

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.463

В.И. Маньковский, Е.В. Маньковская

Использование биооптических связей для определения характеристик состояния морской среды при проведении оптического мониторинга вод Черного моря с применением прозрачномеров

Применительно к прозрачному, устанавливаемому в гидрометеорологическом комплексе, предназначенном для мониторинга прибрежных вод Черного моря, показана возможность определения ряда характеристик состояния морской среды по измерениям показателя ослабления направленного света в двух участках спектра – коротковолновом и длинноволновом. Для этого могут быть использованы биооптические связи, установленные по экспериментам, проводившимся в Черном море.

Введение. При проведении оптического мониторинга природных водоемов широко используются измерения показателя ослабления направленного света. Так, в МГИ НАН Украины (отдел автоматизации океанографических исследований) для целей мониторинга разработан комплекс оборудования «Бриз» для морской прибрежной гидрометеорологической станции, в составе которого имеется прозрачномер, измеряющий показатель ослабления направленного света в двух участках спектра – коротковолновом (467 нм) и длинноволновом (625 нм).

Показатель ослабления является важной оптической характеристикой, содержащей информацию о состоянии водной среды. Его величина зависит от содержания в воде оптически активных веществ: взвеси, хлорофилла, растворенных органических соединений (желтое вещество). Точные значения концентраций данных веществ на сегодняшний день определяются только в лабораторных условиях в пробах воды.

Рассчитать корректно теоретическим путем содержание указанных веществ по величинам показателя ослабления не представляется возможным. Для решения такой обратной задачи необходимо задание в соответствующих моделях параметров, которые заранее точно не известны. Поэтому для определения концентрации примесей в воде можно использовать эмпирические связи, установленные опытным путем. Кроме того, существуют экспериментально установленные связи показателя ослабления направленного света с рядом других гидрооптических характеристик, что также может быть использовано для получения дополнительной информации об оптическом состоянии водной среды.

В ряде опубликованных работ приведены эмпирические зависимости, полученные для вод Черного моря. В настоящей работе даются теоретические и экспериментальные обоснования этих связей в общем плане и применительно к водам Черного моря.

© В.И. Маньковский, Е.В. Маньковская, 2008

Отметим, что в приводимых далее формулах используются десятичные показатели рассеяния, поглощения и ослабления направленного света, что отмечается знаком lg.

Содержание веществ.

Взвесь. Величина показателя ослабления света водой $\varepsilon(\lambda)_в$ определяется как сумма показателей поглощения и рассеяния света чистой водой и содержащимися в ней веществами:

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

где $\kappa(\lambda)_{чв}$, $\kappa(\lambda)_{жв}$, $\kappa(\lambda)_{хл}$, $\kappa(\lambda)_{взв}$ – показатели поглощения чистой водой, желтым веществом (гумусовые кислоты), хлорофиллом, взвесью; $\sigma(\lambda)_{чв}$, $\sigma(\lambda)_{взв}$ – показатели рассеяния чистой водой (молекулярное рассеяние), взвесью.

Показатель поглощения взвесью $\kappa(\lambda)_{взв}$ мал и его влияние в ослаблении света принято не учитывать [1], то есть

$$\varepsilon(\lambda)_в = \kappa(\lambda)_{чв} + \kappa(\lambda)_{жв} + \kappa(\lambda)_{хл} + \sigma(\lambda)_{чв} + \sigma(\lambda)_{взв}. \quad (2)$$

Сумма $\kappa(\lambda)_{чв} + \sigma(\lambda)_{чв} = \varepsilon(\lambda)_{чв}$ представляет собой показатель ослабления чистой водой; таким образом, окончательное выражение для показателя ослабления света водой можно записать в виде

$$\varepsilon(\lambda)_в = \varepsilon(\lambda)_{чв} + \kappa(\lambda)_{жв} + \kappa(\lambda)_{хл} + \sigma(\lambda)_{взв}. \quad (3)$$

Величина $\varepsilon(\lambda)_{чв}$ очень слабо изменяется в природных водах, и ее считают постоянной. Следовательно, изменчивость показателя ослабления света водой определяется изменчивостью содержания в ней желтого вещества, хлорофилла и взвеси. Проявляется это по-разному в зависимости от длины волны света.

