

В.И. Маньковский, П.П. Шерстянкин

Спектральная модель показателя ослабления направленного света в водах озера Байкал в летний период

Приводятся результаты разработки спектральной модели (диапазон 420 – 680 нм) показателя ослабления направленного света в водах оз. Байкал в летний период. В основе модели лежат два эмпирических соотношения, установленных для вод озера по экспериментальным данным: связь показателя ослабления на длине волны 480 нм с показателем рассеяния и с концентрацией хлорофилла. Верификация модельных спектров показала их хорошее соответствие натурным спектрам, измеренным в водах озера различной прозрачности. По модельным спектрам рассчитан спектральный вклад отдельных компонентов в показатель ослабления при различной его величине.

Введение. В работах [1,2] установлены основные закономерности спектрального распределения показателя ослабления направленного света в водах оз. Байкал. В то же время для решения ряда задач необходимо знать спектральный вклад в ослабление света отдельных оптически активных компонентов, содержащихся в воде. Эффективным методом для этих целей является построение физических моделей показателя ослабления. Такие модели для морских вод описаны в монографии [3]. В нашей работе представлена полуэмпирическая спектральная модель показателя ослабления направленного света для байкальских вод в летний период.

Конструкция модели. Спектральные показатели ослабления направленного света водой $\varepsilon(\lambda)_в$ являются суммой спектральных показателей поглощения и рассеяния следующих компонентов:

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

где $\kappa(\lambda)_{хл}$, $\kappa(\lambda)_{жв}$, $\kappa(\lambda)_{чв}$ – показатели поглощения хлорофиллом, желтым веществом, чистой водой; $\sigma(\lambda)_{взв}$, $\sigma(\lambda)_{чв}$ – показатели рассеяния взвесью, чистой водой. Поглощение света взвесью в формулу (1) не включено, так как считается, что оно незначительно [3].

Укажем, что приводимые далее величины оптических характеристик даются при десятичном основании.

Эмпирические данные. При построении модели используются два эмпирических соотношения, полученных по нашим измерениям на Байкале в летний период. Первое выражает связь показателей рассеяния и ослабления света водой на длине волны 480 нм. По 99 измерениям (коэффициент корреляции $r = 0,994$)

$$\sigma(480)_в = 0,93\varepsilon(480)_в - 0,026. \quad (2)$$

Данные для этой формулы получены следующим образом. Одновременно измерялись подводная облученность и показатель ослабления

© В.И. Маньковский, П.П. Шерстянкин, 2007

направленного света [4,5]. По данным измерений подводной облученности рассчитывался показатель поглощения с использованием соотношения, рекомендованного в работе [6]:

$$\kappa(\lambda) = 0,91\alpha(\lambda) \downarrow [1 - 2,9R(\lambda)], \quad (3)$$

где $\alpha(\lambda) \downarrow$ – показатель вертикального ослабления, $R(\lambda)$ – коэффициент диффузного отражения. Показатель рассеяния определялся по формуле $\sigma(480)_в = \varepsilon(480)_в - \kappa(480)_в$.

Второе соотношение выражает связь показателя ослабления $\varepsilon(480)$ с содержанием хлорофилла «а». По 27 измерениям ($r = 0,812$)

$$\lg C(\text{хл « а »}), \text{ мг/м}^3 = 2,38 \lg [\varepsilon(480)_в] + 0,68. \quad (4)$$

Алгоритм вычислений

Расчет начальных величин. Расчет спектральных величин показателя ослабления начинается с длины волны 480 нм, для которой задается показатель ослабления $\varepsilon(480)_в$ и определяются значения компонентов в формуле (1). Величина $\kappa(480)_{чв}$ берется из работы [7].

По формуле (4) определяется концентрация хлорофилла $C_{хл}$, мг/м³ и рассчитывается для него показатель поглощения $\kappa(480)_{хл} = C_{хл} \kappa(480)_{уд.хл}$ где $\kappa(480)_{уд.хл}$, м²/мг – удельное поглощение света хлорофиллом [8].

Сумма $\sigma(480)_{взв} + \sigma(480)_{чв} = \sigma(480)_в$ представляет собой показатель рассеяния водой. Величина $\sigma(480)_в$ рассчитывается по формуле (2).

