

# ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОГО ВКЛАДА КОМПОНЕНТОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ В ПОКАЗАТЕЛЬ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА ДЛЯ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

*Е.В. Маньковская, В.И. Маньковский*

Морской гидрофизический институт НАНУ  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: Lee@alpha.mhi.iuf.net

*Разработана информационная технология расчета спектрального вклада компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света (ПОС) для вод Черного моря. Информационная технология позволяет построить модельный спектр ПОС и рассчитать спектральные вклады желтого вещества, хлорофилла, мелкой и крупной взвеси в ПОС.*

**Введение.** При проведении оптических мониторингов природных водоемов широко используются измерения показателя ослабления направленного света.

ПОС является важной оптической характеристикой, содержащей информацию о состоянии водной среды. Его величина зависит от содержания в воде оптически активных веществ: взвесь, хлорофилл, растворенные органические соединения (желтое вещество). Многие задачи, связанные с оценкой состояния морской среды, требуют

знания вклада данных компонентов в ПОС в различных участках спектра.

Инструментальное измерение всех спектральных составляющих ПОС в принципе возможно, однако такая методика трудоемка и связана с использованием сложной аппаратуры. В связи с этим применяются более простые, комбинированные, методы, в которых часть компонентов измеряется, а другие рассчитываются теоретически. Информационная технология (ИТ), реализующая подобный метод расчета спектральных компонентов ПОС для поверхностных вод глубоководных районов Черного моря, и представляется в данной работе.

**Методика.** Для реализации данной информационной технологии используются:

- измерения показателя ослабления направленного света в разных участках видимой области спектра;
- эмпирические зависимости для поверхностных вод глубинных районов Черного моря: между ПОС и показателем рассеяния света и между ПОС и концентрацией хлорофилла;
- закономерности спектральной изменчивости компонентов ПОС.

ИТ строится на основе общепринятой спектральной модели ПОС (здесь и далее показатели в десятичных логарифмах, lg)

$$\varepsilon(\lambda)_{\text{мв}} = \kappa(\lambda)_{\text{чв}} + \kappa(\lambda)_{\text{жв}} + \kappa(\lambda)_{\text{хл}} + \sigma(\lambda)_{\text{взв.м}} + \sigma(\lambda)_{\text{взв.кр}} + \sigma(\lambda)_{\text{чв}},$$

где  $\varepsilon(\lambda)_{\text{мв}}$  – показатель ослабления света морской водой;  $\kappa(\lambda)_{\text{чв}}$ ,  $\kappa(\lambda)_{\text{жв}}$ ,  $\kappa(\lambda)_{\text{хл}}$  – показатели поглощения чистой водой, желтым веществом, хлорофиллом;  $\sigma(\lambda)_{\text{взв.м}}$ ,  $\sigma(\lambda)_{\text{взв.кр}}$ ,  $\sigma(\lambda)_{\text{чв}}$  – показатели рассеяния мелкой, крупной взвесью и чистой водой. Поглощение света взвесью не включено в данное выражение, т. к. считается, что оно незначительно [1].

Исходной точкой для расчетов является длина волны 527 нм, для которой, используя эмпирические соотношения и известные табличные данные о величинах  $\kappa(527)_{\text{чв}}$  [2] и  $\kappa(527)_{\text{уд.хл}}$  [1], определяются значения всех компонентов спектральной модели ПОС.

