

Е.В.Маньковская, Е.Н.Корчёмкина

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ  
ПО ЭФФЕКТИВНОЙ ДЛИНЕ ВОЛНЫ ВОСХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Предлагается метод дистанционного определения концентрации взвеси в морской воде по эффективной длине волны восходящего излучения. Найдена система ортогональных функций, позволяющая по двум измерениям в зеленой части видимого диапазона восстанавливать спектр коэффициента яркости моря. Приведены и проанализированы эмпирические соотношения для вод Черного моря, связывающие эффективную длину волны с концентрацией взвеси.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *взвесь, дистанционное зондирование, коэффициент яркости, система ортогональных функций, эффективная длина волны.*

Информативным параметром для определения концентрации взвеси в поверхностном слое моря может быть эффективная длина волны для спектра яркости моря  $\lambda_{эфф}$ . Соответствующие соотношения получены, например, в работах [1 – 3].

Эффективная длина волны восходящего излучения  $\lambda_{эфф}$  определяется как средневзвешенная на длину волны спектральная яркость излучения моря

$$\lambda_{эфф} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda B \uparrow(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B \uparrow(\lambda) d\lambda}.$$

Для ее расчета необходимо знать спектральные значения яркости восходящего излучения во всем видимом диапазоне.

В случае дистанционного определения  $\lambda_{эфф}$  значения  $B \uparrow(\lambda)$  можно получить по данным спутниковых сканеров цвета океана, например, *SeaWiFS* и *MODIS-Aqua* (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Однако количество спектральных каналов, в которых ошибки атмосферной коррекции минимальны, у этих сканеров мало: 2 канала у *SeaWiFS* и 3 канала у *MODIS-Aqua*. Такое количество величин  $B \uparrow(\lambda)$  для расчета  $\lambda_{эфф}$  недостаточно.

Решением проблемы может быть построение системы ортогональных функций путем расчета ковариационной матрицы и ее собственных векторов для массива измеренных спектров яркости восходящего излучения. Такая система функций позволит восстанавливать спектральные значения яркости восходящего излучения по спутниковым значениям этой величины лишь в двух-трех каналах. Результаты решения указанной задачи рассматриваются в настоящей работе.

**Данные.** Измерения коэффициента яркости моря проводились на океанографической платформе Морского гидрофизического института НАН Украины (Южный берег Крыма, 44°23' с.ш., 33°59' в.д.) в 2002, 2003, 2004, 2008 и 2010 гг. с помощью разработанного в лаборатории отдела оптики

моря МГИ НАН Украины спектрофотометра [4]. Прибор измеряет в диапазоне длин волн 390 – 700 нм с дискретностью 5 нм спектральную яркость восходящего из моря излучения, которая нормируется на спектральную облученность поверхности моря. Измеряются также коэффициенты яркости излучения, отраженного поверхностью моря, которые вычитаются из спектров общего коэффициента яркости моря, и таким образом определяются коэффициенты яркости водной толщи

$$\rho_w = \rho_{sea} - \rho_{surf} \cdot \quad (1)$$

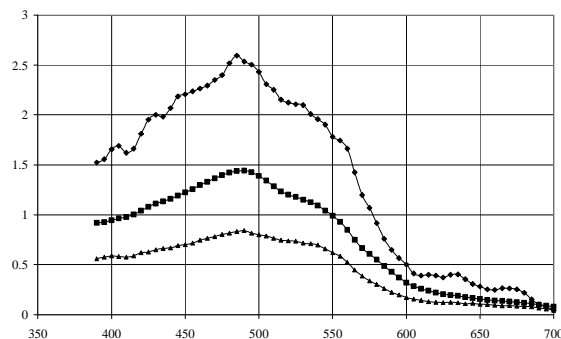
В табл.1 приведены данные о количестве и времени проведения измерений. На рис.1 показаны спектры коэффициента яркости с наибольшими и наименьшими значениями в максимуме  $\rho_{max}$ , а также осредненный спектр.

