

УДК 551.463.5

Оценки показателя поглощения консервативным желтым веществом по корреляционным связям между гидрооптическими характеристиками (версия)

В.И. Маньковский*

*Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2*

Поступила в редакцию 16.01.2019 г.

Рассматривается метод оценки показателя поглощения консервативным желтым веществом (ЖВ) по корреляционным связям между гидрооптическими характеристиками. Выполнены оценки поглощения консервативным ЖВ в разных водоемах; определен коэффициент спектральной изменчивости его показателя поглощения. Рассчитано отношение показателя поглощения консервативного ЖВ к общему ЖВ в водах с разной концентрацией хлорофилла.

Ключевые слова: консервативное и неконсервативное желтое вещество, показатели поглощения, рассеяния и ослабления, спектральная изменчивость, хлорофилл; conservative and non-conservative yellow substance; absorption, scattering and attenuation coefficients; spectral selectivity; chlorophyll.

Введение

Желтым веществом (ЖВ) в гидрооптике называют растворенные в воде органические соединения, влияющие на поглощение светового излучения. Особенность поглощения ЖВ состоит в том, что оно максимально в коротковолновой области спектра. С увеличением длины волны поглощение желтым веществом уменьшается по экспоненциальному закону $k(\lambda)_{\text{ЖВ}} \sim e^{-\mu\lambda}$. Коэффициент спектральной изменчивости μ по разным данным равен 0,012–0,019 м⁻¹, в большинстве случаев его принимают равным 0,015 м⁻¹ [1].

В водоемах ЖВ возникает двумя путями: выносятся с суши реками и образуется непосредственно в водоемах в результате химической деградации планктонных организмов. Первый путь возникновения ЖВ существен лишь в прибрежных водах, в открытых водах доминирует автохтонный путь образования [1].

Исследование корреляции ЖВ с хлорофиллом в океанических водах показало, что она имеет высокие значения в эвтрофных водах и практически незначима в олиготрофных. Такая закономерность объясняется в [1] тем, что желтое вещество состоит из двух фракций: консервативной и неконсервативной. Консервативная фракция ЖВ представлена стойким органическим веществом, неконсервативная фракция вскоре после своего образования исчезает.

«В олиготрофных водах консервативная часть доминирует над неконсервативной (планктона мало и соответственно мало его разлагается) и корреляция между ЖВ и хлорофиллом отсутствует. В эвтрофных водах преобладает неконсервативная составляющая, благодаря чему корреляция между ЖВ и хлорофиллом становится значимой» [1. С. 228].

В качестве характеристики содержания в воде ЖВ в гидрооптике используют показатель поглощения ЖВ на длине волны 390 нм. Его определяют как разность между поглощением содержащимся в морской воде веществом и поглощением пигментами фитопланктона [1]. Таким образом определяется суммарное поглощение неконсервативным и консервативным ЖВ. Какая часть в суммарном поглощении относится к консервативному ЖВ, неизвестно.

В настоящей работе рассматривается возможность оценки показателя поглощения консервативным желтым веществом косвенным путем — через корреляционные связи между гидрооптическими характеристиками. Параметры таких связей зависят от содержания в воде взвешенных и растворенных веществ. Предполагается, что в предельном случае при отсутствии в воде взвеси связи позволяют оценить показатель поглощения консервативным ЖВ.

Методика исследования

Рассмотрим метод определения показателя поглощения консервативным ЖВ по корреляционной

* Виктор Иванович Маньковский (emankovskaya@mail.ru).

связи показателя рассеяния σ с показателем ослабления направленного света ϵ на примере вод Черного моря. В работе [2] для поверхностных вод моря установлена связь показателя поглощения κ с показателем ослабления ϵ :

$$\kappa(525)_{\text{вода}} = 0,064\epsilon(525)_{\text{вода}} + 0,058. \quad (1)$$

Из (1) с учетом соотношения $\sigma = \epsilon - \kappa$ следует

$$\sigma(525)_{\text{вода}} = 0,936\epsilon(525)_{\text{вода}} - 0,058. \quad (2)$$

Показатель ослабления света представляет собой сумму показателей рассеяния и поглощения света содержащимися в воде компонентами:

$$\begin{aligned} \epsilon(\lambda)_{\text{вода}} = & \sigma(\lambda)_{\text{взв}} + \sigma(\lambda)_{\text{мол}} + \\ & + \kappa(\lambda)_{\text{чв}} + \kappa(\lambda)_{\text{хл}} + \kappa(\lambda)_{\text{жв}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma(\lambda)_{\text{взв}}$ – рассеяние взвесью; $\sigma(\lambda)_{\text{мол}}$ – молекулярное рассеяние; $\kappa(\lambda)_{\text{чв}}$ – поглощение чистой водой; $\kappa(\lambda)_{\text{хл}}$ – поглощение пигментами хлорофилла; $\kappa(\lambda)_{\text{жв}}$ – поглощение желтым веществом.