Показатель поглощения света хлорофиллом рассчитывается по формуле

$$\kappa(527)_{\text{хл}} = C_{\text{хл}} \kappa(527)_{\text{уд.хл}},$$

где  $C_{\text{хл}}$  – концентрация хлорофилла, мг/м<sup>3</sup>;  $\kappa(527)_{\text{уд.хл}}$  – удельное поглощение света хлорофиллом, м<sup>2</sup>/мг. Концентрация хлорофилла определяется из эмпирического соотношения, установленного для вод Черного моря

$$C_{\text{хл}} = 1,698\varepsilon(527)_{\text{мв}} - 0,0383.$$

Сумма компонентов рассеяния  $\sigma(527)_{\text{взв.м}} + \sigma(527)_{\text{взв.кр}} + \sigma(527)_{\text{чв}}$  представляет собой суммарный показатель рас-

сеяния морской водой  $\sigma(527)_{\text{мв}}$ . Для его определения используется соотношение из [3]

$$\sigma(527)_{\text{мв}} = 0,98\varepsilon(527)_{\text{мв}} - 0,0315.$$

В работе [3] данное соотношение получено для длины волны 525 нм, однако расчет,

$$\kappa(527)_{\text{жв}} = \varepsilon(527)_{\text{мв}} - \kappa(527)_{\text{чв}} - \kappa(527)_{\text{хл}} - \sigma(527)_{\text{мв}}.$$

Далее от длины волны 527 нм ведется расчет компонентов по всему спектру, используя закономерности их спектральной изменчивости. Для показателя поглощения желтым веществом

$$\kappa(\lambda)_{\text{жв}} = \kappa(527)_{\text{жв}} \exp(-\mu(\lambda - 527)),$$

где, коэффициент  $\mu = 0,017$  в диапазоне длин волн  $\lambda < 500$  нм и  $\mu = 0,011$

$$\begin{aligned} \sigma(\lambda)_{\text{мв}} &= \sigma(\lambda)_{\text{чв}} + \sigma(\lambda)_{\text{взв.м}} + \sigma(\lambda)_{\text{взв.кр}} = \\ &= \sigma(527)_{\text{мв}} \left[ P(527)_{\text{чв}} \left( \frac{527}{\lambda} \right)^{4,3} + P(527)_{\text{взв.м}} \left( \frac{527}{\lambda} \right)^{1,7} + P(527)_{\text{взв.кр}} \left( \frac{527}{\lambda} \right)^{0,3} \right], \end{aligned}$$

где  $P(527)_{\text{чв}}$ ,  $P(527)_{\text{взв.м}}$ ,  $P(527)_{\text{взв.кр}}$  – относительные вклады в суммарное рассеяние чистой водой, мелкой и крупной взвесью на длине волны 527 нм;  $P(527)_{\text{чв}} + P(527)_{\text{взв.м}} + P(527)_{\text{взв.кр}} = 1$ .

Параметр вклада чистой воды  $P(527)_{\text{чв}} = \sigma(527)_{\text{чв}} / \sigma(527)_{\text{мв}}$  вычисляется с использованием значения показателя рассеяния чистой водой  $\sigma(527)_{\text{чв}} = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1} (\text{lg})$ , взятого из [1, табл. 6.2] и считающегося в гидрооптике постоянным.

Параметр вклада мелкой взвеси  $P(527)_{\text{взв.м}}$ , и соответственно параметр вклада крупной взвеси  $P(527)_{\text{взв.кр}} = 1 - P(527)_{\text{взв.м}} - P(527)_{\text{чв}}$ ,

определяется по данным измеренного спектра ПОС путем минимизации выражения

$$f = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\varepsilon(\lambda)_{\text{мв.экс}} - \varepsilon(\lambda)_{\text{мв.мод}}]^2 \text{ на всем}$$

спектральном диапазоне ( $\varepsilon(\lambda)_{\text{мв.экс}}$  – экспериментальные значения ПОС,  $\varepsilon(\lambda)_{\text{мв.мод}}$  – модельные значения ПОС).

выполненный с учетом спектральной изменчивости  $\varepsilon(\lambda)_{\text{мв}}$  в водах Черного моря, показывает, что такое соотношение справедливо и для длины волны 527 нм.

Величина  $\kappa(\lambda)_{\text{жв}}$  определяется как остаточный член в выражении спектральной модели ПОС

для  $\lambda \geq 500$  нм [4].