Для определения концентрации взвеси были использованы данные измерений глубины видимости белого диска и показателя ослабления направленного света, полученные на океанографической платформе МГИ НАНУ в то же время, что и измерения коэффициента яркости моря. Эти величины концентрации взвеси в работе названы экспериментально определенными.

Глубина видимости белого диска  $Z_\sigma$  измерялась в 2002, 2003 и 2004 гг. Концентрация взвеси (в мг/л) определялась по формуле из [5]:

Т а б л и ц а 1 . Даты и количество измерений коэффициента яркости.

даты	количество измерений	пределы изменения $\rho_{max}$
28 июля – 15 августа 2002 г.	91	0,96 – 1,34 %
18 – 29 июля 2003 г.	75	1,0 – 1,4 %
31 августа – 13 сентября 2004 г.	41	1,1 – 1,4 %
4 – 21 июля 2007 г.	70	1,5 – 2,5 %
4 – 13 октября 2007 г.	44	0,84 – 1,49 %
9 – 13 сентября 2008 г.	14	1,6 – 2,6 %
11 – 17 августа 2010 г.	34	1,44 – 2,02 %
23 – 28 сентября 2010 г.	36	0,97 – 1,4 %



Р и с . 1 . Осредненный спектр коэффициента яркости моря (■), спектры с наименьшим (▲) и наибольшим (◆) значениями в максимуме.

$$C_{\text{взв}} = 4,59Z_{\sigma}^{-0,85}. \quad (2)$$

Показатель ослабления направленного света  $\varepsilon$  измерялся лабораторным прозрачномером [6] в 2008 и 2010 гг. Концентрация взвеси (в мг/л) рассчитывалась по показателю ослабления в красной области спектра ( $\lambda = 640$  нм) по формуле из работы [7]:

$$C_{\text{взв}} = 3,4\varepsilon(640) - 0,42. \quad (3)$$

Показатель ослабления в (3) берется при десятичном основании.

**Система ортогональных векторов.** Для массива измеренных коэффициентов яркости рассчитаны матрица ковариации  $R[\rho(\lambda_i), \rho(\lambda_j)]$  и ее собственные числа и векторы. Проведено разложение функции  $\rho(\lambda_i)$  по ортогональным векторам:

$$\rho(\lambda_i) = \langle \rho(\lambda_i) \rangle + \sum_{k=1}^n C_k \Psi_k(\lambda_i), \quad (4)$$

где  $\langle \rho(\lambda_i) \rangle$  – средние значения коэффициента яркости,  $\Psi_k(\lambda_i)$  – собственные векторы ковариационной матрицы,  $C_k$  – собственные числа,  $i = 1, \dots, n$ . В табл.2 приведены значения  $\langle \rho(\lambda_i) \rangle$  и двух первых собственных векторов, которые вместе описывают 89 % относительной спектральной дисперсии коэффициента яркости.

Средняя по спектру ошибка представления коэффициента яркости  $m$  векторами была определена по формуле из [8]

$$E(m) = \frac{\sum_{k=m+1}^n C_k}{\sum_{k=1}^n C_k} \quad (5)$$

и составила 10 % для двух векторов, 4 % для трех векторов. Таким образом, с указанными ошибками могут быть восстановлены спектры коэффициентов яркости моря по данным спутниковых сканеров *SeaWiFS* (2 спектральных канала) и *MODIS-Aqua* (3 спектральных канала).

Поскольку дистанционные измерения в коротковолновой части видимого диапазона имеют большую погрешность вследствие неточностей атмосферной коррекции, для восстановления полного спектра предпочтительнее использовать значения на длинах волн в другой области спектра, например 490 и 555 нм (для сканера *SeaWiFS*). Восстановленный спектр рассчитывается по формуле

$$\rho(\lambda_i) = \langle \rho(\lambda_i) \rangle + k_1 \Psi_1(\lambda_i) + k_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (6)$$

где коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  определяются из следующих условий:

$$\begin{cases} \rho(490) = \langle \rho(490) \rangle + k_1 \Psi_1(490) + k_2 \Psi_2(490), \\ \rho(555) = \langle \rho(555) \rangle + k_1 \Psi_1(555) + k_2 \Psi_2(555). \end{cases} \quad (7)$$

Формулы для расчета  $k_1$  и  $k_2$  имеют следующий вид:

$$k_2 = \left( \Delta(555) - \frac{\Delta(490)\Psi_1(555)}{\Psi_1(490)} \right) : \left( \Psi_2(555) - \frac{\Psi_2(490)\Psi_1(555)}{\Psi_1(490)} \right), \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{\Delta(490) - \Psi_2(490)k_2}{\Psi_1(490)}, \quad (9)$$

где  $\Delta(490) = \rho(490) - \langle \rho(490) \rangle$ ,  $\Delta(555) = \rho(555) - \langle \rho(555) \rangle$ .

Таким образом, зная спектр коэффициента яркости с достаточной дискретностью, можно определить эффективную длину волны  $\lambda_{\text{эфф}}$ .

Т а б л и ц а 2. Средний спектр коэффициента яркости и два первых собственных вектора.

длина волны $\lambda$ , нм	$\langle \rho(\lambda) \rangle$ , %	СКО	$\Psi_1(\lambda)$	$\Psi_2(\lambda)$
390	0,666	0,101	0,135	- 0,054
400	0,700	0,111	0,153	- 0,034
410	0,741	0,114	0,158	- 0,027
420	0,792	0,109	0,155	- 0,038
430	0,857	0,107	0,152	- 0,067
440	0,902	0,114	0,164	- 0,052
450	0,960	0,113	0,164	- 0,061
460	1,019	0,115	0,164	- 0,092
470	1,076	0,115	0,156	- 0,138
480	1,125	0,115	0,149	- 0,161
490	1,153	0,114	0,137	- 0,176
500	1,142	0,117	0,142	- 0,171
510	1,089	0,109	0,148	- 0,104
520	1,033	0,105	0,154	- 0,027
530	1,008	0,102	0,148	- 0,032
540	0,973	0,102	0,139	- 0,040
550	0,905	0,099	0,137	0,015
560	0,821	0,103	0,138	0,077
570	0,721	0,105	0,137	0,137
580	0,620	0,101	0,125	0,149
590	0,503	0,101	0,115	0,182
600	0,395	0,104	0,104	0,216
610	0,329	0,099	0,090	0,218
620	0,284	0,093	0,083	0,204
630	0,251	0,079	0,069	0,175
640	0,228	0,072	0,062	0,157
650	0,205	0,065	0,058	0,140
660	0,185	0,059	0,054	0,119
670	0,173	0,056	0,050	0,114
680	0,166	0,057	0,047	0,112
690	0,156	0,059	0,049	0,118
700	0,147	0,062	0,048	0,126

**Определение концентрации взвеси.** В работах [1 – 3] получены следующие соотношения для определения общей концентрации взвеси в водах Черного моря по эффективной длине волны восходящего излучения:

$$1) \lg C_{\text{взв}} = 9,95 \cdot 10^{-3} \lambda_{\text{эфф}} - 5,12, \text{ где } C_{\text{взв}} \text{ измеряется в мг/л, } \lambda_{\text{эфф}} \text{ в нм.}$$

Районы измерений: Черное и Средиземное моря. Коэффициент корреляции 0,80, число точек  $n = 58$ , спектральный диапазон для расчета  $\lambda_{\text{эфф}}$  составляет 420 – 620 нм [1];

$$2) \lg C_{\text{взв}} = 3,63 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{эфф}} - 18,36, \text{ где } C_{\text{взв}} \text{ измеряется в мг/м}^3, \lambda_{\text{эфф}} \text{ в нм.}$$

Коэффициент корреляции 0,87, число точек  $n = 50$ ,  $461 \leq \lambda_{\text{эфф}} \leq 521$  нм [2]; Спектральный диапазон для расчета  $\lambda_{\text{эфф}}$  составляет 390 – 700 нм.

