

**В.И. МАНЬКОВСКИЙ\***, **П.П. ШЕРСТЯНКИН\*\***

\*Морской гидрофизический институт РАН,  
299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2, Россия, mankovskiy@mhi-ras.ru

\*\*Лимнологический институт СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, ppsherst@lin.irk.ru

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОЕМОВ

*Исследовано применение гидрооптических характеристик для контроля экосистемы водоемов. Рассмотрены две основные характеристики, наиболее часто используемые для целей экологического мониторинга с учетом информативности и несложности измерений: показатель ослабления направленного света  $\epsilon$  и глубина видимости белого диска  $Z_6$ . Теоретический анализ показывает связь  $\epsilon$  и  $Z_6$  с содержанием в воде взвеси и хлорофилла. Однако сделан вывод, что рассчитать корректно теоретическим путем содержание этих веществ по величинам  $\epsilon$  и  $Z_6$  не представляется возможным. В связи с этим для целей мониторинга используют эмпирические связи концентраций взвеси и хлорофилла с гидрооптическими характеристиками, установленные опытным путем. Данные связи носят региональный характер, что объясняется региональным составом взвеси и внутриклеточной концентрацией пигментов в водорослях. Приводятся примеры эмпирических связей концентрации взвеси и хлорофилла с показателем ослабления и глубиной видимости белого диска в оз. Байкал, Черном море и тропических водах Атлантического океана. Выявлено, что кроме содержания в водоемах взвеси и хлорофилла для биологических целей важно знать толщину эвфотического слоя для суммарной квантовой облученности  $H_{\text{эф.квант}}$ . Показаны примеры определения  $H_{\text{эф.квант}}$  по глубине видимости белого диска в разных водоемах.*

Ключевые слова: показатель ослабления света, глубина видимости белого диска, взвешенное вещество, хлорофилл, растворенное органическое вещество, эвфотический слой.

**V.I. MANKOVSKY\***, **P.P. SHERSTYANKIN\*\***

\*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences,  
299011, Sevastopol, ul. Kapitanskaya, 2, Russia, mankovskiy@mhi-ras.ru

\*\*Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, ppsherst@lin.irk.ru

### USE OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS IN MONITORING THE STATUS OF THE RESERVOIR ECOSYSTEM

*Use of hydrooptical characteristics in monitoring of the reservoir ecosystem is investigated. Two basic characteristics which are most commonly used for purposes of ecological monitoring having regard to information content and ease of measurements are considered: the beam attenuation coefficient  $\epsilon$ , the and Secchi disc depth  $Z_{SD}$ . Theoretical analysis shows a relationship of  $\epsilon$  and  $Z_{SD}$  with content of suspended matter and chlorophyll in water. It is concluded, however, that correct theoretical calculations of the content of these substances is not possible to correctly calculate these substances in a theoretical way from  $\epsilon$  and  $Z_{SD}$ . In this context, empirical relationships of suspended matter and chlorophyll concentrations with hydrooptical characteristics are used for monitoring purposes. These relationships are regional in character, which is accounted for by the regional composition of suspended matter and by the intracellular concentration of pigments in algae. Examples of empirical relationships of the suspended matter and chlorophyll concentrations with the beam attenuation coefficient and Secchi depth in Lake Baikal, the Black Sea and the tropical waters of the Atlantic waters are given. It is found that in addition to the content of suspended matter and chlorophyll in reservoirs, it is important, for biological purposes, to know the thickness of the euphotic layer for total quantum irradiation  $H_{\text{euph.quant}}$ . Examples of the determination of the euphotic layer thickness for total quantum irradiation  $H_{\text{euph.quant}}$  using Secchi depth for different reservoirs are provided.*

Keywords: beam attenuation coefficient, Secchi depth, suspended matter, chlorophyll, dissolved organic matter, euphotic layer thickness.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на фоне интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы возрастает общественный интерес к их состоянию, охране и рациональному использованию. Гидрооптические характеристики — это эффективные показатели состояния экосистемы водоемов. Их величина зависит от содержания в воде минеральной и органической взвеси, растворенных органических соединений.

Гидрооптические характеристики делят на первичные и вторичные. Первичные представляют собой физические величины, отвечающие за оптические свойства воды. Они определяются ее химическим составом, термодинамическим состоянием, наличием в воде оптически активных примесей в виде растворов и взвесей. Вторичные используются для описания состояния светового поля в водоеме. Они зависят от оптических свойств воды, т. е. от первичных характеристик, и от геометрической структуры потока солнечного излучения в водоеме.

Для целей экологического мониторинга с учетом информативности и несложности измерений наиболее часто используются две гидрооптические характеристики: из первичных — показатель ослабления направленного света  $\epsilon$ , из вторичных — относительная прозрачность  $Z_0$  по белому диску Секки.

