026	0,8

Из табл. 4 видно, что среднеквадратическое относительное отклонение модельных спектров от экспериментальных составляет 2,3 – 7,7%. Максимальные отклонения в отдельных точках находятся в пределах 5,2 – 14,1%.

Т а б л и ц а 3

**Экспериментальные и рассчитанные значения показателя  
ослабления направленного света  $\varepsilon(\lambda)_g \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$  для спектров  
в разных по прозрачности поверхностных водах Средиземного моря**

Спектры		Длина волны, нм												
№	Тип	416	432	468	490	506	527	547	567	587	610	625	640	677
1	эксп.	392	370	325	314	310	310	308	308	337	371	390	390	447
1	мод.	388	376	342	325	315	311	308	308	325	382	387	396	457
2	эксп.	269	258	217	208	207	207	214	226	252	300	317	320	385
2	мод.	268	255	230	219	215	215	214	215	234	293	299	309	370
3	эксп.	188	183	152	148	144	152	157	162	183	233	264	262	314
3	мод.	196	184	164	156	155	157	157	160	180	239	246	256	318
4	эксп.	119	112	92	80	81	84	92	99	124	165	203	203	250
4	мод.	117	106	91	85	87	90	92	96	117	177	184	195	257
5	эксп.	112	104	77	69	74	77	84	92	118	163	190	190	246
5	мод.	109	98	82	77	79	82	84	88	109	169	176	187	249
6	эксп.	69	64	44	45	45	52	54	66	93	140	162	168	214
6	мод.	70	60	48	44	47	51	54	58	80	141	149	160	223

Пр и м е ч а н и е: эксп. – экспериментальный, мод. – модельный тип спектров.

Т а б л и ц а 4

**Максимальные и среднеквадратические  $S_{\text{мод}}$  отклонения  
модельных спектров от экспериментальных**

Номер спектра	$\frac{(\varepsilon_{\text{эксп}} - \varepsilon_{\text{мод}})_{\text{макс}}, \text{М}^{-1}}{\lambda_{\text{макс}}, \text{нм}}$	$(\varepsilon_{\text{эксп}} - \varepsilon_{\text{мод}})_{\text{макс}} / \varepsilon_{\text{эксп}}, \%$	$S_{\text{мод}}, \text{М}^{-1}$	$S_{\text{мод}}, \%$
	1	$\frac{-0,017}{468}$	-5,2	0,008
2	$\frac{0,018}{625}$	5,7	0,011	4,2
3	$\frac{0,018}{625}$	6,9	0,008	4,1
4	$\frac{0,019}{625}$	9,4	0,005	4,3
5	$\frac{0,014}{625}$	7,4	0,005	4,3
6	$\frac{0,013}{587}$	14,1	0,007	7,7

Пр и м е ч а н и е. В знаменателе приведена длина волны, при которой наблюдалось максимальное отклонение.

Параметр  $n$ , характеризующий спектральную изменчивость рассеяния света водой (табл. 2), для спектров 1 – 3, измеренных в более мутных водах,

одинаковый,  $n_{\text{мод}} = 0,5$ . В чистых водах он возрастает и составляет  $n_{\text{мод}} = 0,6$  для спектра 4,  $n_{\text{мод}} = 0,7$  – для спектра 5,  $n_{\text{мод}} = 0,8$  – для спектра 6. Такая изменчивость параметра  $n$  объясняется следующими факторами.

Показатель рассеяния света водой является суммой показателей рассеяния крупной (биологической) взвесью, мелкой (минеральной) взвесью, чистой водой (молекулярное рассеяние):

$$\sigma(\lambda)_в = \sigma(\lambda)_{\text{взв.круп}} + \sigma(\lambda)_{\text{взв.мелк}} + \sigma(\lambda)_{\text{молек}}. \quad (7)$$

Спектральная изменчивость показателей рассеяния для отдельных компонентов, согласно моделям рассеяния света в [1], выражается формулами