Показатель поглощения желтым веществом $\kappa(480)_{жв}$ определяется из формулы (1) как остаточный член:

$$\kappa(480)_{жв} = \varepsilon(480)_в - \kappa(480)_{хл} - \kappa(480)_{чв} - \sigma(480)_в. \quad (5)$$

Спектральная изменчивость компонентов. Спектральные величины $\kappa(\lambda)_{чв}$ и $\kappa(\lambda)_{уд.хл}$ берутся соответственно из работ [7] и [8].

Показатель поглощения желтым веществом рассчитывается по формуле

$$\kappa(\lambda)_{жв} = \kappa(480)_{жв} \exp[-\mu(480 - \lambda)]. \quad (6)$$

Величина параметра спектральной изменчивости показателя поглощения света желтым веществом μ в диапазоне длин волн $\lambda \leq 500$ нм составляется 0,017, для $\lambda > 500$ нм – $\mu = 0,011$ [9].

Спектральная изменчивость показателя рассеяния света водой, согласно работе [3], задается формулой

$$\sigma(\lambda)_B = \sigma(\lambda)_{чв} + \sigma(\lambda)_M + \sigma(\lambda)_K = \\ = \sigma(480)_B \left[P(480)_{чв} \left(\frac{480}{\lambda} \right)^{4,3} + P(480)_M \left(\frac{480}{\lambda} \right)^{1,7} + P(480)_K \left(\frac{480}{\lambda} \right)^{0,3} \right], \quad (7)$$

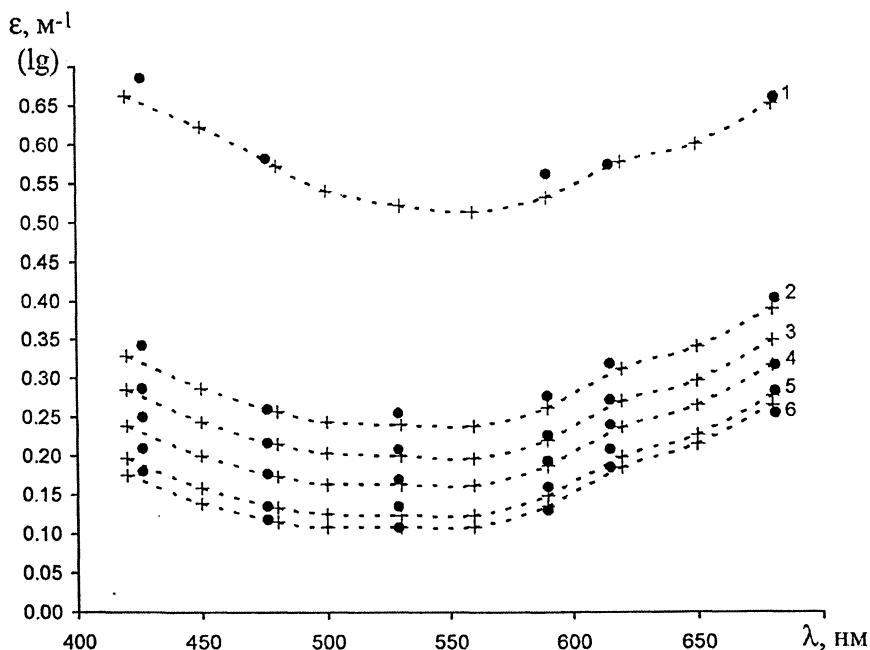
где $P(480)_{чв}$, $P(480)_M$, $P(480)_K$ – относительный вклад в рассеяние света чистой водой, мелкой и крупной взвесью на длине волны 480 нм. Параметр $P(480)_{чв} = \sigma(480)_{чв} / \sigma(480)_B$ задается с использованием теоретического значения $\sigma(480)_{чв}$ из [3]. Параметры $P(480)_M$ и $P(480)_K$ подбираются методом наименьших отклонений модельного спектра от измеренного.