В научной зарубежной [1–3] и отечественной [4–11] литературе наибольшее внимание уделяется исследованиям гидрооптических характеристик океанов и морей, а наименьшее — внутренних водоемов. Данная работа направлена на решение одного из наименее изученных вопросов современной гидрофизики — применения гидрооптических характеристик для экологической оценки и контроля над состоянием водоемов при изучении их экосистем.

## СВЯЗИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С КОМПОНЕНТАМИ ВОДЫ

**Показатель ослабления направленного света.** Распространение направленного светового излучения в воде сопровождается его поглощением и рассеянием. Количественно это выражается показателями поглощения  $\kappa_v$  и рассеяния  $\sigma_v$  света водой. В результате суммарного действия поглощения и рассеяния световой поток ослабляется, что характеризуется показателем ослабления света (ПОС)  $\epsilon_v$ :

$$\epsilon_v = \kappa_v + \sigma_v.$$

Поглощение света в воде происходит чистой водой, взвесью, а также растворенными в воде органическими соединениями. Поглощение чистой водой — постоянный и практически неизменный фактор; его величина очень слабо изменяется в зависимости от гидрофизических условий. Минеральная взвесь и «мертвая» органическая взвесь (детрит) слабо поглощают свет, и их влияние в большинстве случаев можно не учитывать. Существенно поглощает свет «живая» органическая взвесь содержащимися в фитопланктоне пигментами хлорофилла. Большинство растворенных в воде органических соединений не влияют на поглощение, кроме гумусовых кислот, сильно поглощающих свет в коротковолновой области спектра, так называемое «желтое вещество».

Таким образом, суммарное поглощение света в воде определяется тремя основными компонентами: поглощение чистой водой  $\kappa_{чв}$ , пигментами фитопланктона  $\kappa_{пф}$  и желтым веществом  $\kappa_{жв}$ :

$$\kappa_v = \kappa_{чв} + \kappa_{пф} + \kappa_{жв}.$$

Рассеяние света в воде происходит на взвешенных минеральных  $\sigma_{мин}$  и органических  $\sigma_{орг}$  частицах, а также на неоднородностях распределения молекул воды и содержащихся в воде солей (молекулярное рассеяние)  $\sigma_{мол}$ :

$$\sigma_v = \sigma_{мин} + \sigma_{орг} + \sigma_{мол}.$$

Главный вклад в этот процесс вносит рассеяние на взвешенных частицах. Молекулярное рассеяние незначительно по величине и практически неизменно.

Таким образом, показатель ослабления света (ПОС) есть сумма следующих показателей:

$$\epsilon_v = \kappa_v + \sigma_v = \kappa_{чв} + \kappa_{пф} + \kappa_{жв} + \sigma_{мин} + \sigma_{орг} + \sigma_{мол}.$$

Переходя к концентрациям веществ, имеем:

$$\epsilon_v = \kappa_{чв} + \sigma_{мол} + C_{пф} \kappa_{пф}^{уд} + C_{жв} \kappa_{жв}^{уд} + C_{мин} \sigma_{мин}^{уд} + C_{орг} \sigma_{орг}^{уд}, \quad (1)$$

где  $\kappa_{пф}^{уд}$ ,  $\kappa_{жв}^{уд}$ ,  $\sigma_{мин}^{уд}$ ,  $\sigma_{орг}^{уд}$  — удельные показатели поглощения и рассеяния света на единицу концентрации вещества.

С учетом того, что поглощение и рассеяние света самой водой — это практически постоянные величины, вариации показателя ослабления света в воде определяются вариациями содержания в ней минеральной и органической взвеси, пигментов фитопланктона и желтого вещества:

$$\delta(\epsilon_B) = f(C_{\text{пф}}, C_{\text{жв}}, C_{\text{мин}}, C_{\text{орг}}).$$

Подавляющий вклад в изменчивость показателя ослабления вносит органическая взвесь, т. е. фитопланктон. По данным [12], в поверхностных морских водах органическая взвесь дает вклад в дисперсию ПОС в средней части видимого спектра (500–550 нм) 90–98 %. Это же относится и к пресноводным водоемам. Таким образом, изменчивость ПОС представляет собой эффективный показатель состояния экосистемы водоема.

**Глубина видимости белого диска.** Глубина видимости белого диска (относительная прозрачность  $Z_0$  по белому диску Секки) — это глубина исчезновения из видимости стандартного белого диска (диаметр 30 см). Связь глубины видимости белого диска с компонентами воды более сложная, чем для показателя ослабления. Величина  $Z_0$  зависит от ослабления света  $\epsilon$  и вертикального ослабления солнечного излучения  $\alpha\downarrow$ . Эта связь выражается формулой

$$Z_0 = C/(\epsilon + \alpha\downarrow),$$

где  $C$  — некая константа.