Подставляя компоненты из (3) в (2) с учетом $\sigma(\lambda)_{\text{вода}} = \sigma(\lambda)_{\text{взв}} + \sigma(\lambda)_{\text{мол}}$ получаем

$$\begin{aligned} \sigma(525)_{\text{взв}} + \sigma(525)_{\text{мол}} = & 0,936[\sigma(525)_{\text{взв}} + \sigma(525)_{\text{мол}} + \\ & + \kappa(525)_{\text{чв}} + \kappa(525)_{\text{хл}} + \kappa(525)_{\text{жв}}] - 0,058. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим, что дает формула (4) при отсутствии в воде взвеси. В этом случае будет наблюдаться только молекулярное рассеяние света. Так как вся взвесь, в том числе органическая (фитопланктон), отсутствует, поглощения света пигментами хлорофилла и неконсервативным ЖВ не будет. Из поглощающих компонентов остаются чистая вода и консервативное ЖВ. В этом случае формула (4) имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma(525)_{\text{мол}} = & 0,936[\sigma(525)_{\text{мол}} + \kappa(525)_{\text{чв}} + \\ & + \kappa(525)_{\text{жв конс}}] - 0,058. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим в формулу (5) показатели поглощения и рассеяния для чистой морской воды: $\kappa(525)_{\text{чв}}$ из [3], $\sigma(525)_{\text{мол}}$ из [1, табл. 6.2, С. 150–157]. В результате получим соотношение

$$\begin{aligned} 0,002 = & 0,936[0,002 + 0,0417 + \\ & + \kappa(525)_{\text{жв конс}}] - 0,058. \end{aligned} \quad (6)$$

Из формулы (6) находим показатель поглощения консервативным ЖВ $\kappa(525)_{\text{жв конс}} = 0,02 \text{ м}^{-1}$, которое постоянно находится в воде в отличие от неконсервативного ЖВ, связанного с фитопланктоном и без него отсутствующего.

Спектральная изменчивость поглощения консервативным ЖВ

Для вод Черного моря в работе [4] получена связь ($\lambda = 550 \text{ нм}$):

$$\sigma(550)_{\text{вода}} = 0,97\epsilon(550)_{\text{вода}} - 0,068. \quad (7)$$

Расчет по уравнению (7) дает $\kappa(550)_{\text{жв конс}} = 0,0137 \text{ м}^{-1}$. Для длины волны 525 нм по формуле (2) $\kappa(525)_{\text{жв конс}} = 0,02 \text{ м}^{-1}$. Используя эти величины, находим коэффициент спектральной изменчивости для консервативного ЖВ:

$$\mu = \frac{\ln[\kappa(525)_{\text{жв конс}}/\kappa(550)_{\text{жв конс}}]}{550 - 525} = 0,015 \text{ м}^{-1}. \quad (8)$$

Такая же величина параметра μ для консервативного ЖВ получается по формулам связи $\sigma = f(\epsilon)$ для вод Балтийского моря [5, 6]. В работе [5] установлена связь $\sigma(425) = 0,61\epsilon(425) - 0,09$, из которой следует $\kappa(425)_{\text{жв конс}} = 0,15 \text{ м}^{-1}$. В [6] соответственно $\sigma(555) = 0,939\epsilon(555) - 0,077$; $\kappa(555)_{\text{жв конс}} = 0,022 \text{ м}^{-1}$;

$$\mu = \frac{\ln[\kappa(425)_{\text{жв конс}}/\kappa(555)_{\text{жв конс}}]}{555 - 425} = 0,0148 \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

Для оз. Байкал также имеются связи $\sigma = f(\epsilon)$ для $\lambda = 480$ [13] и 519 нм [7]. Однако они получены для вод, расположенных на различных глубинах: в [13] для эвфотической зоны ($H = 0-60 \text{ м}$), в [7] – ниже эвфотической зоны на глубинах 0–400 м и для вод на глубинах более 400 м. Поэтому, кроме спектральной изменчивости, на величину показателя поглощения могут влиять различные условия образования консервативного ЖВ в этих слоях.

