

*И.А. Суторихин, В.И. Букастый, А.В. Котовищikov, О.Б. Акулова*

**Исследования спектральной прозрачности воды  
и концентрации хлорофилла в пойменном озере  
(бассейн Верхней Оби, Алтайский край)**

*I.A. Sutorikhin, V.I. Bukaty, A.V. Kotovshchikov, O.B. Akulova*

**Studies on Spectral Water Transparency  
and Chlorophyll Concentrations in Floodplain Lake  
(Upper Ob Basin, Altai Krai)**

Приведены результаты измерений спектральной прозрачности в диапазоне длин волн 400–1000 нм в осенний период 2011 г. Изучена взаимосвязь между спектральной прозрачностью и концентрацией хлорофилла *a*, определяемой стандартным экстракционным методом. Проведено сравнение эмпирических зависимостей прозрачности по диску Секки от содержания хлорофилла, приведенных из литературных данных для различных типов водоемов, с полученными данными наших спектральных измерений.

**Ключевые слова:** спектральная прозрачность, показатель ослабления света, фитопланктон, хлорофилл.

The results of measuring spectral transmittance in the wavelength range 400–1000 nm in autumn 2011 shows the relationship between spectral transmittance and concentration of chlorophyll *a*, determined by the standard extract method. The empirical transparency according to Secchi disk on the content of chlorophyll cited from the literature for different types of reservoirs was compared with the findings of our spectral measurements.

**Key words:** spectral transparency, attenuation of light, phytoplankton chlorophyll.

В связи с возрастающим антропогенным воздействием на водоемы возникает проблема описания структуры и функционирования водных экосистем в изменяющихся условиях.

В настоящее время в исследовании водных экосистем оперативно разрабатывается и активно применяется на практике спектрофотометрический метод определения прозрачности. Необходимо отметить, что в последние годы в научной литературе представлены экспериментальные данные по взаимосвязи между прозрачностью водоемов и содержанием хлорофилла, в основном, для морей и океанов [1–7]. Подобные исследования для внутренних водоемов в нашей стране (озер, водохранилищ, рек и т.д.) проводились эпизодически.

Однако результаты, полученные различными авторами, зачастую характеризуются разобщенностью и нередко несопоставимостью, что требует проведения дальнейших исследований в этом направлении с учетом комплексной оценки сложных полидисперсных, поликомпонентных водных экосистем, в частности внутренних водоемов.

В гидрооптике нередко под прозрачностью понимают глубину видимости погруженного в воду белого диска до полного исчезновения его изображения.

Отметим, что ученые в ходе полевых исследований предоставляют данные о величине прозрачно-

сти, измеренной, в основном, методом по диску Секки. Погрешность данного метода изменяется в различных экспериментах в пределах 8–20%. Под трофностью понимается характеристика водоема по его биологической продуктивности. В случае интенсивного поступления в водоем полидисперсных частиц взвеси, содержащей главным образом минеральные взвешенные частицы, определение прозрачности воды может давать ошибочное представление об уровне развития фитопланктона, степень развития которого, в свою очередь, характеризует величину прозрачности в озерах. Фитопланктон является первичным звеном в трофической цепи поверхностных вод, который играет важную роль в функционировании водных экосистем. Он характеризуется широким колебанием количественных показателей и неравномерностью распределения, поэтому для получения надежных показателей состояния водных экосистем и качества воды необходимо иметь достаточное количество данных о видовом составе, численности и биомассе фитопланктона. Данные относительно развития фитопланктона необходимы прежде всего для характеристики трофности водных объектов [8, 9].

Основная цель наших исследований – проведение сезонных измерений спектральной прозрачности воды (на примере пойменного озера) на различных глубинах и нахождение эмпирической зависи-

мости прозрачности от концентрации хлорофилла. Подобные исследования представляются актуальными, так как между концентрацией хлорофилла  $a$ , являющимся основным пигментом фитопланктона, и его биомассой существует прямая зависимость [10–12]. Поэтому, исследуя взаимосвязь между прозрачностью и содержанием хлорофилла, изучая сезонный ход подобной зависимости применительно к внутренним водоемам определенного типа, можно на основании оперативных данных о прозрачности с большой достоверностью определить трофический статус и биопродуктивность конкретных водных экосистем.