Величина  $\alpha\downarrow$  коррелирует с показателями поглощения света водой  $\kappa_B$  и рассеяния света назад  $\sigma\uparrow_B$ . В модели распространения солнечного излучения в водоеме в двухпоточковом приближении это выражается как

$$\alpha\downarrow \approx \kappa_B + \sigma\uparrow_B.$$

Рассеяние света назад водой определяется главным образом рассеянием назад минеральной взвесью:  $\sigma\uparrow_{\text{мин}} = \sigma_{\text{мин}}/(K_{\text{мин}} + 1)$ , где  $K_{\text{мин}}$  — коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния света минеральной взвесью. Рассеяние назад органической взвесью и молекулярное рассеяние намного меньше, и их вклад в общее рассеяние света назад водой незначителен.

С учетом сказанного выше об основных факторах, влияющих на поглощение и рассеяние света в воде, глубина видимости белого диска связана с ними соотношением

$$Z_0 = C/(\kappa_{\text{чв}} + \kappa_{\text{пф}} + \kappa_{\text{жв}} + \sigma_{\text{мин}} + \sigma_{\text{орг}} + \sigma_{\text{мол}} + \kappa_{\text{чв}} + \kappa_{\text{пф}} + \kappa_{\text{жв}} + \sigma\uparrow_{\text{мин}}).$$

Переходя к концентрациям веществ, имеем:

$$Z_0 = C/(\kappa_{\text{чв}} + \kappa_{\text{пф}} + C_{\text{пф}}\kappa_{\text{пф}}^{\text{уд}} + C_{\text{жв}}\kappa_{\text{жв}}^{\text{уд}} + C_{\text{мин}}\sigma_{\text{мин}}^{\text{уд}} + C_{\text{орг}}\sigma_{\text{орг}}^{\text{уд}} + \sigma\uparrow_{\text{мин}}). \quad (2)$$

С учетом постоянства поглощения и рассеяния света самой водой вариации глубины видимости белого диска, как и показателя ослабления света, определяются вариациями содержания в ней минеральной и органической взвеси, пигментов фитопланктона и растворенного желтого вещества:

$$\delta(Z_0) = f(C_{\text{пф}}, C_{\text{жв}}, C_{\text{мин}}, C_{\text{орг}}).$$

Сказанное выше о компонентах воды, влияющих на изменчивость ПОС, относится в той же степени и к глубине видимости белого диска.

#### МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В ВОДЕ ВЕЩЕСТВ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА И ГЛУБИНЕ ВИДИМОСТИ БЕЛОГО ДИСКА

Как видно из формул (1) и (2), определение содержания в воде взвешенных и растворенных веществ по данным о величинах  $\epsilon_B$  и  $Z_0$  представляет собой многопараметрическую задачу. Рассчитать корректно теоретическим путем содержание веществ по величинам  $\epsilon_B$  и  $Z_0$  не представляется возможным. Для решения такой обратной задачи необходимо задание в адекватных моделях, описывающих связь показателей поглощения и рассеяния с концентрацией в воде веществ, многих параметров, которые точно не известны. В связи с этим для определения по гидрооптическим характеристикам содержания примесей в воде используют эмпирические связи, установленные опытным путем.

Практическое значение в установлении эмпирических связей состоит в том, что они позволяют оперативно оценивать экологическое состояние водоемов с меньшей затратой времени по сравнению с аналитическими методами. Например, традиционный гравиметрический метод определения содержания в воде взвеси состоит из ряда процедур: высушивание фильтра, взвешивание высушенного фильтра, отбор пробы воды, фильтрование пробы, промывка фильтра с фильтратом от солей, высу-

шивание фильтра с фильтратом, взвешивание высушенного фильтра. На исполнение всех этих процедур уходит много времени. Измерение показателя ослабления зондирующим прозрачномером, например до глубины 100 м, занимает несколько минут.

Для нахождения эмпирических связей взвеси с показателем ослабления рекомендуется измерять его в средней или, еще лучше, в длинноволновой области спектра, где минимально влияние на изменчивость ПОС желтого вещества. Желтое вещество (ЖВ) наиболее сильно поглощает свет в коротковолновой части спектра, с увеличением длины волны поглощение им быстро уменьшается по экспоненциальному закону. Вклад ЖВ в дисперсию ПОС, согласно [12], составляет: на длине волны 400 нм для поверхностных прибрежных вод 4 %, для океанических вод 32 %; на 500 нм — для прибрежных вод 0,2 %, для океанических 2 %; на 600 нм — во всех водах вклад ЖВ в дисперсию ПОС практически нулевой.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Связи биооптических характеристик в разных водоемах.** В табл. 1 и 2 приведены формулы для определения экологических характеристик вод по измерениям показателя ослабления света и глубины видимости белого диска. Формулы связи для разных водоемов отличаются, что объясняется различным количественным и качественным составом в них взвешенных веществ.