Желтое вещество (ЖВ) сильнее всего влияет на показатель ослабления в коротковолновой части спектра, и при длине волны 390 нм его вклад в ослабление света может составлять около 40% [1]. С увеличением длины волны величина $\kappa(\lambda)_{жв}$ быстро убывает по закону:

$$\kappa(\lambda)_{жв} = \kappa(\lambda_0)_{жв} \exp[-\mu(\lambda - \lambda_0)]. \quad (4)$$

где $\lambda > \lambda_0$; $\kappa(\lambda_0)_{жв} = C_{жв} \kappa(\lambda_0)_{уд.жв}$, $C_{жв}$ – концентрация ЖВ, $\kappa(\lambda_0)_{уд.жв}$ – показатель удельного поглощения света ЖВ; μ – коэффициент, $\mu = 0,012...0,019$ [1]. Вследствие этого в длинноволновой области спектра вклад ЖВ в показатель ослабления незначителен и при $\lambda > 620$ нм (красная область) в разных по продуктивности водах это составляет менее 2%.

Хлорофилл имеет полосы поглощения в коротковолновой и длинноволновой областях спектра, и его вклад в ослабление света может составлять 3 – 5% в области длин волн 390 – 470 нм и около 3% в области 665 – 675 нм [1]. В других участках видимого спектра это составляет менее 1,5%, а при $\lambda > 620$ нм – менее 1%.

Таким образом, изменчивость показателя ослабления в области спектра $\lambda > 620$ нм определяется главным образом изменчивостью содержания взвеси (95 – 99 % по [1]). Учитывая это, для определения содержания взвеси используют измерения показателя ослабления света в красной области спектра. Определяя одновременно содержание взвеси весовым методом, получают уравнение регрессии $C_{взв} = f[\varepsilon(\lambda)_в]$. Коэффициенты корреляции обычно высоки: $r > 0,85$. Параметры регрессии, даже при измерении показателя ослабления на той же длине волны, в разных водоемах отличаются, что обусловлено разным составом в них взвешенного вещества. Для вод Черного моря (глубины до 90 м) соответствующие параметры регрессии для $\lambda = 625$ нм по работе [2] приведены в табл. 1.

Хлорофилл. Поглощение света хлорофиллом вносит небольшой вклад в показатель ослабления света, поэтому вариации $\kappa(\lambda)_{хл}$ должны слабо сказываться на вариации $\varepsilon(\lambda)_в$. Однако эксперименты показывают в ряде случаев существенную корреляцию между этими характеристиками. По данным Н. Loisel (1998), для океанических вод 1-го типа в поверхностных слоях (эвфотическая зона) коэффициент корреляции между содержанием хлорофилла и показателем ослабления света на длине волны 660 нм составил 0,943. В байкальских водах коэффициент корреляции в области спектра 420 – 480 нм в разных районах озера варьировал в пределах 0,81 – 0,66. В целом по всему Байкалу для $\lambda = 480$ нм в поверхностных водах коэффициент корреляции составил 0,812 [3]. В Черном море (эвфотический слой вод) для длины волны 467 нм $r = 0,693$ (табл. 1).

Такие факты объясняются связью концентрации хлорофилла с количеством органической взвеси, представленной в водоемах живым фитопланктоном и детритом. По данным работы [1], органическая взвесь в поверхностных водах в спектральной области 430 – 670 нм вносит 76 – 99 % в изменчивость показателя ослабления. Кроме того, с хлорофиллом коррелирует содержание ЖВ, что также влияет на положительную корреляцию хлорофилла с показателем ослабления в коротковолновой области спектра.

Невысокие коэффициенты корреляции в ряде экспериментов являются следствием разного содержания хлорофилла в клетках, зависящего от видового состава и физиологического состояния водорослей, а также разного количества образующегося детрита и ЖВ на разных стадиях развития фитоплена.