В основе разработки оперативного и функционального на практике спектрофотометрического метода определения прозрачности водоемов лежат измерения на спектрофотометре отношений двух световых потоков, прошедших через объемы эталонного (в нашем случае – дистиллированная вода) и исследуемого образцов. Отбор проб воды проводили в осенний период 2011 г. на акватории озера-старицы Лапа, принадлежащего к придаточной системе правобережной поймы Оби и расположенного в окрестностях Барнаула. Озеро непероточное и сообщается с рекой только в период весеннего половодья. Измерения прозрачности воды проводились в лабораторных условиях на спектрофотометре СФ-46 с погрешностью, равной 0,5%.

Водные пробы, взятые на различной глубине (максимальная глубина озера 9 м), помещались в кварцевые кюветы размером 12×30 мм с длиной пути 12 мм. Спектральная прозрачность измерялась в спектральном диапазоне 400–1000 нм.

Далее рассчитывалась важная гидрооптическая характеристика – показатель ослабления  $\varepsilon$ , являющийся суммой показателей поглощения  $\kappa$  и рассеяния  $\sigma$

$$\varepsilon = \kappa + \sigma.$$

В связи с тем, что ослабление света в толще воды в водоеме обусловлено в основном поглощением и рассеянием на взвешенных частицах, для оценки оптических характеристик необходимо определить микрофизические параметры гидрозолей. Известно, что в стоячих и слабопроточных водоемах, к которым принадлежит изучаемый нами объект, основную часть взвешенного вещества составляют клетки микроскопических водорослей, обитающих в толще воды фитопланктона. В связи с этим нами проводились также измерения их размеров с помощью светового микроскопа Nikon Eclipse 80 i. По данным измерений размеры частиц в пробах находились в пределах 2–14 мкм по диаметру. Типичная гистограмма распределения частиц по диаметрам ( $D$ ) в пойменном озере Лапа приведена на рисунке 1.

Пробы воды для определения хлорофилла  $a$  отбирались на разных глубинах озера. Затем планктон концентрировали путем фильтрации воды из объема 100–700 мл через мембранные фильтры «Владипор» МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм. Концентра-

цию хлорофилла оценивали стандартным спектрофотометрическим методом на длине волны 664 нм согласно ГОСТу 17.1.4.02-90 и методическим рекомендациям. Погрешность определения хлорофилла составила не более 10%.

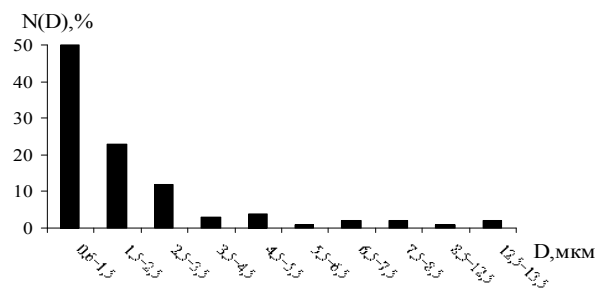


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц фитопланктона по размерам

На рисунке 2 представлены результаты расчетов спектрального показателя ослабления света на различных глубинах озера по данным измерений спектральной прозрачности, проведенных 13 октября 2011 г.

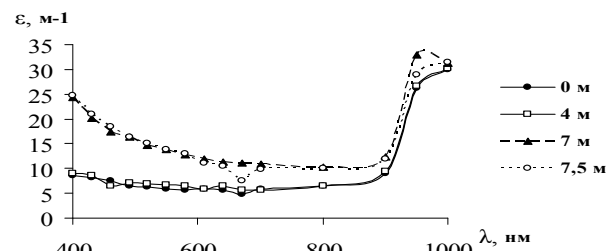


Рис. 2. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на различных глубинах водоема

Показатель ослабления определялся по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{L} \ln 1/T, \quad (1)$$

где  $L$  – длина кюветы, равная 12 мм;  $T$  – прозрачность.

Из рисунка видно, что максимальные значения показателя ослабления имеют место в пробах воды, отобранных с более глубоких слоев.

На рисунке 3 показаны результаты измерений концентрации хлорофилла  $a$  стандартным методом в зависимости от глубины водоема. Обнаружено, что вертикальное распределение содержания пигмента имеет стратифицированный характер с резким скачком на глубине 6–7 м. Придонный максимум при этом более чем в два раза превышал значения в эпилимнионе. При этом содержание разрушенного хлорофилла (феопигментов) в гиполимнионе достигало 80%, а в верхнем слое составило в среднем 34%.

На основании результатов измерений, проведенных в период с 13 сентября по 13 октября 2011 г., спектральной прозрачности и соответствующих

данных по концентрации хлорофилла, на рисунке 4 приведена их обобщенная зависимость. Взаимосвязь прозрачности от концентрации хлорофилла  $a$  показывает, что при увеличении концентрации хлорофилла в водоеме прозрачность уменьшается.