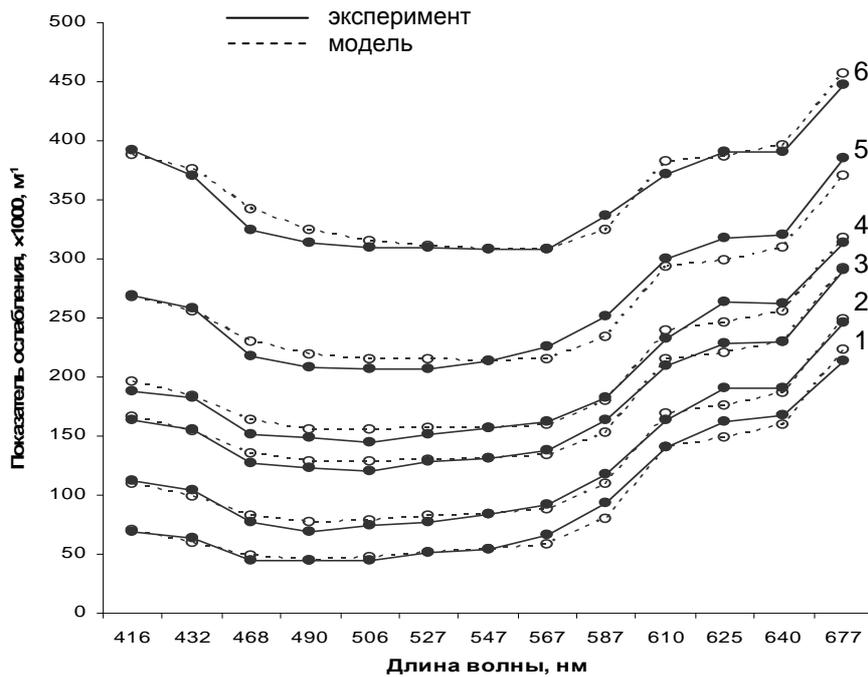
$$\sigma(\lambda)_{\text{взв.круп}} \sim \lambda^{-0,3}; \sigma(\lambda)_{\text{взв.мелк}} \sim \lambda^{-1,7}; \sigma(\lambda)_{\text{молек}} \sim \lambda^{-4,3}. \quad (8)$$

В наших расчетах спектральная изменчивость показателя рассеяния света водой задана общим параметром  $\sigma(\lambda)_в \sim \lambda^{-n}$ . Как следует из (8), параметр  $n$  зависит от соотношения во взвеси крупной и мелкой фракций. В более чистых водах концентрация биологической взвеси меньше, вследствие чего возрастает относительное содержание мелкой фракции, а это приводит к увеличению параметра  $n$ .

Найденное в результате подбора оптимальное для моделирования спектров ПОС значение параметра  $\sigma(547)_{\text{в.мод}}$  (табл. 2) связано с показателем ослабления  $\varepsilon(547)_{\text{в.эксп}}$  соотношением

$$\sigma(547)_{\text{в.мод}} = 0,986\varepsilon(547)_{\text{в.эксп}} - 0,027, \quad (9)$$

коэффициент корреляции для данной связи  $r = 0,998$ .



Экспериментальные и модельные спектры (1 – 6) показателя ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель  
ослабления направленного света для спектра 1 при  $C_{\text{хл}} = 0,78 \text{ мг/м}^3$**

Длина волн, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}},$ $\text{м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлоро- филл	Взвесь + молекулярное	Молеку- лярное	
416	0,5	11,8	6,0	81,7	0,6	0,388
432	0,6	9,0	7,5	82,9	0,5	0,376
468	1,3	5,0	6,2	87,5	0,4	0,342
490	2,0	3,5	4,5	90,0	0,3	0,325
506	3,6	3,0	2,2	91,2	0,3	0,315
527	5,9	2,4	1,1	90,6	0,3	0,311
547	7,5	1,9	0,8	89,8	0,3	0,308
567	9,4	1,6	0,7	88,3	0,2	0,308
587	16,0	1,2	0,7	82,1	0,2	0,325
610	30,1	0,8	0,6	68,5	0,1	0,382
625	31,9	0,6	0,6	66,9	0,1	0,387
640	34,1	0,6	0,6	64,7	0,1	0,396
677	43,6	0,3	1,7	54,4	0,1	0,457