Во всех водоемах наблюдается высокий коэффициент корреляции хлорофилла с  $\varepsilon_B$  и  $Z_6$ . В то же время вклад поглощения света хлорофиллом в показатель ослабления света в средней части спектра в поверхностных водах, согласно [12], составляет 1–2 % (см. табл. 2). Высокие коэффициенты кор-

Таблица 1

**Параметры связи между биооптическими характеристиками в поверхностных байкальских водах [13] и в водах Черного моря [14]**

Формула связи	Границы действия формулы	СКО	Коэффициент корреляции
<i>Озеро Байкал</i>			
$\lg C_{\text{хл}} = 1,61 \lg \varepsilon(529) + 0,075$	0,39–1,61, м <sup>-1</sup>	45 %	0,92
$\lg C_{\text{хл}} = 1,87 - 1,91 \lg Z_6$	5–19, м	33 %	0,95
$B = 0,85 \varepsilon(529) + 0,18$	0,51–1,08, м <sup>-1</sup>	0,1 мг/л	0,85
$B = 5,76/Z_6 + 0,25$	5–19, м	0,08, мг/л	0,95
$\lg N_{\text{цв}} = 1,55 - 0,71 \lg Z_6$	5–18, м	38 %	0,89
<i>Черное море</i>			
$B = 3,02 \varepsilon(625) - 0,31$	0,16–0,33, м <sup>-1</sup>	0,07, мг/л	0,89
$\lg C_{\text{хл}} = 1,72 - 2,11 \lg Z_6$	1–27, м	33 %	0,85
$\lg P_0 = 3,38 - 2,24 \lg Z_6$	1–24, м	0,37	0,85

Примечание.  $\varepsilon$  — показатель ослабления света, м<sup>-1</sup>;  $Z_6$  — глубина видимости белого диска, м;  $B$  — концентрация взвеси, мг/л;  $C_{\text{хл}}$  — концентрация хлорофилла, мг/м;  $N_{\text{цв}}$  — цвет воды, балл;  $P_0$  — первичная продукция, мг С/(м<sup>3</sup>·сут).

Таблица 2

**Формулы связи между биооптическими характеристиками в поверхностных океанических водах [4]**

Район	Формула связи	Границы действия формулы	СКО	Коэффициент корреляции
Океанические воды тропической зоны Атлантического океана	$\lg C_{\text{хл}} = 1,94 \lg \varepsilon(500) + 0,2$ [4]	0,08–0,19, м <sup>-1</sup>	0,01 мг/м <sup>3</sup>	0,81
Прибрежные воды тропической зоны Атлантического океана	$\lg C_{\text{хл}} = 0,89 \lg \varepsilon(500) - 0,08$ [4]	0,24–0,45, м <sup>-1</sup>	0,08 мг/м <sup>3</sup>	0,68
Океанические воды Тихого и Атлантического океанов	$\lg C_{\text{хл}} = 2,83 - 3,0 \lg Z_6$ [5]	3,5–17, м	–	0,90

Примечание.  $\varepsilon$  — показатель ослабления света, м<sup>-1</sup>;  $Z_6$  — глубина видимости белого диска, м;  $C_{\text{хл}}$  — концентрация хлорофилла, мг/м<sup>3</sup>. Прочерк — нет данных.

Таблица 3

Концентрация хлорофилла, рассчитанная по глубине видимости белого диска в разных водоемах

Водоем	Формула	$C_{\text{хл}}$ , мг/м <sup>3</sup>		
		$Z_6$ , м		
		5	10	15
Озеро Байкал	$\lg C_{\text{хл}} = 1,87 - 1,91 \lg Z_6$	3,4	0,91	0,42
Черное море	$\lg C_{\text{хл}} = 1,72 - 2,11 Z_6$	1,8	0,41	0,17
Океанические воды	$\lg C_{\text{хл}} = 2,83 - 3,0 \lg Z_6$	5,4	0,68	0,20

реляции в данном случае — это следствие не прямого, а косвенного влияния пигментов фитопланктона на гидрооптические характеристики через концентрацию органической (фитопланктон) взвеси, с которой пигменты тесно связаны. На данную связь влияет степень упаковки пигментов — их количество в единичной клетке водоросли. Внутриклеточная концентрация пигментов в водорослях зависит от ряда факторов: видового состава, световых условий обитания, температуры воды, содержания кислорода и биогенных веществ. Сочетание этих факторов в водоеме определяет для него региональную связь концентрации хлорофилла с гидрооптическими характеристиками.