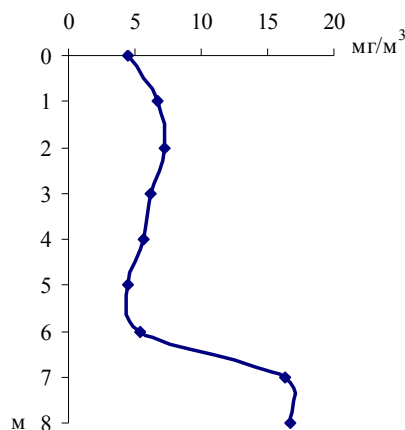


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания хлорофилла  $a$  (13.10.2011 г.)

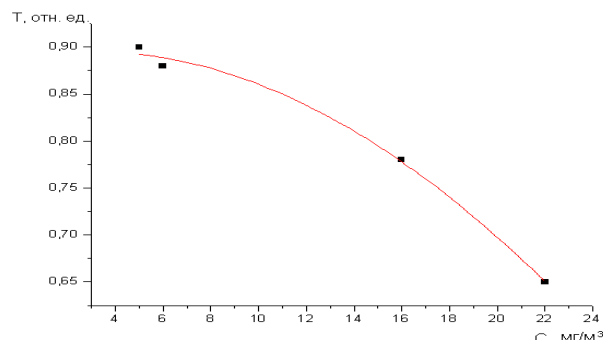


Рис. 4. Зависимость прозрачности на длине волны 430 нм от концентрации хлорофилла  $a$

На рисунке 4 показана аппроксимационная кривая, представляющая собой гауссовую функцию вида

$$T = T_0 + \frac{A}{\omega\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(C-C_c)^2}{\omega^2}}, \quad (2)$$

где  $T_0 = -1,18$ ;  $C_c = 3,16$ ;  $\omega = 75,39$ ;  $A = 196,16$ .

Представляет интерес сравнить полученные нами результаты с данными других исследований прозрачности водоемов по диску Секки.

В работах, например [3, 4], посвященных изучению экспериментальной зависимости оптической прозрачности  $T_\delta$  (в м) по диску Секки от концентрации  $C$  (в мг/м³) для различных водных экосистем используется эмпирическая зависимость вида

$$T_\delta = \alpha C^{-b}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $b$  – постоянные параметры, различные для отдельных групп водоема.

Чтобы сравнить наши результаты измерений спектральной прозрачности, воспользуемся уравнением, связывающим прозрачность по диску Секки с показателем ослабления, полученным по формуле (1). Данное уравнение имеет вид [1]

$$T_\delta = d/\varepsilon,$$

где  $d$  – параметр, который для водоемов в большинстве случаев принимается равным 8. При  $\alpha = 6,46$  и  $b = 1,0$  наши результаты можно описать функцией вида (3).

Результаты измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в фитопланктоне пойменного озера показали обратную зависимость величины прозрачности на длине волны 430 нм от концентрации основного фотосинтетического пигмента. Коэффициент корреляции при этом равен 0,98 и достоверен при  $p = 0,07$ .

Таким образом, в результате наших исследований найдена эмпирическая связь между прозрачностью и концентрацией хлорофилла в водоеме, которая может быть описана уравнением (3).

## Библиографический список

1. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л., 1983.
2. Кронберг П. Дистанционное изучение земли. – М., 1988.
3. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. – СПб., 1994.
4. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. – М., 2001.
5. Апонасенко А.Д. Количественная закономерность функциональной организации водных экосистем: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – СПб., 2002.
6. Апонасенко А.Д., Щур Л.А., Лопатин В.Н. Связь содержания хлорофилла с биомассой и дисперсной структурой фитопланктона // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 412, №5.
7. Суторихин И.А., Бортников В.Ю., Анисимов А.П., Котовщиков А.В. Измерение прозрачности и концентрации хлорофилла в поверхностных водах: мат. Третьей всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Барнаул, 2010.
8. Бульон В.В. Первичная продукция планктона и классификация озер. Продукционно-гидробиологические исследования водных экосистем. – Л., 1987.
9. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. – М., 2004.
10. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. – Минск, 1960.
11. Сиренко Л.А., Курейшевич А.В. Определение содержания хлорофилла в планктоне пресных вод. – Киев, 1982.
12. Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов / под ред. И.Л. Пыриной. – СПб., 1993.