Т а б л и ц а 6

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель  
ослабления направленного света для спектра 2 при  $C_{\text{хл}} = 0,37 \text{ мг/м}^3$**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}},$ $\text{м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлоро- филл	Взвесь + молеку- лярное	Молеку- лярное	
416	0,7	16,5	4,1	78,7	0,9	0,268
432	0,9	12,8	5,3	81,0	0,8	0,255
468	2,0	7,2	4,4	86,4	0,6	0,230
490	3,0	5,0	3,2	88,8	0,5	0,219
506	5,4	4,2	1,5	88,9	0,5	0,215
527	8,6	3,4	0,7	87,3	0,4	0,215
547	10,8	2,7	0,5	86,0	0,4	0,214
567	13,5	2,2	0,4	83,9	0,3	0,215
587	22,2	1,6	0,4	75,8	0,3	0,234
610	39,2	1,0	0,4	59,4	0,2	0,293
625	41,2	0,8	0,4	57,6	0,1	0,299
640	43,8	0,7	0,4	55,1	0,1	0,309
677	53,9	0,4	1,0	44,7	0,1	0,370

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света для спектра 3 при  $C_{\text{хл}} = 0,20 \text{ мг/м}^3$**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}}, \text{ м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл	Взвесь + молекулярное	Молекулярное	
416	1,0	21,4	3,0	74,6	1,2	0,196
432	1,2	16,8	4,0	78,0	1,1	0,184
468	2,7	9,5	3,4	84,4	0,9	0,164
490	4,2	6,6	2,4	86,8	0,7	0,156
506	7,4	5,5	1,2	85,9	0,6	0,155
527	11,8	4,4	0,6	83,2	0,6	0,157
547	14,7	3,5	0,4	81,4	0,5	0,157
567	18,2	2,8	0,4	78,6	0,4	0,160
587	29,0	1,9	0,3	68,8	0,3	0,180
610	48,0	1,2	0,3	50,5	0,2	0,239
625	50,1	0,9	0,2	48,8	0,2	0,246
640	52,8	0,8	0,2	46,2	0,2	0,256
677	62,8	0,4	0,6	36,2	0,1	0,318

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света для спектра 4 при  $C_{\text{хл}} = 0,07 \text{ мг/м}^3$**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}}, \text{ м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл	Взвесь + молекулярное	Молекулярное	
416	1,6	32,5	1,8	64,1	2,0	0,117
432	2,1	26,4	2,4	69,1	1,9	0,106
468	4,9	15,8	2,1	77,2	1,5	0,091
490	7,6	11,0	1,5	79,9	1,3	0,085
506	13,3	9,1	0,7	76,9	1,1	0,087
527	20,5	6,9	0,3	72,3	1,0	0,090
547	25,1	5,4	0,2	69,3	0,9	0,092
567	30,4	4,3	0,2	65,1	0,7	0,096
587	44,6	2,8	0,2	52,4	0,5	0,117
610	64,9	1,4	0,1	33,6	0,3	0,177
625	66,9	1,1	0,1	31,9	0,2	0,184
640	69,3	0,9	0,1	29,7	0,2	0,195
677	77,4	0,5	0,3	21,8	0,1	0,257

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света для спектра 5 при  $C_{\text{хл}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}}, \text{ м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл	Взвесь + молекулярное	Молекулярное	
416	1,7	34,9	1,4	62,0	2,1	0,109
432	2,3	28,7	1,8	67,2	2,0	0,098
468	5,5	17,3	1,7	75,5	1,7	0,082
490	8,4	12,2	1,3	78,1	1,4	0,077
506	14,6	10,0	0,5	74,9	1,3	0,079
527	22,5	7,5	0,2	69,8	1,1	0,082
547	27,5	6,0	0,1	66,4	1,0	0,084
567	33,1	4,6	0,1	62,2	0,8	0,088
587	47,9	2,9	0,2	49,0	0,6	0,109
610	67,9	1,5	0,1	30,5	0,3	0,169
625	69,9	1,2	0,1	28,8	0,2	0,176
640	72,2	1,0	0,1	26,7	0,2	0,187
677	80,0	0,5	0,2	19,3	0,1	0,249