Спектральные показатели поглощения хлорофиллом вычисляются по формуле

$$\kappa(\lambda)_{\text{хл}} = C_{\text{хл}} \kappa(\lambda)_{\text{уд.хл}}.$$

Спектральная изменчивость показателя рассеяния света морской водой, согласно спектральной модели из [1], задается выражением

**Результаты.** Верификация информационной технологии проводилась на основе данных измерений ПОС в Черном море в 1991-1998 гг. Общее число экспериментальных спектров ПОС составило 170. Измерения выполнены в 13 участках видимой области спектра: 416, 432, 468, 490, 506, 527, 547, 567, 587, 610, 625, 640, 677 нм лабораторным автоколлимационным прозрачномером [5].

Из экспериментальных спектров были отобраны спектры с диапазоном изменения ПОС на длине волны 527 нм  $0,11 \div 0,27 \text{ м}^{-1} (\text{lg})$  и проведено их осреднение с шагом  $0,02 \text{ м}^{-1} (\text{lg})$ . Таким образом было получено восемь осредненных спектров ПОС, представляющих собой разные типы поверхностных вод глубоководных районов Черного моря.

Данные спектры были обработаны с помощью разработанной ИТ, и впервые для Черного моря получены оценки спектральных вкладов веществ (желтого в-ва, хлорофилла, мелкой и крупной взвеси) в показатель ослабления света для разных типов вод Черного моря.

На рисунке 1 приведены измеренный и модельный спектры ПОС и его спектральные компоненты, рассчитанные с использованием разработанной ИТ. Для данного случая среднеквадратичное отклонение модельного спектра от измеренного составило  $0,00688 \text{ м}^{-1}$ .

В таблице 1 и на рисунке 2 приведены спектральные вклады компонентов морской воды в показатель ослабления для спектра, представленного на рисунке 1.

Рассчитанные значения спектрального вклада мелкой и крупной взвеси и молекулярного рассеяния (рассеяния чистой водой) в общий показатель рассеяния морской водой, с учетом типа индикатрис рассеяния света в водах Черного моря, показали хорошее согласие с данными модельных расчетов рассеяния света для разных типов морских индикатрис, приводимых в [1].