Результаты. Для верификации модели взято шесть спектров, измеренных на Байкале в летний период прозрачномером [5] в диапазоне длин волн 426 – 681 нм. Четыре спектра (по два соответственно) измерены на глубинах 5 и 25 м, два спектра – на 150 и 470 м. Показатель ослабления $\varepsilon(480)_B$ изменялся в этих спектрах от 0,118 до 0,580 м⁻¹.

Результаты моделирования в сравнении с натурными измерениями представлены на рисунке и в табл. 1. В таблице даны также значения параметра интегральной спектральной изменчивости рассеяния света водой n :

$$\sigma(\lambda_1)_s / \sigma(\lambda_2)_s = (\lambda_2 / \lambda_1)^n \quad (8)$$

В табл. 2 приведен вклад отдельных компонентов в ослабление света водой по модельным расчетам.



Модельные спектры (+) показателя ослабления ε в сравнении с измеренными: 1 – ст. 10-3, $H = 5$ м; 2 – ст. 11-3, $H = 5$ м; 3 – ст. 10-2, $H = 25$ м; 4 – ст. 12-3, $H = 25$ м; 5 – ст. 12-3, $H = 150$ м; 6 – ст. 10-5, $H = 470$ м

Обсуждение. Рисунок и табл. 1 показывают, что модельные спектры хорошо отображают измеренные как в поверхностных, так и в глубинных водах. Относительное среднеквадратичное отклонение моделей от натурн варьирует в пределах 3,3...7,1%. Относительные отклонения $\Delta\varepsilon$ в отдельных точках для всех спектров не превышают 10,9%.

Т а б л и ц а

**Измеренные и рассчитанные по модели
спектральные величины показателя ослабления света ε**

λ , нм	Ст. 10-3, $H = 5$ м, $C_{\text{хл}} = 1,266$ мг/м ³ , $n = 0,45$			Ст. 11-3, $H = 5$ м, $C_{\text{хл}} = 0,189$ мг/м ³ , $n = 0,45$			Ст. 10-2, $H = 25$ м, $C_{\text{хл}} = 0,123$ мг/м ³ , $n = 0,60$		
	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %
426	0,685	0,653	-4,7	0,342	0,319	-6,7	0,287	0,275	-4,2
476	0,581	0,576	-0,9	0,261	0,260	-0,4	0,218	0,217	-0,5
529	-	0,523	-	0,255	0,241	-5,5	0,209	0,200	-4,3
590	0,562	0,531	-5,5	0,277	0,263	-5,1	0,228	0,221	-3,1
615	0,573	0,579	+1,0	0,319	0,315	-1,3	0,273	0,273	+0,0
681	0,660	0,652	-1,2	0,403	0,392	-2,7	-	0,351	-
СКО = 3,7 %			СКО = 4,7 %			СКО = 3,4 %			
λ , нм	Ст. 12-3, $H = 25$ м, $C_{\text{хл}} = 0,075$ мг/м ³ , $n = 0,60$			Ст. 12-3, $H = 150$ м, $C_{\text{хл}} = 0,000$ мг/м ³ , $n = 0,90$			Ст. 10-5, $H = 470$ м, $C_{\text{хл}} = 0,000$ мг/м ³ , $n = 0,90$		
	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %	$\varepsilon_{\text{изм}}$, м ⁻¹	$\varepsilon_{\text{мод}}$, м ⁻¹	$\Delta\varepsilon$, %
426	0,251	0,229	-8,8	0,211	0,188	-10,9	0,181	0,172	-5,0
476	0,177	0,177	+0,0	0,136	0,136	+0,0	0,118	0,118	+0,0
529	0,170	0,163	-4,1	0,135	0,124	-8,1	0,108	0,108	+0,0
590	0,193	0,187	-3,1	0,160	0,148	-7,5	0,130	0,135	+0,4
615	0,240	0,240	-0,0	0,208	0,201	-3,4	0,185	0,188	+1,6
681	0,318	0,319	+0,3	0,284	0,280	-1,4	0,255	0,268	+5,1
СКО = 4,6 %			СКО = 7,1 %			СКО = 3,3 %			

П р и м е ч а н и е. $\Delta\varepsilon = [(\varepsilon_{\text{мод}} - \varepsilon_{\text{изм}})/\varepsilon_{\text{изм}}] \cdot 100$ – отклонение модельных величин от измеренных; СКО – среднеквадратичное отклонение.