Т а б л и ц а 10

**Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света для спектра 6 при  $C_{\text{хл}} = 0,02 \text{ мг/м}^3$**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мод}}, \text{ м}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл	Взвесь + молекулярное	Молекулярное	
416	2,7	50,0	0,9	46,4	3,3	0,070
432	3,6	42,9	1,2	52,3	3,3	0,060
468	9,4	27,4	1,0	62,2	2,9	0,048
490	14,7	19,5	0,9	64,9	2,5	0,044
506	24,6	15,4	0,4	59,6	2,1	0,047
527	36,1	11,1	0,2	52,6	1,8	0,051
547	42,8	8,5	0,2	48,5	1,5	0,054
567	49,7	6,3	0,2	43,8	1,2	0,058
587	65,1	3,8	0,1	31,0	0,8	0,080
610	81,3	1,6	0,1	17,0	0,4	0,141
625	82,8	1,3	0,1	15,8	0,3	0,149
640	84,4	1,1	0,1	14,4	0,2	0,160
677	89,5	0,5	0,1	9,9	0,1	0,223

Расчеты по модельным спектрам, представленные в табл. 5 – 10, показывают вклад отдельных компонентов морской воды в суммарный показатель ослабления света в различных водах Средиземного моря. Отметим общие закономерности.

1. В коротковолновой области спектра 416 – 547 нм во всех водах основной вклад в показатель ослабления света вносит взвесь. Ее максимальный вклад в общее ослабление приходится на область спектра 490 – 506 нм, где он составляет 64,9% ( $\lambda = 490$  нм) в наиболее чистых водах (спектр б) и 91,2% ( $\lambda = 506$  нм) – в мутных водах (спектр 1).

2. Желтое вещество дает максимальный вклад в показатель ослабления света в крайней коротковолновой области спектра. На длине волны 416 нм он составляет 11,8% в мутных водах (спектр 1) и 50% – в наиболее чистой воде (спектр б). В области длин волн  $\lambda > 567$  нм вклад желтого вещества во всех водах менее 6,3%.

3. Чистая вода вносит существенный вклад в ослабление света в средней и длинноволновой областях спектра. Ее вклад 14,7% в наиболее прозрачной морской воде (спектр б) наблюдается уже при  $\lambda = 490$  нм, он возрастает до 89,5% при  $\lambda = 677$  нм.

4. Вклад хлорофилла в ослабление света максимален при  $\lambda = 432$  нм, в целом во всех водах он невелик – 7,5% (спектр 1) и 1,2% (спектр б).

5. Молекулярное рассеяние света водой вносит ощутимый вклад лишь в наиболее чистой воде (спектр б), 1,2 – 3,3% в области длин волн 416 – 567 нм.

Вышеуказанные закономерности спектрального вклада компонентов в ослабление света в водах Средиземного моря подобны сформулированным в работе [1] по результатам моделирования спектрального распределения показателя ослабления света в водах Индийского и Тихого океанов.

В табл. 11 для сравнения приведены результаты моделирования спектрального распределения ПОС и вклад в ослабление света отдельных компонентов для поверхностных прибрежных вод Средиземного моря и вод Тихого океана по модельным расчетам в работе [1, табл. 8.12]. Сравнение показывает близкий порядок величин спектрального вклада в ПОС для всех компонентов. Важным моментом является факт, что в сравниваемых водах при практически одинаковых спектральных величинах параметра «вероятность выживания фотона» (относительный вклад рассеяния в ПОС) одинаково положение его максимума на длине волны 510 нм.

**Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света (модельные расчеты) в прибрежных поверхностных водах Средиземного моря (настоящая работа) и Тихого океана [2]**

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние + Взвесь + молекулярное	$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мол.}}$ , $\text{М}^{-1}$	Поглощение			Рассеяние + Взвесь + молекулярное	$\varepsilon(\lambda)_{\text{в.мол.}}$ , $\text{М}^{-1}$
	Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл			Чистая вода	Желтое вещество	Хлорофилл		
Средиземное море (около о. Сицилия), $C_{\text{хл}} = 0,78 \text{ мг/м}^3$ , спектр 1										
430	0,6	9,5	7,4	82,5	0,378	1,0	12,0	5,0	82,0	0,330
470	1,4	4,9	6,0	87,7	0,340	0,7	8,0	5,0	88,0	0,295
510	4,0	3,1	2,0	90,9	0,323	2,0	5,0	1,4	92,0	0,265
550	7,8	1,8	0,8	89,6	0,308	6,0	3,0	0,5	91,0	0,261
590	17,8	1,2	0,7	80,3	0,332	21,0	1,0	0,5	77,0	0,295
670	41,2	0,3	1,5	57,0	0,444	40,0	0,3	2,5	58,0	0,369
Тихий океан (прибрежные воды), $C_{\text{хл}} = 0,51 \text{ мг/м}^3$										