3)  $\lg C_{\text{взв}} = 2,05 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{эфф}} - 10,27$ , где  $C_{\text{взв}}$  в мг/л,  $\lambda_{\text{эфф}}$  в нм. Районы измерений: Черное море, Атлантический океан, Мексиканский залив. Коэффициент корреляции 0,87, число точек  $n = 24$ , средняя ошибка регрессии  $S_{y/x} = 0,17$ ,  $460 \leq \lambda_{\text{эфф}} \leq 536$  нм,  $0,099 \leq C_{\text{взв}} \leq 3,22$  мг/л, спектральный диапазон для расчета  $\lambda_{\text{эфф}}$  составляет 400 – 600 нм [3];

4)  $\lg C_{\text{взв}} = 2,19 \cdot 10^{-2} \lambda_{\text{эфф}} - 11,02$ , где  $C_{\text{взв}}$  в мг/л,  $\lambda_{\text{эфф}}$  в нм. Районы измерений: Черное море, Атлантический океан, Мексиканский залив. Коэффициент корреляции 0,86, число точек  $n = 24$ , средняя ошибка регрессии  $S_{y/x} = 0,20$ ,  $460 \leq \lambda_{\text{эфф}} \leq 536$  нм,  $0,099 \leq C_{\text{взв}} \leq 3,22$  мг/л, спектральный диапазон для расчета  $\lambda_{\text{эфф}}$  составляет 400 – 600 нм [3].

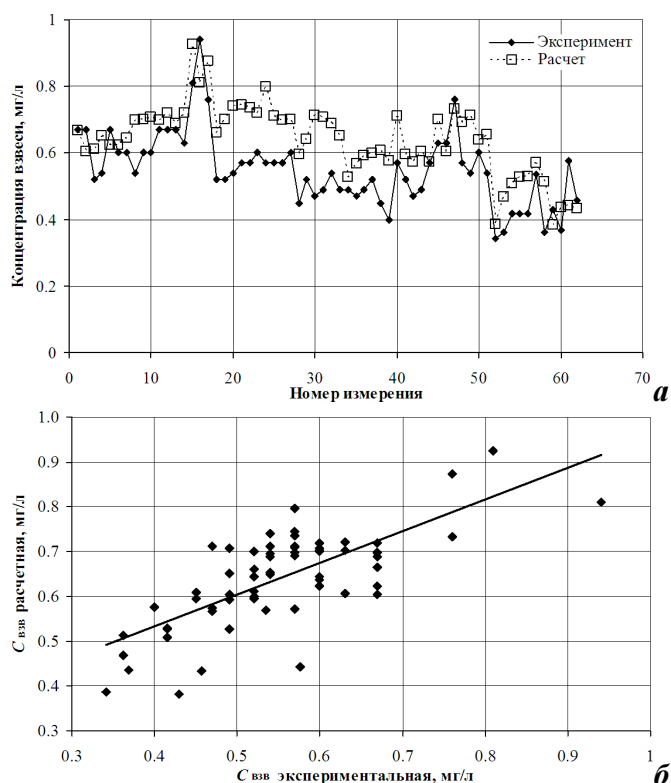
Для проверки указанных соотношений были использованы экспериментальные данные оптических измерений на океанографической платформе МГИ НАН Украины (всего 62 измерения). В табл.2 содержится информация по массиву  $\{C_{\text{взв}}, \lambda_{\text{эфф}}\}$ .

Наибольшее соответствие расчетных и экспериментальных значений получено в случае использования уравнения (4) из [3]. На рис.2 приведены временной ход и регрессия расчетных и экспериментальных значений концентрации взвеси  $C_{\text{взв}}$ . Максимальная относительная погрешность составляет 51,6 %, минимальная 0,4 %, средняя 20,1 %. Во многом такие значения погрешностей получены из-за косвенного определения, а не прямого измерения концентрации взвеси, а также не точного соответствия времени измерения спектра коэффициента яркости и времени измерения глубины видимости белого диска или показателя ослабления света.

Т а б л и ц а 2. Характеристика экспериментального материала.