Для примера в табл. 3 приведены результаты расчета концентрации хлорофилла в разных водоемах по региональным уравнениям связи  $C_{\text{хл}} = f(Z_6)$ . При одинаковой глубине видимости белого диска концентрация хлорофилла в представленных водоемах различается в 2–3 раза.

На рис. 1 показана связь концентрации взвеси и концентрации хлорофилла с глубиной видимости белого диска и с показателем ослабления направленного света в поверхностных водах оз. Байкал, а на рис. 2 и 3 — связь концентрации хлорофилла с показателем ослабления света и глубиной видимости белого диска в тропических водах Атлантического океана.

Кроме приведенных в табл. 1 и 2 формул связи концентрации взвеси и хлорофилла с показателями ослабления и глубиной видимости белого диска из работ [13–15], в списке литературы дополнительно приведены работы [16–26], в которых исследовались подобные связи.

**Определение толщины эвфотического слоя.** Толщина эвфотического слоя — это показатель состояния экосистемы водоема. Эвфотическим слоем называют поверхностный слой вод, в котором в результате поглощения фитопланктоном солнечной радиации происходит производство им первичной продукции. При этом важна не вся радиация, а только заключенная в спектральной области 350–700 нм, так как излучение с большими и меньшими длинами волн не влияет на процессы фотосинтеза. Эта часть солнечного излучения называется фотосинтетически активной радиацией (ФАР).

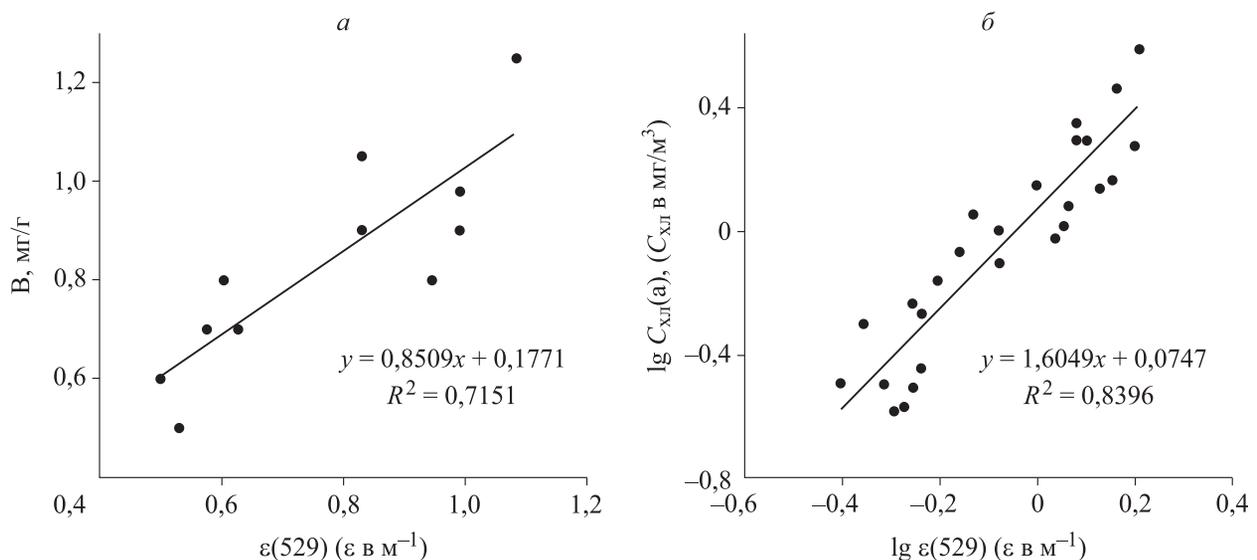


Рис. 1. Связь концентрации взвеси с глубиной видимости белого диска (а) и концентрации хлорофилла с показателем ослабления направленного света (б) в поверхностных водах оз. Байкал.

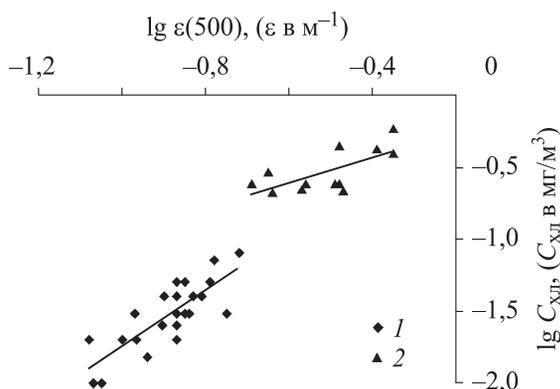


Рис. 2. Связь концентрации хлорофилла с показателем ослабления в океанических и прибрежных водах в тропической зоне Атлантического океана.