Т а б л и ц а 2

**Вклад различных факторов в ослабление направленного света водой
по данным моделирования**

Ст. 10-3, $H = 5$ м, $C_{\text{хл}} = 1,266$ мг/м ³								
λ , нм	Вклад в $\varepsilon(\lambda)$, %						Λ	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
	$K_{\text{чв}}$	$K_{\text{жв}}$	$K_{\text{хл}}$	$\sigma_{\text{чв}}$	$\sigma_{\text{м}}$	$\sigma_{\text{к}}$		
420	0,3	12,1	6,1	0,3	11,1	70,1	0,82	0,662
450	0,6	7,7	7,7	0,2	10,6	73,2	0,84	0,622
480	1,0	5,0	5,5	0,2	10,3	78,0	0,88	0,572
500	1,6	3,8	2,6	0,2	10,2	81,7	0,92	0,540
530	3,6	2,8	1,0	0,1	9,5	83,0	0,93	0,522
560	5,3	2,1	0,6	0,1	8,8	83,1	0,92	0,513
590	11,1	1,4	0,7	0,1	7,8	78,9	0,87	0,531
620	20,0	1,0	0,7	0,1	6,6	71,7	0,78	0,576
650	24,7	0,7	0,7	<0,1	5,9	68,0	0,74	0,599
680	31,1	0,4	1,7	<0,1	5,0	61,7	0,67	0,651
Ст. 11-3, $H = 5$ м, $C_{\text{хл}} = 0,189$ мг/м ³								
420	0,6	28,5	1,8	0,5	8,8	59,8	0,69	0,329
450	1,4	19,6	2,5	0,4	8,9	67,2	0,76	0,287
480	2,1	13,2	1,8	0,4	8,9	73,6	0,83	0,257
500	3,6	9,9	0,9	0,4	8,8	76,4	0,86	0,244
530	7,9	7,2	0,3	0,3	8,1	76,3	0,85	0,241
560	11,3	5,2	0,2	0,2	7,4	75,7	0,83	0,239
590	22,4	3,4	0,2	0,2	6,2	67,7	0,74	0,263
620	36,8	2,1	0,2	0,1	4,8	56,1	0,61	0,312
650	43,5	1,4	0,2	0,1	4,0	50,8	0,55	0,340
680	51,8	0,9	0,4	<0,1	3,3	43,6	0,47	0,390
Ст. 10-2, $H = 25$ м, $C_{\text{хл}} = 0,123$ мг/м ³								
420	0,7	31,5	1,4	0,6	17,1	48,7	0,66	0,285
450	1,6	22,2	1,9	0,5	17,9	55,9	0,74	0,244
480	2,6	15,1	1,4	0,4	18,2	62,3	0,81	0,215
500	4,3	11,5	0,7	0,4	18,0	65,2	0,84	0,203
530	9,5	8,5	0,3	0,3	16,5	65,0	0,82	0,200
560	13,6	6,1	0,2	0,3	15,2	64,7	0,80	0,197
590	26,5	3,9	0,2	0,2	12,4	56,8	0,69	0,221
620	42,5	2,3	0,2	0,1	9,3	45,7	0,55	0,271
650	49,6	1,5	0,1	0,1	7,8	40,9	0,49	0,298
680	58,0	0,9	0,3	0,1	6,2	34,5	0,41	0,349