Отметим важный факт, что для Черного моря и Байкала для близких длин волн в уравнениях связи близки величины соответствующих коэффициентов: Черное море – $\lg C_{хл} = 2,36 \lg \varepsilon(467) + 0,83$; Байкал – $\lg C_{хл} = 2,38 \lg \varepsilon(480) + 0,68$. Это означает, что в обоих водоемах наблюдается близкое соотношение между концентрацией хлорофилла и содержанием в воде органической взвеси и желтого вещества.

**Параметры биооптических связей для определения по величине показателя ослабления направленного света
других оптических характеристик вод Черного моря и содержания в них веществ**

Определяемая характеристика, размерность	Уравнение связи $y = f[\varepsilon(\lambda)]$	Коэффициент корреляции	Средне-квадратичное отклонение (СКО)	Примечание
Спектральные величины показателя ослабления света в диапазоне $\lambda = 416 - 677$ нм, m^{-1}	$\varepsilon(\lambda_i)_B = \langle \varepsilon(\lambda_i)_B \rangle + K_1 \Psi_1(467) + K_2 \Psi_2(625)$	-	0,008	Значения $\langle \varepsilon(\lambda_i)_B \rangle$ и ортогональных векторов $\Psi_1(467)$ и $\Psi_2(625)$ даны в табл. 2; K_1 и K_2 – весовые коэффициенты
Показатель рассеяния света водой, m^{-1}	$\sigma(525)_B = 0,98\varepsilon(525)_B - 0,0315$	0,998	0,003	С учетом ошибки восстановления $\varepsilon(525)_B$ по двум векторам суммарное СКО: $0,003 + 0,008 = 0,011 m^{-1}$
Показатель поглощения света водой, m^{-1}	$\kappa(525)_B = \varepsilon(525)_B - \sigma(525)_B$	0,998	0,003	То же, что и для предыдущего
Показатель поглощения света желтым веществом, m^{-1}	$\kappa(525)_{жв} = \kappa(525)_B - \kappa(525)_{чв} - \kappa(525)_{хл}$	-	-	-
Концентрация желтого вещества, $г/м^3$	$C_{жв} = \frac{\kappa(525)_{жв}}{\kappa(450)_{уд.жв} \exp[-0,018(525 - 450)]}$	-	-	$\kappa(450)_{уд.жв} = 0,09217 m^2/г$ – удельный показатель поглощения света ЖВ
Концентрация взвеси, $мг/л$	$B_{взв} = 3,02\varepsilon(625) - 0,31$	0,890	0,074	-
Концентрация хлорофилла, $мг/м^3$	$\lg C_{хл} = 2,361 \lg \varepsilon(467) + 0,83$	0,693	0,078	СКО дано для величины $\lg C_{хл}$

Примечание. Исходные измеряемые величины – показатели ослабления направленного света $\varepsilon(467)$ и $\varepsilon(625)$, m^{-1} .

Желтое вещество. Прямой метод определения показателя поглощения ЖВ $\kappa(\lambda)_{\text{жв}}$ основан на измерении поглощения света в пробах воды, освобожденных от взвеси путем фильтрации, что производится в лабораторных условиях и для оперативного мониторинга неприемлемо. Величину показателя поглощения ЖВ можно определить косвенным методом, используя наблюдающуюся в экспериментах связь показателя рассеяния с показателем ослабления света водой. Для вод Черного моря такая связь установлена по измерениям на длине волны 525 нм. Данная длина волны выбрана не случайно, она имеет особое значение для Черного моря – в этой спектральной области показатель вертикального ослабления солнечного излучения в водах моря минимален. По измерениям в слое 0 – 50 м связь имеет вид [4]:

$$\sigma(525)_{\text{в}} = 0,98\varepsilon(525)_{\text{в}} - 0,0315, \quad (5)$$

где $\sigma(525)_{\text{в}} = \sigma(525)_{\text{взв}} + \sigma(525)_{\text{чв}}$. Коэффициент корреляции $r = 0,998$.