Воды: 1 — океанические, 2 — прибрежные.

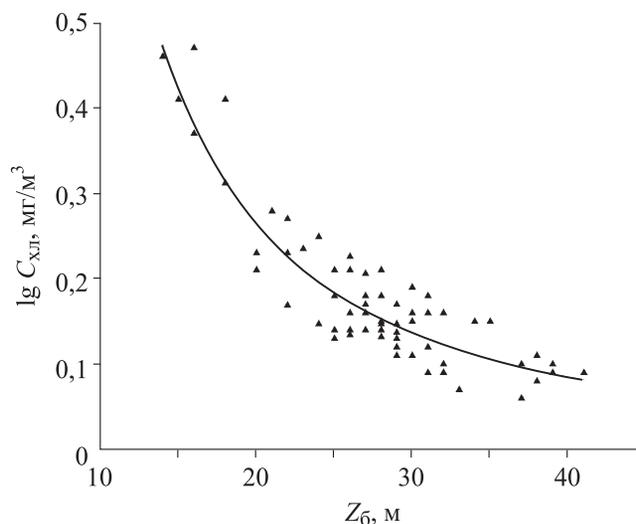


Рис. 3. Связь концентрации хлорофилла на поверхности (0 м) с глубиной видимости белого диска в тропических водах Атлантического океана.

Толщину эвфотического слоя  $H_{\text{эвф}}$  оценивают по глубине, на которой облученность в области ФАР еще достаточна для производства первичной продукции. Считается, что это происходит на глубине, где (при высоком стоянии Солнца) уровень облученности составляет 0,01 от облученности моря на глубине  $H = 0$  м, т. е. непосредственно под его поверхностью. Величину  $H_{\text{эвф}}$ , как правило, рассчитывают по вертикальному распределению суммарной радиации в спектральной области 350–700 нм, однако в ряде случаев ограничиваются спектральным диапазоном 400–700 нм. Данное обстоятельство объясняется тем, что в области 350–400 нм (ультрафиолет) показатели вертикального ослабления света велики, и солнечная радиация в этой спектральной области быстро затухает в тонком поверхностном слое.

Для биологических целей важно знать толщину эвфотического слоя для суммарной квантовой облученности  $H_{\text{эвф.квант}}$ , так как биохимические реакции, протекающие в фотосинтезирующих водорослях, носят квантовый характер. Ее определяют, измеряя в море вертикальное распределение энергетической облученности в области ФАР, и, используя соответствующее соотношение между величинами энергетической  $E(\lambda)$  и квантовой облученностей  $Q(\lambda)$ , рассчитывают квантовую облученность:

$$Q(\lambda), \text{квант}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{с}) = \lambda / 1987 \cdot 10^{19} E(\lambda), \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{м}).$$

Для измерения непосредственно квантовой облученности разработаны специальные фотометры — квантометры. Однако из-за специфичности такого прибора представляют практический интерес более простые методы оценки толщины эвфотического слоя.

В монографии [6] для океанских вод разработан метод расчета вертикального распределения суммарной квантовой облученности  $Q$  в диапазоне 350–700 нм по измерениям энергетической облученности  $E \downarrow$  не во всей области ФАР, а на длине волны  $\lambda = 465$  нм, на которой в океанских водах наблюдается минимум в спектральном распределении показателя вертикального ослабления дневного света. Расчет производится по формуле

$$Q_Z(350 - 700) / Q_0(350 - 700) = [0,23 + 5,6 / (7,3 + Z)] E_Z \downarrow(465) / E_0 \downarrow(465),$$

где  $Q_Z$  — суммарная квантовая облученность в диапазоне 350–700 нм на глубине  $Z$  м;  $Q_0$  — суммарная квантовая облученность на глубине 0 м;  $E_Z$  — энергетическая облученность на глубине  $Z$  м;  $E_0$  — энергетическая облученность на глубине 0 м.

Аналогичный метод представлен в работе [27] для вод Черного моря, для которых предложено использовать измерения вертикального распределения энергетической облученности на длине волны 520 нм (для очень мутных вод на 535 нм):

$$Q_Z(350 - 700) / Q_0(350 - 700) = [0,16 + 5,46 / (6,5 + Z)] E_Z \downarrow(520) / E_0 \downarrow(520).$$

В ряде работ [28–30] исследовалась связь  $H_{\text{эфф}}$  с глубиной видимости белого диска. В результате этих исследований установлены простые соотношения толщины эвфотического слоя для суммарной квантовой облученности  $H_Q$  с глубиной видимости белого диска  $Z_6$ .