Продолжение табл. 2 см. на стр. 44

Ст. 12-3, $H = 25$ м, $C_{\text{хл}} = 0,075$ мг/м ³								
λ , нм	Вклад в $\varepsilon(\lambda)$, %						Λ	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
	$K_{\text{чв}}$	$K_{\text{жв}}$	$K_{\text{хл}}$	$\sigma_{\text{чв}}$	$\sigma_{\text{м}}$	$\sigma_{\text{к}}$		
420	0,8	35,8	1,0	0,7	16,0	45,7	0,62	0,239
450	2,0	25,6	1,5	0,6	16,9	53,4	0,71	0,200
480	3,2	17,7	1,1	0,6	17,4	60,1	0,78	0,174
500	5,3	13,4	0,5	0,5	17,3	63,1	0,81	0,164
530	11,6	9,6	0,2	0,4	15,7	62,4	0,79	0,163
560	16,6	7,0	0,1	0,3	14,4	61,6	0,76	0,162
590	31,4	4,3	0,1	0,2	11,4	52,6	0,64	0,187
620	48,3	2,4	0,1	0,1	8,3	40,8	0,49	0,238
650	55,5	1,6	0,1	0,1	6,8	35,9	0,43	0,266
680	63,7	1,0	0,2	0,1	5,3	29,7	0,35	0,317
Ст. 12-3, $H = 150$ м, $C_{\text{хл}} = 0,000$ мг/м ³								
420	1,0	42,0	-	0,9	27,7	28,5	0,57	0,197
450	2,5	31,4	-	0,8	30,6	34,7	0,66	0,159
480	4,1	22,4	-	0,7	32,5	40,3	0,74	0,134
500	7,0	17,1	-	0,6	32,5	42,8	0,76	0,125
530	15,3	12,3	-	0,5	29,6	42,3	0,72	0,124
560	21,8	8,9	-	0,4	27,1	41,8	0,69	0,123
590	39,6	5,3	-	0,3	20,6	34,2	0,55	0,148
620	57,8	2,9	-	0,2	14,1	25,1	0,39	0,199
650	65,0	1,8	-	0,1	11,4	21,7	0,33	0,227
680	72,7	1,0	-	0,1	8,7	17,5	0,26	0,278
Ст. 10-5, $H = 470$ м, $C_{\text{хл}} = 0,000$ мг/м ³								
420	1,1	45,3	-	1,0	25,7	26,9	0,54	0,175
450	2,9	34,2	-	0,9	28,8	33,2	0,63	0,139
480	4,7	24,6	-	0,8	30,9	38,9	0,71	0,116
500	8,0	18,9	-	0,8	31,0	41,3	0,73	0,108
530	17,4	13,6	-	0,6	28,0	40,5	0,69	0,109
560	24,7	9,7	-	0,5	25,4	39,7	0,66	0,109
590	43,6	5,7	-	0,3	18,8	31,6	0,51	0,135
620	61,9	2,9	-	0,2	12,5	22,5	0,35	0,186
650	68,8	1,8	-	0,1	10,0	19,2	0,29	0,215
680	76,1	1,1	-	0,1	7,5	15,3	0,23	0,266

Примечание. $\Lambda(\lambda) = \sigma(\lambda)_{\text{в}} / \varepsilon(\lambda)_{\text{в}}$ – вероятность выживания фотона.

Для вод в поверхностных слоях параметр спектральной изменчивости рассеяния света $n = 0,45$ ($H = 0$ м) и $n = 0,60$ ($H = 25$ м), для глубинных вод $n = 0,90$. Такая изменчивость параметра n свидетельствует об увеличении вклада мелкой взвеси в общее рассеяние в более глубоких водах (см. табл. 2). Это характерно для глубинных вод, так как осаждающиеся из эвфотической зоны органические частицы (отмершие клетки фитопланктона, фрагменты зоопланктона) постепенно распадаются и растворяются. У минеральных частиц (мелкая взвесь) этот процесс идет медленнее.

Для сравнения полученных нами данных о спектральном вкладе отдельных компонентов в ослабление света в водах Байкала с аналогичными данными о других пресноводных водоемах мы не нашли в литературе соответствующих сведений. В связи с этим было проведено сравнение с моделью $\varepsilon(\lambda)_в$ для поверхностных прибрежных вод ($H < 100$ м) Тихого океана [3; табл. 8.12].

Данные для модели из работы [3] приведены в табл. 3. Сравнение с байкальским модельным спектром (табл. 2, ст. 11-3, $H = 5$ м), имеющим близкие величины показателя ослабления, показывает в целом такие же соотношения во влиянии компонентов воды на ослабление света. Подобен спектральный ход показателей ослабления; положения минимума показателя ослабления ε и максимума параметра Λ (вероятность выживания фотона) совпадают. Близки величины Λ в максимуме: $\Lambda = 0,86$ – байкальский спектр, $\Lambda = 0,92$ – тихоокеанский спектр. Основной вклад в рассеяние света водой (величины в обоих случаях практически одинаковы) вносит крупная (органическая) взвесь, что подтверждается высокими концентрациями хлорофилла в этих водах. Различия во вкладах желтого вещества и мелкой взвеси в показатель ослабления можно объяснить региональными особенностями состава воды в сравниваемых водоемах.