Фоновое желтое вещество в водах Средиземного моря. В работе [10] для вод Черного моря получена формула связи показателя рассеяния света водой с показателем ослабления для длины волны 525 нм

$$\sigma(525)_в = 0,98\varepsilon(525)_в - 0,0315, \quad (10)$$

выяснено, что дает формула (10) в предельном случае, когда в воде отсутствует всякая взвесь – и минеральная, и органическая, т. е.  $\sigma(525)_{взв} = 0$ . В этом случае  $\sigma(525)_в = \sigma(525)_{молек}$ ,  $\kappa(525)_{хл} = 0$  и показатель ослабления света водой, согласно (1), равен

$$\varepsilon(525)_в = \kappa(525)_{жв.фон} + \kappa(525)_{чв} + \sigma(525)_{молек}. \quad (11)$$

Из формул (10) и (11) следует

$$\kappa(525)_{жв.фон} = [\sigma(525)_{молек} + 0,0315] / 0,98 - \sigma(525)_{молек} - \kappa(525)_{чв}. \quad (12)$$

Параметр  $\kappa(525)_{жв.фон}$  в [10] назван фоновым показателем поглощения света желтым веществом, являющимся минимальным для данного водоема. То есть считается, что  $\kappa(\lambda)_{жв} = \kappa(\lambda)_{жв.фон} + \kappa(\lambda)_{жв.пер}$ , где  $\kappa(\lambda)_{жв.фон}$  – фоновая (постоянная) составляющая показателя поглощения света желтым веществом в водоеме, на которую накладывается переменная составляющая  $\kappa(\lambda)_{жв.пер}$ , связанная с переменной концентрацией фитопланктона и других растительных организмов, при отмирании которых образуется желтое вещество. Так как в рассматриваемом предельном случае органическая взвесь отсутствует, то  $\kappa(\lambda)_{жв.пер} = 0$ . Показатели поглощения  $\kappa(\lambda)_{жв.фон}$  и  $\kappa(\lambda)_{жв.пер}$ , очевидно, связаны с консервативной и неустойчивой фракциями желтого вещества, образующимися при разложении органической взвеси в данном водоеме, а также приносимыми в него с водами рек. При этом в результате выноса желтого вещества с суши реками и действия биохимических процессов преобразования органического вещества, протекающих в данном водоеме, содержание консервативной фракции желтого вещества находится на некотором характерном уровне. Очевидно, в связи с сезонной и межгодовой изменчивостью биогеохимических процессов преобразования органического вещества этот фоновый уровень содержания желтого вещества может изменяться. Однако о его возможных временных изменениях данных пока нет. В связи с этим значение  $\kappa(\lambda)_{жв.фон}$ , определяемое по формуле (12), будем условно считать постоянным и минимальным для водоема в данный временной период.

Подстановка в формулу (12) значений  $\sigma(525)_{молек}$  и  $\kappa(525)_{чв}$  из работ [5, 11] дает для вод Черного моря  $\kappa(525)_{жв.фон} = 0,014 \text{ м}^{-1}$ . В пересчете на длину волны 550 нм при параметре спектральной изменчивости желтого вещества  $\mu = 0,011$  получается, что  $\kappa(550)_{жв.фон} = 0,0106 \text{ м}^{-1}$ .

Используя такой же подход к формуле (9), находим для Средиземного моря  $\kappa(547)_{\text{жв.фон}} = 0,0043 \text{ м}^{-1}$ , для длины волны 550 нм  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}} = 0,00416 \text{ м}^{-1}$ . То есть фоновая концентрация желтого вещества в Средиземном море намного меньше, чем в Черном. Такое соотношение можно объяснить тем, что основным источником желтого вещества в море, согласно работе [12], являются воды впадающих в него рек. Удельный речной сток (на единичную площадь водоема) в Черное море намного больше, чем в Средиземное.

Для сравнения приведем фоновую величину показателя поглощения желтым веществом для оз. Байкал и Балтийского моря. В работе [2] для вод Байкала получена формула

$$\sigma(480)_B = 0,93\varepsilon(480)_B - 0,026. \quad (13)$$

С учетом этой формулы  $\kappa(480)_{\text{жв.фон}} = 0,0225 \text{ м}^{-1}$ . Пересчет на длину волны 550 нм дает  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}} = 0,0096 \text{ м}^{-1}$ .