В [28] для зимне-весеннего периода установлена связь вертикального распределения энергетической и квантовой облученностей в Черном море с глубиной видимости белого диска в диапазоне изменения  $Z_6$  5–20 м. Для квантовой облученности глубины, на которых она составляет 0,1 и 0,01 от поверхностной, связаны с  $Z_6$  соотношениями

$$H_Q(0,1) = (1,1 + /-0,1)Z_6; H_Q(0,01) = (2,5 + /-0,2)Z_6.$$

В [29] для вод Норвежского и Баренцева морей получены следующие соотношения с белым диском глубин квантовой облученности:

$$H_Q(0,1) = (1,5 + /-0,3)Z_6; H_Q(0,01) = (3,3 + /-0,7)Z_6.$$

В этой же работе указывается, что для вод около о. Исландия  $H_Q(0,1) = (1,1 + /-0,4)Z_6$ ;  $H_Q(0,01) = (2,8 + /-0,9)Z_6$ .

В [30] по исследованиям в различных океанских водах с глубиной видимости белого диска от 4 до 22 м для квантовой облученности получено в среднем соотношение  $H_Q(0,01) = (3,0 + /-0,7)Z_6$ .

Из приведенных данных о связи толщины эвфотического слоя для квантовой облученности с глубиной видимости белого диска в разных водоемах видно, что параметры этих связей носят региональный характер.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экологическое состояние водоемов постоянно изменяется под воздействием природных и антропогенных факторов. Для рационального использования водоемов необходимо оценивать их текущее состояние. В связи с этим актуально осуществление оперативного экологического мониторинга водоемов. Для этих целей необходимо использование методов, позволяющих оценивать состояние экосистемы водоема с небольшими затратами времени. К их числу относится измерение гидрооптических характеристик.

Как подтвердило наше исследование, для целей экологического мониторинга с учетом информативности и несложности измерений наиболее актуально использование двух гидрооптических характеристик: показателя ослабления направленного света  $\varepsilon$  и глубины видимости белого диска  $Z_6$ .

Теоретический анализ показывает, что они содержат информацию о концентрации в воде примесей в виде взвешенных частиц минерального и органического происхождения и растворенных органических соединений. Вследствие этого они служат эффективными показателями экологического состояния водоема. Однако решение обратной задачи — определение по величинам  $\varepsilon$  и  $Z_6$  содержания примесей теоретическим путем — в настоящее время не представляется возможным. Поэтому для этой цели используют эмпирический подход — находят связи гидрооптических характеристик с концентрацией примесей в воде, определенной аналитическими методами. Такие связи носят региональный характер, что объясняется разным составом взвешенных и растворенных веществ в водоемах.

Также важный показатель состояния экосистемы водоема — это толщина его эвфотического слоя  $H_{\text{эфф}}$ . Ее определяют по вертикальному распределению квантовой облученности, для измерения которой используют сложные приборы — квантометры. В то же время, как показано в отечественных и зарубежных работах [28–30], при использовании эмпирических связей эта экологическая характеристика может быть быстро определена с помощью наиболее простого оптического прибора — белого диска.

*Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках государственного задания по теме № 0827–2019–0002 и Лимнологическом институте СО РАН (проект № 0345–2019–0008).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alm G.** Limnologisch-fischereiliche Untersuchungen in dem Kälarne-Seen // Inst. Freshwater Res. Rep., Lund. — 1960. — N 41. — S. 5–148.
2. **Carlson R.E.** A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. — 1977. — Vol. 22, N 2. — P. 361–369.