Отметим, что подобного рода связь наблюдалась и в других водоемах, но с иными коэффициентами, что обусловлено разными составами взвеси и концентрациями желтого вещества в их водах. Так, в Гданьском заливе Балтийского моря, по данным J. Dera (1978), формула такова: $\sigma(525)_{\text{в}} = 0,66\varepsilon(525)_{\text{в}} - 0,0174$.

Зная концентрацию хлорофилла, величину $\kappa(525)_{\text{жв}}$ согласно формуле (2) находим следующим образом:

$$\kappa(525)_{\text{жв}} = \varepsilon(525)_{\text{в}} - \sigma(525)_{\text{в}} - \kappa(525)_{\text{чв}} - C_{\text{хл}} \kappa(525)_{\text{уд.хл}}, \quad (6)$$

где $\kappa(525)_{\text{уд.хл}}$ – удельный показатель поглощения света пигментами хлорофилла, м²/мг [1, табл. 6.5].

Концентрацию желтого вещества можно определить из формулы (4):

$$C_{\text{жв}} = \frac{\kappa(525)_{\text{жв}}}{\kappa(450)_{\text{уд.жв}} \exp[-\mu(525 - 450)]}. \quad (7)$$

Величина показателя удельного поглощения света желтым веществом на длине волны 450 нм рассчитывается по работе [5]: $\kappa(450)_{\text{уд.жв}} = 0,09217$ м²/г. Для вод Черного моря $\mu = 0,018$ [6].

Оптические характеристики воды.

Спектральное распределение показателя ослабления направленного света. Для более полной характеристики состояния водной среды важно знать показатели ослабления по всему видимому спектру, особенно для длины волны 525 нм, показатель ослабления для которой используется в расчетах содержания желтого вещества (формулы (5) – (7)). Существует возможность восстановления спектрального распределения показателя ослабления направленного света по измерениям на двух (и даже на одной) длинах волн.

В экспериментах установлено, что величины $\varepsilon(\lambda)_в$ в области спектра 416 – 677 нм в поверхностных водах Черного моря тесно взаимосвязаны, коэффициенты корреляции между ними по всему спектру высоки. Даже для наиболее удаленных по спектру показателей $\varepsilon(416)$ и $\varepsilon(677)$ коэффициент корреляции $r = 0,81$, в спектральной области 416 – 610 нм – $r > 0,9$, а в коротковолновой части 416 – 506 нм – $r = 0,97...0,93$. То есть можно, измерив показатель ослабления на какой-либо длине волны и зная коэффициенты регрессии, рассчитать его величины для других длин волн.

Более точные результаты восстановления величин показателя ослабления по всему спектру получаются при использовании системы собственных ортогональных векторов [7]. Среднеквадратичное отклонение восстановленных величин по всему спектру составляет: при использовании одного вектора (измерения на одной длине волны) СКО = $0,012 \text{ м}^{-1}$, при использовании двух векторов (измерения на двух длинах волн) СКО = $0,008 \text{ м}^{-1}$. Такие величины СКО приемлемы для решения многих гидрооптических задач. В работе [7] показано, что наименьшие ошибки восстановления получаются, когда измерения производятся: в первом случае – в коротковолновой области, во втором случае – одновременно в коротковолновой и длинноволновой областях спектра.

Спектральные величины показателя ослабления при использовании двух векторов вычисляются по формуле:

$$\varepsilon(\lambda_i)_в = \langle \varepsilon(\lambda_i)_в \rangle + K_1 \Psi_1(\lambda_i) + K_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (8)$$

где $\langle \varepsilon(\lambda_i)_в \rangle$ – среднестатистические значения показателя ослабления; $\Psi_1(\lambda_i), \Psi_2(\lambda_i)$ – первый и второй ортогональные векторы; K_1, K_2 – весовые коэффициенты. Величины коэффициентов K_1 и K_2 определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon(467)_в = \langle \varepsilon(467)_в \rangle + K_1 \Psi_1(467) + K_2 \Psi_2(467), \\ \varepsilon(625)_в = \langle \varepsilon(625)_в \rangle + K_1 \Psi_1(625) + K_2 \Psi_2(625). \end{cases} \quad (9)$$

Показатели рассеяния и поглощения направленного света. Показатель рассеяния света водой может быть определен через показатель ослабления на длине волны 525 нм по уравнению связи (5), представленному выше. Показатель ослабления является суммой показателей рассеяния и поглощения $\varepsilon = \sigma + \kappa$, следовательно $\kappa(525)_в = \varepsilon(525)_в - \sigma(525)_в$. Необходимая для расчетов величина $\varepsilon(525)$ находится из восстановленного спектра показателя ослабления.