Для вод Балтийского моря в [13] получена формула связи

$$\sigma(555)_B = 0,9393\varepsilon(555)_B - 0,0336. \quad (14)$$

Согласно этой формуле, для длины волны 550 нм  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}} = 0,0105 \text{ м}^{-1}$ .

При расчете  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}}$  для океанических вод по формуле связи из работы [7]  $\sigma(550)_B = 0,944\varepsilon(550)_B - 0,0209$  получается отрицательное значение этого параметра,  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}} = -0,0024 \text{ м}^{-1}$ . Какова причина такого результата, неясно.

В работе [7] есть данные одновременных измерений  $\sigma(550)_B$  и  $\varepsilon(550)_B$  из [14, 15]. Всего проведено 13 измерений – в океанических водах типа 1 и 2 (*Case 1* и *Case 2* по классификации Мореля), а также в прибрежных водах. Показатель ослабления  $\varepsilon(550)_B$  изменялся в диапазоне 0,091 – 1,71  $\text{м}^{-1}$ . Расчет по этим измерениям дает следующую формулу связи (коэффициент корреляции  $r = 0,998$ ):

$$\sigma(550)_B = 0,949\varepsilon(550)_B - 0,0314. \quad (15)$$

Для данной связи в океанических водах при длине волны 550 нм  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}} = 0,0086 \text{ м}^{-1}$ .

В табл. 12 приведены значения  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}}$  для разных водоемов, а также фоновые концентрации желтого вещества  $C_{\text{жв.фон}}$ . Для расчета использовались данные работы [16], в которой была измерена концентрация желтого вещества и определен его показатель поглощения  $\kappa(450)_{\text{жв}}$ . Согласно [16], удельный показатель поглощения желтым веществом  $\kappa(450)_{\text{уд.жв}}$  составил 0,0922  $\text{м}^2/\text{г}$ . Зная  $\kappa(450)_{\text{жв}}$ , можно определить концентрацию желтого вещества:

$$C_{\text{жв}} = \kappa(450)_{\text{жв}} / \kappa(450)_{\text{уд.жв}}. \quad (16)$$

Для использования формулы (16) значения  $\kappa(550)_{\text{жв.фон}}$  были пересчитаны на длину волны 450 нм.

Т а б л и ц а 12

**Фоновое значение показателя поглощения света  
желтым веществом и его концентрация в разных водоемах**

Водоем	$\kappa(550)_{\text{жв.фон}}, \text{ м}^{-1}$	$C_{\text{жв.фон}}, \text{ г/м}^3$
Средиземное море (настоящая работа)	0,0042	0,19
Океанические воды [14, 15]	0,0086	0,38
Озеро Байкал [2]	0,0096	0,43
Балтийское море [13]	0,0105	0,47
Черное море [10]	0,0106	0,48

**Выводы**

1. Рассчитаны модельные спектры показателя ослабления направленного света (область длин волн 416 – 677 нм) в поверхностных водах Средиземного моря. Среднеквадратическое относительное отклонение модельных спектров от экспериментальных, рассчитанных для вод разной прозрачности, составило 2,3 – 7,7%.

2. По модельным спектрам рассчитан вклад оптически активных компонентов морской воды (взвесь, желтое вещество, пигменты фитопланктона, чистая вода) в показатель ослабления направленного света в разных по прозрачности водах Средиземного моря.

3. Для поверхностных вод Средиземного моря установлена формула связи показателя рассеяния света с показателем ослабления на длине волны 547 нм.

4. Определен фоновый показатель поглощения желтым веществом в водах Средиземного моря. Проведено его сравнение с аналогичным показателем в других водоемах – Черном море, оз. Байкал, Балтийском море, океанических водах. В Средиземном море фоновый показатель поглощения желтым веществом наиболее низкий.