Т а б л и ц а 3

Роль различных факторов в ослаблении направленного света в прибрежных водах Тихого океана ($H < 100$ м, $C_{хл} = 0,51$ мг/м³) по данным моделирования в работе [3]

λ , нм	Вклад в $\varepsilon(\lambda)$, %					Λ	$\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
	$K_{чв}$	$K_{жв}$	$K_{хл}$	σ_m	σ_k		
390	1,4	20,0	3,0	17,0	59,0	0,77	0,374
430	1,0	12,0	5,0	17,0	65,0	0,82	0,330
470	0,7	8,0	5,0	16,0	71,0	0,88	0,296
510	2,0	5,0	1,4	16,0	76,0	0,92	0,265
550	6,0	3,0	0,5	14,0	77,0	0,91	0,261
590	21,0	1,0	0,5	11,0	66,0	0,77	0,296
670	40,0	0,3	2,5	7,0	51,0	0,58	0,370

Закключение. Основные результаты проведенного исследования следующие.

Разработана полуэмпирическая спектральная модель показателя ослабления направленного света в водах Байкала. Модельные спектры для вод различной прозрачности хорошо согласуются с натурными спектрами измеренными как в поверхностных, так и в глубинных водах.

По модельным спектрам рассчитан спектральный вклад отдельных компонентов в показатель ослабления направленного света в байкальских водах. Проведено сравнение с аналогичными показателями, полученными модели для прибрежных вод Тихого океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sherstyankin P.P.* On the transparency of water of Lake Baikal // XIV Pacific Science Congress Symp. «Origin, limnology, flora and fauna of Lake Baikal». – Moscow, 1979. – P. 36 – 37.
2. *Карабашев Г.С., Кулешов А.Ф., Шерстянкин П.П.* Спектральная прозрачность Байкальских вод в ультрафиолетовой и видимой частях спектра // Докл. АН СССР. 1989. – 306, № 5. – С. 1091 – 1094.
3. *Копелевич О.В.* Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. – М.: Наука, 1983. – С. 208–235.
4. *Вайнерман Б.А., Неуймин Г.Г.* Прибор для измерения подводной облученности / Экспериментальные методы исследования океана. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1978. – С. 144 – 150.
5. *Ли М.Е.* Логарифмический фотометр-прозрачномер для видимой и ближней ультрафиолетовой областей спектра // Тр. МГИ АН УССР. – Севастополь, 1969. – Т. 41. – С. 180 – 189.
6. *Левин И.М., Николаев В.П.* Новый метод определения спектральных значений показателя поглощения и параметра вытянутости индикатрисы рассеяния света водой / Океанология. – 1992. – 32, вып. 6. – С. 1145 – 1150.
7. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380 – 700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36, № 33. – P. 8710 – 8723.
8. *Карабашев Г.С.* Пигменты фитопланктона // Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Мони́на. – М.: Наука, 1983. – С. 163 – 166.
9. *Kopelevich O.V., Ershova S.V.* Model for seawater optical characteristics at UV spectral region // Ocean Optics XIII (Halifax, Canada, October 1996). – Halifax SPIE, 1996. – 2963. – P. 167 – 172.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
Лимнологический институт Сибирского отделения РАН,
Иркутск

Материал поступил
в редакцию 12.05.06

ABSTRACT Results of development of the spectral model (the band is 420-680 nm) of the directed light attenuation index in the Baikal waters in summer are represented. The model is based on two empirical relations defined for the lake waters using experimental data: the ratio of the attenuation index on the wavelength 480 nm to the dissipation one and to the chlorophyll concentration. Verification of the model spectra shows their good agreement with those measured in the lake waters of various transparency. The model spectra permit to calculate spectral contribution of some components to the attenuation index at its various values.