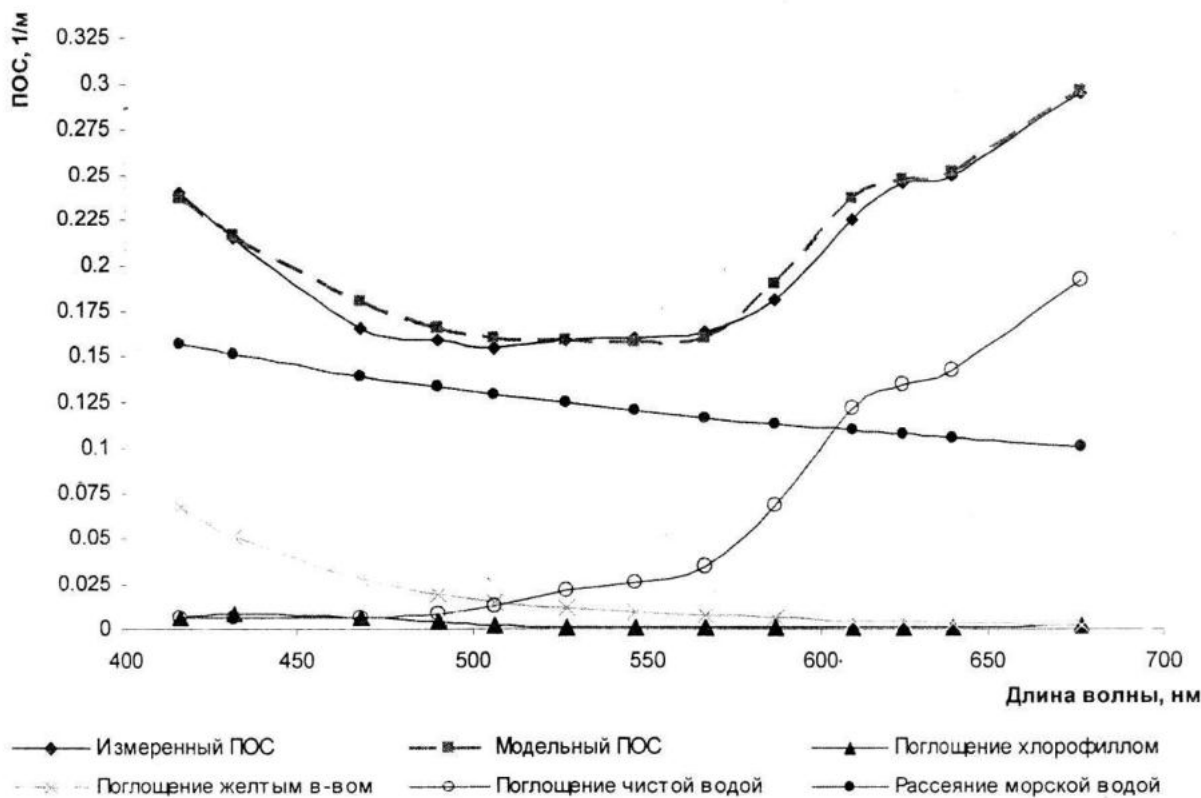


Рисунок 1 – Показатель ослабления света и его спектральные компоненты

Таблица 1 – Спектральный вклад (%) компонентов морской воды в ПОС

$\lambda$ , нм	416	432	468	490	506	527	547	567	587	610	625	640	677
ПОС <sub>эксп.</sub> , 1/м	0.240	0.215	0.166	0.160	0.155	0.160	0.160	0.164	0.181	0.225	0.246	0.250	0.296
ПОС <sub>мод.</sub> , 1/м	0.239	0.218	0.181	0.167	0.161	0.160	0.158	0.160	0.190	0.237	0.248	0.253	0.298
Хлорофилл	2.88	3.89	3.50	2.66	1.29	0.63	0.43	0.41	0.37	0.29	0.28	0.29	0.77
Желтое в-во	28.40	23.71	15.49	11.58	9.48	7.57	6.14	4.86	3.30	2.04	1.66	1.38	0.78
Чистая вода (поглощение)	2.85	2.98	3.81	5.46	8.46	13.52	16.90	21.69	36.34	51.27	54.56	56.50	64.42
Взвесь мелк.	32.45	33.35	35.07	35.25	34.60	32.49	30.82	28.56	22.78	17.05	15.65	14.73	11.39
Взвесь крупн.	32.49	35.21	41.40	44.39	45.57	45.29	45.28	44.12	36.94	29.17	27.70	26.96	22.55
Чистая вода (рассеяние)	0.93	0.86	0.74	0.66	0.59	0.50	0.43	0.36	0.27	0.18	0.15	0.14	0.09