Параметры биооптических связей, используемых для обработки данных прозрачномера. Прозрачномер в комплексе «Бриз» измеряет показатели ослабления в двух участках спектра: 467 и 625 нм. С учетом вышеизложенных теоретических и экспериментальных данных это позволяет оценить содержание в воде веществ и рассчитать ряд оптических характеристик вод моря. Необходимые для расчетов параметры приведены в табл. 1 и 2.

Средние величины показателя ослабления направленного света
и два первых собственных ортогональных вектора

λ , нм	$\langle \varepsilon(\lambda) \rangle$, м ⁻¹	$\Psi_1(\lambda)$	$\Psi_2(\lambda)$
416	0,304	0,298	-0,409
432	0,283	0,302	-0,309
467	0,228	0,269	-0,024
490	0,222	0,269	-0,078
506	0,215	0,259	0,002
525	0,218	0,256	0,002
547	0,218	0,254	-0,006
567	0,219	0,239	-0,003
587	0,234	0,233	0,084
610	0,270	0,224	0,196
625	0,290	0,221	0,196
640	0,291	0,209	0,306
677	0,337	0,207	0,294

Комплекс «Бриз» предназначен для установки в прибрежных районах моря на глубинах до 50 м. Приведенные выше формулы биооптических связей применимы для таких глубин, т.е. могут быть использованы в алгоритме обработки данных измерений прозрачного комплекса «Бриз».

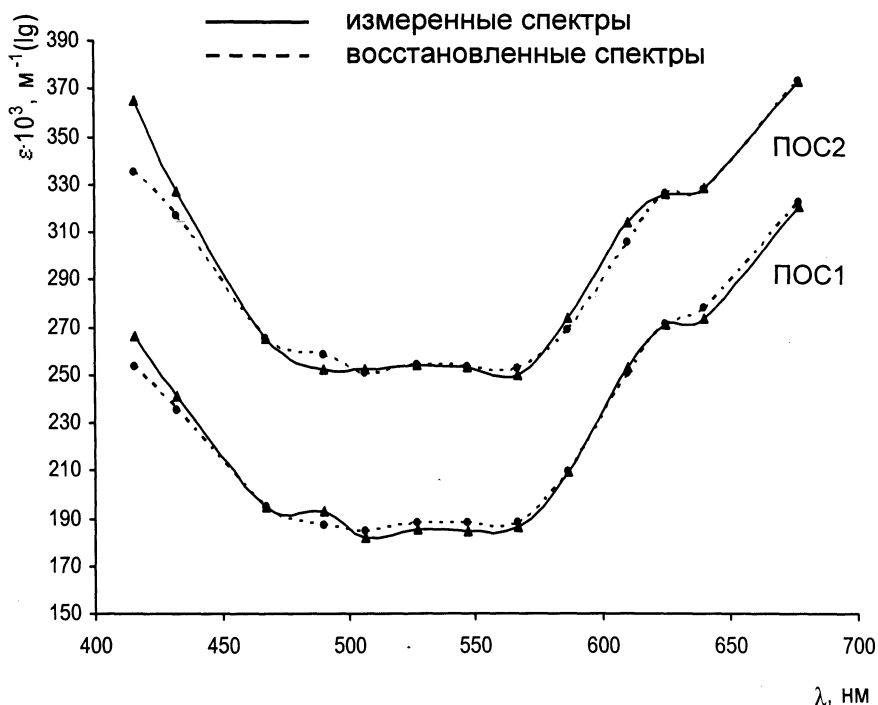
В табл. 3 и на рисунке приведены примеры расчетов содержания веществ в воде и восстановления спектрального распределения показателя ослабления для прибрежных вод южного побережья Крыма около бухты Ласпи и вод шельфа в 10 милях к западу от м. Херсонес.