3. **Harrison J.W., Smith R.E.H.** The spectral sensitivity of phytoplankton communities to ultraviolet radiation-induced photoinhibition differs among clear and humic temperate lakes // *Limnology and Oceanography*. — 2011. — N 56 (6). — P. 2115–2126.
4. **Апонасенко А.Д.** Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. техн. ун-та, 2002. — 46 с.
5. **Бульон В.В.** Связь между концентрацией планктона и прозрачностью воды в озерах и водохранилищах // *Морфология, систематика и эволюция животных: Сб. науч. работ.* — Л.: Изд-во Зоолог. ин-та, 1978. — С. 49–50.
6. **Ерлов Н.Г.** Оптика моря. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 248 с.
7. **Копелевич О.В.** Исследование вертикальной стратификации рассеивающих свойств морской воды с помощью погружаемого малоуглового измерителя рассеяния // *Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане.* — М.: Наука, 1975. — С. 54–60.
8. **Карабашев Г.С., Кулешов А.Ф., Шестянкин П.П.** Спектральная прозрачность байкальских вод в ультрафиолетовой и видимой частях спектра // *Докл. АН СССР.* — 1989. — Т. 306, № 5. — С. 1091–1094.
9. **Ильмаст Н.В., Китаев С.П., Кучко Я.А., Павловский С.А.** Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центра РАН, 2008. — 92 с.
10. **Китаев С.П.** Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. — Петрозаводск: Изд-во Карел. науч. центр РАН, 2007. — 395 с.
11. **Копелевич О.В., Маштаков Ю.Л., Русанов С.Ю.** Аппаратура и методика исследования оптических свойств морской воды // *Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах.* — М.: Наука, 1974. — С. 97–107.
12. **Копелевич О.В.** Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // *Оптика океана. Т. 1: Физическая оптика океана.* — М.: Наука, 1983. — С. 208–235.
13. **Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.** Оптические характеристики вод и их взаимные корреляции в озере Байкал // *Физика атмосферы и океана.* — 2012. — Т. 48, № 4. — С. 1–9.
14. **Маньковский В.И., Соловьёв М.В., Маньковская Е.В.** Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. — Севастополь: Изд-во Морского гидрофиз. ин-та НАНУ, 2009. — С. 40–41.
15. **Маньковский В.И., Маньковская Е.В.** Связи оптических характеристик с концентрацией хлорофилла в тропических водах Атлантического океана // *Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Морские биологические исследования: достижения и перспективы. К 145-летию Института биологии южных морей».* — Севастополь: ЭКОСИ Гирофизика, 2016. — Т. 2. — С. 358–361.
16. **Маньковский В.И.** Оценки концентраций общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска // *Оптика атмосферы и океана.* — 2018. — Т. 31, № 4. — С. 313–317.
17. **Витюк Д.М.** Использование визуальных наблюдений для расчета концентрации взвеси в морской воде // *Взвешенное вещество и его биогенные компоненты.* — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 70–72.
18. **Шемшур 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.
19. **Шемшур В.Е., Финенко З.З., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В., Крупаткина Д.К.** Связь концентрации хлорофилла и первичной продукции с относительной прозрачностью воды в Черном море // *Оптика моря и атмосферы: Тез. докл. 11 Пленума Рабочей группы по оптике океана.* — Красноярск: Изд-во Ин-та биофизики СО АН СССР, 1990. — Ч. 1. — С. 176–177.
20. **Владимиров В.Л., Безбородов А.А., Мартынов О.В., Овсяный Е.И., Диалло Б.** Связь глубины видимости белого диска с концентрацией взвеси в водах шельфовой зоны Гвинейской республики // *Морской гидрофиз. журн.* — 1989. — № 5. — С. 53–58.
21. **Маньковский В.И.** Связь глубины видимости белого диска с биооптическими характеристиками вод Черного моря // *Морской гидрофиз. журн.* — 1999. — № 5. — С. 78–80.
22. **Маньковский В.И., Соловьёв М.В.** Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // *Морской гидрофиз. журн.* — 2003. — № 2. — С. 60–65.
23. **Маньковский В.И., Маньковская Е.В.** Использование биооптических связей для определения характеристик состояния морской среды при проведении оптического мониторинга в Черном море с применением прозрачномеров // *Морской гидрофиз. журн.* — 2008. — № 2. — С. 37–45.
24. **Афонин Е.И., Соловьёв М.В., Башарин В.А.** Определение характеристик морской взвеси из оптических измерений // *Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря.* — Севастополь: Изд-во Морского гидрофиз. ин-та АН УССР, 1980. — С. 61–67.
25. **Агафонов Е.А., Витюк Д.М., Ковалёв А.В.** О возможности ориентировочной оценки распределения концентрации взвеси в морской воде по показателю ослабления излучения // *Морские гидрофиз. исслед.* — 1978. — № 2. — С. 172–179.
26. **Маньковский В.И.** Многолетняя изменчивость экосистемы Черного моря по оптическим данным // *Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря.* — Севастополь: ЭКОСИ Гирофизика, 2011. — С. 223–241.

27. **Левин И.М., Николаев В.П.** Об оценке вертикального ослабления квантовой облученности в области фотосинтетически активной радиации в Черном море // Океанология. — 1992. — Т. 32, № 2. — С. 241–245.
28. **Маньковский В.И., Маньковская Е.В.** Метод определения характеристик эвфотического слоя в Черном море по глубине видимости белого диска в зимне-весенний период // Морской гидрофиз. журн. — 2013. — № 6. — С. 15–26.
29. **Eyvind A.** Relations between total quanta blue irradiance and Secchi disk observations in the Norwegian and Barents seas // Studies in Physical Oceanography. — 1980. — N 42. — P. 11–27.
30. **Kullenberg G.** Relation between optical parameters in different oceanic areas // Rep. Inst. for Fysisk Oceanografi Kobenhavns Universitet. — 1979. — N 42. — P. 57–80.

*Поступила в редакцию 15.10.2018*

*После доработки 09.11.2018*

*Принята к публикации 02.04.2019*

---