Автор благодарит старшего научного сотрудника ИнБИОМ НАН Украины Г.П. Берсеневу, проводившую в экспедиции определения концентрации хлорофилла, за предоставленные данные для установления связи содержания хлорофилла с показателем ослабления света.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копелевич О.В.* Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монины. – М.: Наука, 1983. – С. 208 – 234.
2. *Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.* Спектральная модель показателя ослабления направленного света в водах озера Байкал в летний период // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 6. – С. 39 – 46.
3. *Mankovsky V.I., Mankovskaya E.V.* Spectral model of beam attenuation coefficient in the Black Sea waters // Proc. of V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters». – St. Petersburg: D.S. Rozhdestvensky Optical Society, 2009. – P. 219 – 223.
4. *Маньковский В.И., Кайгородов М.Н.* Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // Автоматизация научных исследований морей и океанов. 5-я Всесоюзная школа. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1980. – С. 91 – 92.
5. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36, № 33. – P. 8710 – 8723.
6. *Карабашев Г.С.* Пигменты фитопланктона // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монины. – М.: Наука, 1983. – С. 163 – 166.
7. *Левин И.М., Копелевич О.В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // Океанология. – 2007. – 47, № 3. – С. 374 – 379.
8. *Carder K.L., Steward R.G., Harvey G.R. et al.* Marine humic and fulvic acids: Their affects on remote sensing of ocean chlorophyll // Limnol. Oceanogr. – 1989. – 34, № 1. – P. 68 – 81.
9. *Копелевич О.В., Люцарев С.В., Родионов В.В.* Спектральное поглощение света «желтым веществом» океанской воды // Океанология. – 1989. – 29, № 3. – С. 409 – 414.
10. *Маньковский В.И.* Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – № 6. – С. 68 – 75.
11. *Копелевич О.В.* Факторы, определяющие оптические свойства морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монины. – М.: Наука, 1983. – С. 150 – 163.
12. *Hojerslev N.K.* On the origin of yellow substance in the marine environment // Stud. Phys. Oceanogr. – Copenhagen: Kobenhavns Universitet, Institut for Fysisk Oceanografi, 1980. – № 42. – P. 39 – 56.
13. *Levin I., Darecki M., Sagan S. et al.* New Baltic Sea data on relationships between inherent optical properties at 550 nm // Proc. of V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters». – St. Petersburg: D.S. Rozhdestvensky Optical Society, 2009. – P. 162 – 165.
14. *Morel A., Prieur I.* Analysis of variation in ocean color // Limnol. Oceanogr. – 1977. – 22, № 4. – P. 709 – 722.
15. *Schoonmaker J.S., Hammond R.R., Heath A.L. et al.* A numerical model for prediction of sublittoral optical visibility // Ocean Optics XXII. – Bergen: Soc. Photo-Optic. Instrument. Engin., 1994. – 2258. – P. 685 – 702.

16. *Nyquist G.* Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances // *Thes. Dep. Anal. Mar. Chem.* – Gotheburg, 1979. – P. 200.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 02.04.10  
После доработки 15.06.10

**АНОТАЦІЯ** Розраховні модельні спектри показника ослаблення спрямованого світла в поверхневих водах Середземного моря. За ними визначений внесок компонентів морської води (суспензія, жовта речовина, пігменти фітопланктону, чиста вода) в показник ослаблення спрямованого світла в різних водах моря. Для поверхневих вод установлена формула зв'язку показника розсіяння світла з показником ослаблення на довжині хвилі 547 нм. Визначена фоновіа (гранична мінімальна) величина показника поглинання жовтою речовиною у водах Середземного моря. Проведене його порівняння з аналогічним показником в інших водоймищах: Чорному морі, озері Байкал, Балтійському морі, океанічних водах.

**Ключові слова:** показник ослаблення, суспензія, хлорофіл, жовта речовина.

**ABSTRACT** Model spectra of the beam attenuation coefficient for the Mediterranean Sea surface waters are calculated. Based on the spectra, the contribution of seawater components (suspended matter, yellow substance, phytoplankton pigments, pure water) to the beam attenuation coefficient in various types of seawater is defined. The formula of relation between the beam scattering coefficient and the beam attenuation coefficient on 547 nm for surface water is found. The background (limiting minimum) value of the yellow substance absorption coefficient for the Mediterranean Sea waters is defined. It is compared with the analogous parameter in other basins – the Black Sea, the Baikal Lake, the Baltic Sea, oceanic waters.

**Keywords:** attenuation coefficient, suspended matter, chlorophyll, yellow substance.