Таблица 3

Характеристики морской среды,
рассчитанные по биооптическим связям

№	Исходные данные		$\varepsilon(525)_{в}$, м ⁻¹	$\sigma(525)_{в}$, м ⁻¹	$\kappa(525)_{в}$, м ⁻¹	$\kappa(525)_{лзв}$, м ⁻¹	$C_{жв}$, г/м ³	$C_{хлв}$, мг/м ³	$B_{взв}$, мг/л
	$\varepsilon(467)$, м ⁻¹	$\varepsilon(625)$, м ⁻¹							
1	0,195	0,271	0,188	0,152	0,035	0,0156	0,656	0,143	0,508
2	0,265	0,326	0,254	0,217	0,037	0,0154	0,645	0,294	0,675

Примечание: 1 – прибрежные воды южного побережья Крыма около бухты Ласпи, 2 – на шельфе в 10 милях к западу от м. Херсонес.



Примеры восстановления спектров показателя ослабления света (ПОС) с помощью двух собственных ортогональных векторов: ПОС1 – прибрежные воды южного побережья Крыма около бухты Ласпи, ПОС2 – на шельфе в 10 милях к западу от м. Херсонес

Среднеквадратичное отклонение восстановленных спектральных величин показателя ослабления от измеренных значений составило для первого и второго спектров соответственно $0,005$ и $0,009 \text{ м}^{-1}$, коэффициенты вариации соответственно составили 2,2 и 3%. Максимальное отклонение восстановленных значений спектров в обоих случаях наблюдалось на длине волны 416 нм и составило в первом случае $0,013 \text{ м}^{-1}$ (4,9%), во втором – $0,03 \text{ м}^{-1}$ (8,2%).

Выводы. Применительно к прозрачному, устанавливаемому в гидрометеорологическом комплексе «Бриз», предназначенном для мониторинга прибрежных вод Черного моря, показана возможность определения ряда характеристик состояния морской среды по измерениям показателя ослабления направленного света в двух участках спектра – коротковолновом и длинноволновом. Для этого могут быть использованы биооптические связи, установленные по экспериментам, проводившимся в Черном море.

Достоверность восстановления информации по эмпирическим зависимостям уступает непосредственному измерению или определению параметров среды. Однако это расширяет возможности оперативной оценки состояния

среды по измерениям ограниченного числа оптических параметров. Кроме того, достоверность такого восстановления может быть повышена, если будут получены соответствующие новые оптико-биологические экспериментальные данные для различных районов Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оптика океана*. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. – М.: Наука, 1983. – Гл. 6 – 8. – С. 510 – 235.
2. *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.
3. *Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.* Спектральная модель показателя ослабления направленного света в водах озера Байкал в летний период // Там же. – 2007. – № 6 – С. 39 – 46.
4. *Маньковский В.И.* Вероятность выживания фотона и ее связь с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря // Там же. – 2005. – № 6. – С. 68 – 76.
5. *Nyquist G.* Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances // *Thesis Dep. Anal. Mar. Chem.*, 1979. – Goteburg, 1979. – P. 200.
6. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П.* Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002) // *Морской гидрофизический журнал*. – 2004. – № 4. – С. 39 – 49.
7. *Маньковский В.И., Соловьев М.В.* О возможности восстановления спектрального распределения показателя ослабления излучения в поверхностных водах Черного моря по измерениям на одной длине волны // *Системы контроля окружающей среды*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1999. – С. 119 – 124.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 10.11.06
После доработки 21.12.06

ABSTRACT Application of a transparency meter in the hydrometeorological set intended for monitoring of the Black Sea coastal water shows possibility of determination of a number of characteristics of the seawater state based on the measurements of the directed light attenuation index in two spectrum parts: short- and long-wave ones. The bio-optical relations derived from the experiments in the Black Sea can be used for this purpose.