Оценки показателя поглощения $\kappa(\lambda)_{\text{жв конс}}$ в разных водоемах

Для оценки $\kappa_{\text{жв конс}}$ в разных водоемах использованы формулы связи $\sigma = f(\epsilon)$ из публикаций [2, 4–16]. Результаты расчетов представлены в табл. 1. Кроме величин $\kappa(\lambda)_{\text{жв конс}}$, в ней приведены величины $\kappa(550)_{\text{жв конс}}$, вычисленные по формуле $\kappa(\lambda)_{\text{жв}} \sim e^{-\mu\lambda}$ с использованием параметра спектральной изменчивости $\mu = 0,015$.

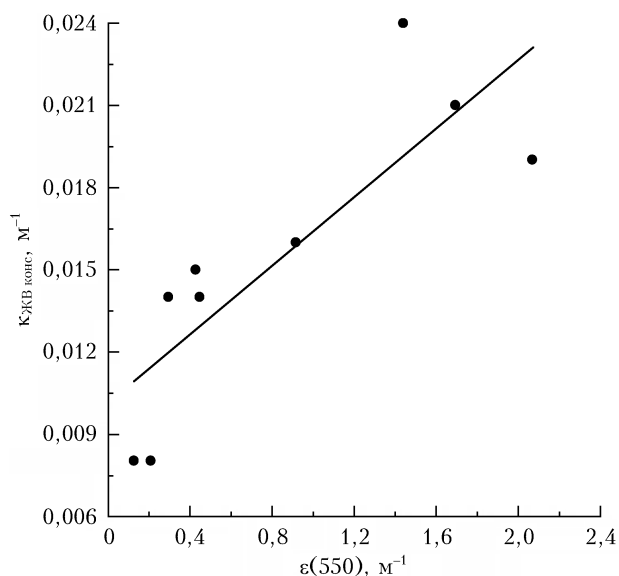
Показатель поглощения консервативным ЖВ на длине волны 550 нм варьирует в пределах 0,008–0,024 м^{-1} , в среднем $\kappa(550)_{\text{жв конс}} = (0,016 \pm \pm 0,008) \text{ м}^{-1}$.

Отрицательные величины $\kappa(\lambda)_{\text{жв}}$, полученные по формулам из [7, 9], можно объяснить тем, что параметры связи в этих формулах определены не точно.

Из табл. 1 видно, что показатель поглощения консервативным ЖВ выше в водах с более высокими показателями ослабления. На рисунке показана связь между $\kappa(550)_{\text{жв конс}}$ и средним показателем ослабления на длине волны 550 нм. В тех случаях, когда связь получена на другой длине волны, показатель ослабления скорректирован с учетом его спектральной изменчивости.

Показатели поглощения консервативным желтым веществом в разных водоемах

Водоем	Формула связи	λ , нм	Диапазон ϵ , M^{-1}	$\langle \epsilon \rangle$, M^{-1}	$\kappa(\lambda)_{ЖВ\ конс.}$, M^{-1}	$\kappa(550)_{ЖВ\ конс.}$, M^{-1}	Источник
Залив Гданьский	$\sigma = 0,610\epsilon - 0,090$	425	0,6–3,75	2,18	0,15	0,021	[5]
Оз. Байкал, $H = 0-50$ м	$\sigma = 0,924\epsilon - 0,054$	480	0,20–1,70	0,95	0,046	0,016	[13]
Оз. Байкал, $H \approx 50-400$ м	$\sigma = 0,933\epsilon - 0,049$	519	0,07–0,18	0,13	0,013	0,008	[7]
Оз. Байкал, $H > 400$ м	$\sigma = 0,752\epsilon - 0,026$	519	0,04–0,13	0,09	-0,005	–	[7]
Тропическая Атлантика	$\sigma = 0,941\epsilon - 0,050$	520	0,12–0,34	0,23	0,012	0,008	[12]
Черное море	$\sigma = 0,936\epsilon - 0,058$	525	0,10–0,50	0,30	0,020	0,014	[2]
Средиземное море	$\sigma = 0,984\epsilon - 0,070$	550	0,27–0,58	0,42	0,015	0,015	[8]
Черное море	$\sigma = 0,970\epsilon - 0,068$	550	0,35–0,54	0,45	0,014	0,014	[4]
Тихий, Атлантический океан	$\sigma = 0,944\epsilon - 0,048$	550	0,08–0,60	0,34	-0,006	-0,006	[9]
Атлантический океан, океанические и прибрежные воды	$\sigma = 0,949\epsilon - 0,072$	550	0,20–3,93	2,07	0,019	0,019	[10, 11]
Балтийское море	$\sigma = 0,939\epsilon - 0,077$	555	0,15–2,73	1,44	0,022	0,024	[6]