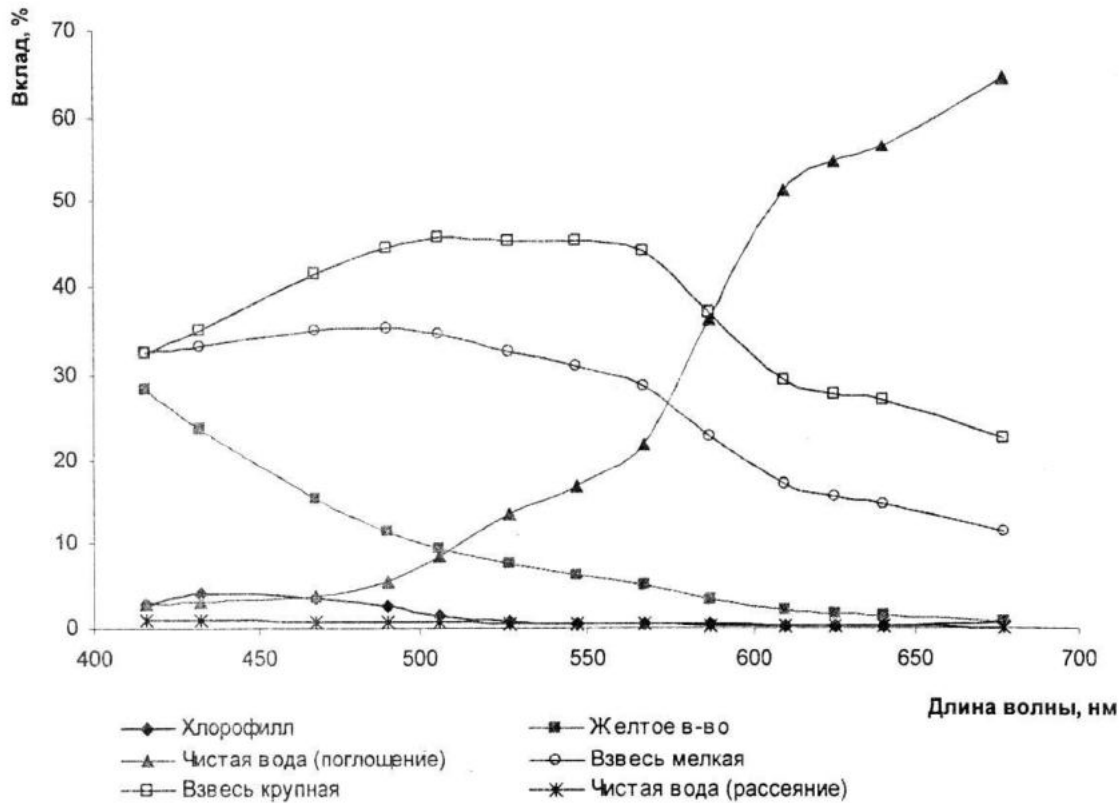


Рисунок 2 – Спектральный вклад компонентов

**Заключение.** Разработанная информационная технология позволяет построить модельный спектр показателя ослабления направленного света на основе данных измерений спектральных значений ПОС для поверхностных вод глубоководных районов Черного моря. По модельному спектру ПОС информационная технология позволяет рассчитать спектральный вклад отдельных компонентов морской воды в ПОС. При этом общий вклад рассеяния взвесью в ПОС разделяется на отдельные вклады рассеяния мелкой (минеральной) и крупной (органической) взвесью.

Таким образом, ИТ может использоваться для получения данных о составе морской воды, для оперативной оценки экологической обстановки, а также в составе информационных систем для мониторинга вод Черного моря.

В дальнейшем предполагается разработать ИТ расчета спектральных вкладов компонентов морской среды в ПОС без использования эмпирических зависимостей между биооптическими характеристиками. В таком случае ИТ может найти более широкое применение для других водоемов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оптика океана. Т.1 Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. – М.: Наука, 1983. – Гл. 6–8. – 371 с.
2. R.C. Smith, K.S. Baker. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Appl. Opt.* – 1980. – V. 20. – № 2. – P. 177–186.
3. В.И. Маньковский. Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – Севастополь: МГИ НАНУ. – 2005. – № 6. – С. 68–76.
4. O.V. Kopelevich, S.V. Ershova. Model of seawater optical characteristics at UV spectral region // *Ocean optics XIII / Proc. SPIE* 2963. – 1997. – P. 167–172.
5. В.И. Маньковский, М.Н. Кайгородов. Лабораторный автоколлимационный прозачномер с переменной базой // *Автоматизация научных исслед. морей и океанов, 5-я всесоюзная школа.* – Севастополь: МГИ АН УССР. – 1980. – С. 91–92.