год	количество измерений	диапазон изменения	
		$\lambda_{\text{эфф}}$ , нм	$C_{\text{взв}}$ , мг/л
2002	17	493 – 502	0,52 – 0,94
2003	22	490 – 499	0,40 – 0,60
2004	12	492 – 497	0,47 – 0,76
2008	7	484 – 492	0,34 – 0,54
2010	4	484 – 487	0,37 – 0,58

**Выводы.** На основе анализа большого массива данных натуральных измерений коэффициента яркости получена система ортогональных функций, позволяющая рассчитывать спектр коэффициента яркости с дискретностью 5 нм по измерениям в двух спектральных каналах. Это дает возможность использовать спутниковые данные в кана-



Р и с . 2. Сравнение расчетных и экспериментальных значений концентрации взвеси: временной ход (а), регрессия (б) ( $y = 0,71x + 0,25$ ;  $R^2 = 0,53$ ).

лах, наименее подверженных влиянию погрешностей атмосферной коррекции, для восстановления полного спектра коэффициента яркости, а также других характеристик, таких как эффективная длина волны.

Проанализированы известные из литературы эмпирические зависимости, связывающие концентрацию взвеси в морской воде с эффективной длиной волны. Показано, что формула из [3] наилучшим образом описывает временной ход концентрации взвеси, и ее можно применять при обработке данных натуральных измерений и их анализе. Возникающие погрешности можно частично объяснить тем, что концентрация не измерялась непосредственно, а была определена по измерениям глубины видимости белого диска и показателя ослабления света.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин Е.И., Крашенинникова М.А. Статистические связи между оптико-биологическими характеристиками вод и параметрами восходящего из моря излучения / Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / Под ред. В.А.Урденко, Г.Циммерманн.– Москва-Берлин-Севастополь: ИКИ АН ГДР, 1987.– т.2, ч.2.– С.57-80.

2. *Шемиура В.Е.* Оценка хлорофилла и сестона по цвету морских вод / Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы / Под ред. В.А.Урденко, Г.Циммерманн.– Москва-Берлин-Севастополь: ИКИ АН ГДР, 1987.– т.2, ч.2.– С.80-85.
3. *Шемиура В.Е., Владимиров В.Л.* Оценка концентрации взвеси в море по глубине видимости белого диска и спектрам восходящего излучения // *Океанология.*– 1989.– т.29, № 6.– С.946-950.
4. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.– С.163-173.
5. *Витюк Д.М.* Взвешенное вещество и его биогенные компоненты.– Киев: Наукова думка, 1983.– 210 с.
6. *Маньковский В.И., Кайгородов М.Н.* Лабораторный автоколлимационный прозрачномер с переменной базой // 5-я всесоюзная школа «Автоматизация научных исследований морей и океанов».– Севастополь: МГИ АН УССР, 1980.– С.91-92.
7. *Маньковский В.И., Соловьев М.В.* Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 2003.– № 2.– С.60-65.
8. *Principal manifolds for data visualization and dimension reduction. Lecture notes in computational science and engineering.*– Berlin-Heidelberg-New York, Springer, 2007.– 340 p.

Материал поступил в редакцию 25.11.2011 г.

**АНОТАЦІЯ.** Пропонується метод дистанційного визначення концентрації суспензії в морській воді по ефективній довжині хвилі висхідного випромінювання. Знайдена система ортогональних функцій, що дозволяє по двох вимірюваннях в зеленій частині видимого діапазону відновлювати спектр коефіцієнта яскравості моря. Приведені і проаналізовані емпіричні співвідношення для вод Чорного моря, що зв'язують ефективну довжину хвилі з концентрацією суспензії.

**ABSTRACT.** This paper proposes a method of remote determination of the suspended matter concentration in seawater on the effective wavelength of upwelling radiation. The system of orthogonal functions is found, allowing to recover reflectance of the sea using two measurements in the green part of the visible spectrum. Empirical relations linking the effective wavelength with the concentration of suspended matter for the Black Sea waters are presented and analyzed.