Связь показателя поглощения консервативным желтым веществом ($\lambda = 550$ нм) с показателем ослабления направленного света

Соотношение консервативного и общего ЖВ в водах разной трофности

Рассмотрим, как соотносятся консервативное и общее ЖВ в водах с разным содержанием хлорофилла на примере Черного моря.

Для вод Черного моря, согласно [2], связь $\sigma = f(\epsilon)$ выражается формулой

$$\sigma(525)_{\text{вода}} = 0,936\epsilon(525)_{\text{вода}} - 0,058. \quad (10)$$

Определив по формуле (9) показатель рассеяния, находим показатель поглощения воды $\kappa(525)_{\text{вода}} = \epsilon(525)_{\text{вода}} - \sigma(525)_{\text{вода}}$. Он является суммой показателей поглощения

$$\kappa(525)_{\text{вода}} = \kappa(525)_{\text{ЧВ}} + \kappa(525)_{\text{ХЛ}} + \kappa(525)_{\text{ЖВ}}. \quad (11)$$

Показатель поглощения чистой воды $\kappa(525)_{\text{ЧВ}} = 0,0417 \text{ м}^{-1}$ [3].

Показатель поглощения хлорофилла определяется через концентрацию хлорофилла:

$$\kappa(525)_{\text{ХЛ}} = C_{\text{ХЛ}} \kappa(525)_{\text{ХЛ}}^{\text{УД}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{ХЛ}}$ – концентрация хлорофилла, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\kappa(525)_{\text{ХЛ}}^{\text{УД}}$ – показатель удельного поглощения пигментами. Согласно [14] $\kappa(525)_{\text{ХЛ}}^{\text{УД}} = 0,0104 \text{ м}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$.

Концентрацию хлорофилла определяем по формуле для вод Черного моря из [15]:

$$C_{\text{ХЛ}} = 2,361g\epsilon(467) + 0,83. \quad (13)$$

При использовании в расчетах по формуле (12) показателя ослабления $\epsilon(525)$ вводится поправка на спектральную изменчивость $\epsilon(467) = 1,037\epsilon(525)$.

Подставив в формулу (10) соответствующие величины показателей поглощения (воды, чистой воды и хлорофилла), находим показатель поглощения желтого вещества. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

В последней колонке таблицы дано отношение показателя поглощения консервативным ЖВ к показателю поглощения общим ЖВ. В олиготрофных водах ($C_{\text{ХЛ}} = 0,06-0,03 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) консервативное ЖВ (постоянная часть) составляет 58–89% от общего ЖВ, а неконсервативное (переменная часть) – 42–11%. Такое соотношение согласуется со слабой корреляцией желтого вещества с хлорофиллом, наблюдающейся в олиготрофных водах [1. С. 223–229].

Показатели поглощения компонентов в водах Черного моря с разным содержанием хлорофилла

$\epsilon(525)$, M^{-1}	$C_{xл}$, $Mг \cdot M^{-3}$	$\kappa(525)_{вода}$, M^{-1}	$\kappa(525)_{ЧВ}$, M^{-1}	$\kappa(525)_{xл}$, M^{-1}	$\kappa(525)_{ЖВ}$, M^{-1}	$\kappa(525)_{ЖВ\ конс}$, M^{-1}	$\kappa(525)_{ЖВ\ конс} / \kappa(525)_{ЖВ}$
1,0	1,04	0,122	0,0417	0,0108	0,0695	0,02	0,29
0,7	0,45	0,100	0,0417	0,0047	0,0536	0,02	0,37
0,3	0,06	0,077	0,0417	0,0006	0,0347	0,02	0,58
0,1	0,03	0,064	0,0417	0,0003	0,0220	0,02	0,89

Заключение

Параметры корреляционной связи показателя рассеяния с показателем ослабления зависят от содержания в воде взвешенных и растворенных веществ. Предполагается, что такая связь в предельном случае при отсутствии в воде взвеси позволяет оценить показатель поглощения консервативным желтым веществом. Результаты расчетов, выполненных на основе этой версии, согласуются с известными экспериментальными данными по ЖВ в морских водах.

Коэффициент спектральной изменчивости консервативного ЖВ $\mu = 0,015 \text{ м}^{-1}$ такой же, как и для общего ЖВ.

По расчетам отношения показателя поглощения консервативного ЖВ к общему ЖВ в водах Черного моря разной трофности это отношение в олиготрофных водах ($C_{xл} = 0,06\text{--}0,03 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) составило 0,58–0,89, а для вариабельной части желтого вещества 0,42–0,11. Это согласуется с наблюдающейся в экспериментах слабой корреляцией ЖВ с хлорофиллом в олиготрофных водах.

Величина $\kappa(550)_{ЖВ\ конс}$, рассчитанная по связям $\sigma = f(\epsilon)$ в разных водоемах, составляет 0,08–0,024 м^{-1} , и она выше в водах с более высоким показателем ослабления.

Работа выполнена в МГИ РАН в рамках Госзадания по теме № 0827-2018-0002.

1. *Копелевич О.В.* Растворенные органические вещества // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. С. 157–160.
2. *Маньковский В.И.* Исследование связи показателя поглощения с показателем ослабления направленного света в водах Черного моря // Тр. VIII Междунар. конф. «Современные проблемы оптики естественных вод». СПб.: Ин-т океанологии РАН, СПб. филиал. 2015. С. 118–120.
3. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integration cavity measurements // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 33. P. 8710–8723.
4. *Корчелкина Е.Н.* Связь показателя рассеяния с показателем ослабления ($\lambda = 550 \text{ нм}$) в поверхностных водах

Черного моря. Севастополь: Морской гидрофиз. ин-т РАН, 2018. Личное сообщение. Отдел оптики и биофизики моря, тема № 0827-2014-0010 и № 0827-2014-0011.

5. *Dera J., Gohs L., Wozniak B.* Experimental study of the composite parts of the light-beam attenuation process in the waters of the gulf of Gdansk // Oceanologia. Wroclaw, Warsaw, Krakow, Gdansk: Polish Academy of sciences. National Committee on Oceanic research. 1978. N 10. P. 5–26.
6. *Levin I., Darecki M., Sagan S., Radomyslskaya T.* Relation between inherent optical properties in the Baltic sea for application to the underwater imagin problem // Oceanologia. 2013. V. 55, N 1. P. 11–26.
7. *Sherstynkin P.P., Kokhanenko G.P., Tarashcansky B.A.* Correlations of the hydrooptical properties of Baikal water // Proc. of 4 Inter. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters". Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RUN. 2007. P. 37–40.
8. *Левин И.М.* Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундам. и прикл. гидрофиз. 2014. Т. 7, № 3. С. 9.
9. *Левин И.М., Копелевич О.В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в спектральном диапазоне около 550 нм // Океанология. 2007. Т. 47, № 3. С. 374–379.
10. *Morel A., Prieur I.* Analysis of variation in ocean color // Limnol. Oceanogr. 1977. V. 22, N 4. P. 709–722.
11. *Schoonmaker J.S., Hammond R.R., Heath A.L., Cleveland J.S.* A numerical model for prediction of sublittoral optical visibility // Ocean Optics XXII. Soc. Photo-Optic. Instrument. Engin. Bergen. 1994. V. 2258. P. 685–702.
12. *Маньковский В.И.* Параметры индикатрис рассеяния света в тропических водах Атлантического океана // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 1–6.
13. *Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.* Оптические характеристики вод и их взаимные корреляции в озере Байкал // Физика атмосф. и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 512–520.
14. *Карабашев Г.С.* Пигменты фитопланктона // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. С. 163–166.
15. *Маньковский В.И., Маньковская Е.В.* Использование биооптических связей для определения характеристического мониторинга вод Черного моря с применением прозрачномеров // Морской гидрофиз. журн. 2008. № 2. С. 37–45.

V.I. Mankovskiy. Evaluation of absorption coefficient of conservative yellow substance from the regression between hydrooptical characteristics (a version).

A method for evaluation of the absorption coefficient of conservative yellow substance (CYS) from regression between hydrooptical characteristics is discussed. Estimates of CYS absorption in different waters are obtained. The parameter of spectral selectivity of CYS absorption is determined. The ratio of CYS absorption to total yellow substance absorption in waters with different concentrations of chlorophyll is calculated.