

УДК 577.4

*И.А. Суторихин, В.И. Букатый, А.В. Котовщиков, О.Б. Акулова*  
**Сезонная динамика спектральной прозрачности воды  
 и концентрации хлорофилла в пойменном озере  
 с учетом дисперсности частиц фитопланктона\***

*I.A. Sutorikhin, V.I. Bukaty, A.V. Kotovschikov, O.B. Akulova*  
**Seasonal Dynamics of Spectral Water Transparency  
 and Chlorophyll Concentrations in the Floodplain Lake  
 Taking into Account Dispersion of Particles of Phytoplankton**

Приведены результаты сезонных измерений спектральной прозрачности воды в пойменном озере Лапа (бассейн Верхней Оби, Алтайский край) в диапазоне длин волн 400–800 нм в осенний, зимний и весенний периоды 2011–2012 гг. Найдена зависимость между спектральной прозрачностью и концентрацией хлорофилла «а», определяемой стандартным спектрофотометрическим методом. Проведен анализ полученных экспериментальных данных с учетом дисперсного состава частиц водорослей фитопланктона.

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

Проблема мониторинга состояния водных объектов в последнее время во многих странах приобретает всё больший интерес. Большинство водных объектов Алтайского края под влиянием все усиливающегося антропогенного воздействия затронуто процессами эвтрофикации. Под эвтрофикацией понимается повышение биологической продуктивности водных объектов (водоемов) в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов [1]. При этом возникает проблема описания структуры и функционирования водных экосистем в изменяющихся условиях.

Для целей экологического мониторинга водоемов активно используются исследования прозрачности воды, которые могут давать информацию, необходимую для оценки количества загрязняющих веществ, микроорганизмов, а также сведения для оценки количества солнечной радиации, поглощаемой в поверхностном слое водного объекта. Для этого необходимо изучение фитопланктона, который оказывает непосредственное влияние на качество воды, благодаря структуре и функциональным особенностям определяет состояние водных экосистем в целом. *Фитопланктон* в озерах – это первое

The article describes results of seasonal measurements of spectral transparency of water in the floodplain lake Lapa (the basin of the Upper Ob River, Altai Krai) in the wavelength range 400–800 nm in the autumn, winter and spring, 2011–2012. It was discovered that the spectral transparency depends on concentration of chlorophyll “a” defined by the standard spectrophotometric method. The researchers analyze the experimental data with respect to the composition of the dispersed particles of algae phytoplankton.

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

звено пищевой цепи, совокупность взвешенных в толще воды микроскопических водорослей. Используя энергию солнечного света, эти организмы из углекислого газа и воды производят органическое вещество. Кроме углерода, кислорода и водорода им нужны еще некоторые элементы, в частности, обязательно *азот* и *фосфор*. В пресных водах именно фосфор чаще всего оказывается элементом, нехватка которого в среде ограничивает продукцию фитопланктона, скорость прироста его массы [1].

В гидрооптическом отношении озера Западной Сибири изучены совершенно недостаточно. В этом направлении можно, например, сослаться на работы [2–6]. В связи с этим требуются дополнительные исследования в данной области, а именно: изучение сезонной динамики спектральной прозрачности, а также влияние на нее дисперсной структуры водорослей фитопланктона.

В настоящее время в исследовании водных экосистем применяется спектрофотометрический метод определения прозрачности воды. В научной литературе представлены экспериментальные данные по взаимосвязи между прозрачностью воды и содержанием хлорофилла для морей и внутренних вод [7–13].

\* Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131 «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения».

Вышеизложенное послужило основанием для продолжения наших исследований, основной целью которых является проведение сезонных измерений спектральной прозрачности воды (на примере пойменного озера) на различных глубинах и нахождение зависимости прозрачности от концентрации хлорофилла. Подобные исследования представляются актуальными, так как между концентрацией хлорофилла «а», являющимся основным пигментом фитопланктона, и его биомассой существует прямая зависимость [14–16]. 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.

Материалом для данной работы послужили количественные пробы фитопланктона в осенний, зимний и весенний периоды 2011–2012 гг. на различных глубинах пойменного озера Лапа. Обработка проб проводилась с использованием стандартных гидробиологических методик. Планктон концентрировали фильтрацией воды из объема 0,1–2,2 дм<sup>3</sup> через мембранные фильтры «Владипор» МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм. Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах определяли стандартным спектрофотометрическим методом на длине волны 664 нм согласно ГОСТу 17.1.4.02-90 и методическим рекомендациям [17]. Погрешность определения хлорофилла составила не более 10%.

Измерения спектральной прозрачности воды проводились в лабораторных условиях на спектрофотометре СФ-46 с погрешностью, равной 0,5%.

В основе разработки оперативного и функционального на практике спектрофотометрического метода определения прозрачности водоемов лежат измерения на спектрофотометре отношений двух световых потоков: потока, прошедшего через контрольный образец (в нашем случае, дистиллированная вода), и потока, падающего на исследуемый образец.

Водные пробы, взятые на различной глубине (максимальная глубина озера 9 м), помещались

в кварцевые кюветы размером 10×10 мм с высотой 50 мм. Спектральная прозрачность измерялась в диапазоне 400–800 нм. Далее рассчитывалась важная первичная гидрооптическая характеристика – показатель ослабления света  $\varepsilon$  по формуле

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

где  $L$  – рабочая длина кюветы, равная 10 мм;  $T$  – коэффициент пропускания (прозрачность) воды.

Известно [7], что на ослабление света в воде природных водоемов влияет: 1) чистая вода (под чистой водой мы будем понимать химически чистое вещество, являющимся смесью нескольких видов изотопов молекулы воды с различной молекулярной массой); 2) растворенные органические и неорганические вещества; 3) взвесь (минеральная и органическая); 4) пузырьки воздуха и неоднородности, возникающие в результате турбулентности.

В связи с тем, что ослабление света в водоеме обусловлено, в основном, поглощением и рассеянием на взвешенных частицах, а основную часть взвешенного вещества составляют клетки микроскопических водорослей, обитающих в толще воды – фитопланктон, то необходимо определить микрофизические параметры гидрозолей. В связи с этим нами проводились измерения их размеров с помощью светового микроскопа Nikon Eclipse 80 i., а также определение их счетной (числовой) концентрации. По данным сезонных измерений размеры частиц в пробах находились в пределах 0,6–13 мкм по диаметру. Типичные гистограммы распределения частиц по диаметрам (D) в осенний, зимний и весенний периоды 2011–2012 гг. для озера Лапа приведены на рисунке 1.

Из этого рисунка видно, что в зимний, а особенно в весенний периоды существенно увеличилась доля мелких частиц водорослей фитопланктона. При этом среднеарифметический диаметр частиц составил 2,1 мкм (13 октября 2011 г.), 1,1 мкм (15 февраля 2012 г.), 1,5 мкм (15 марта 2012 г.) и 0,9 мкм (2 мая 2012 г.). Среднее значение счетной концентрации, измеренной с помощью камеры Нажотта

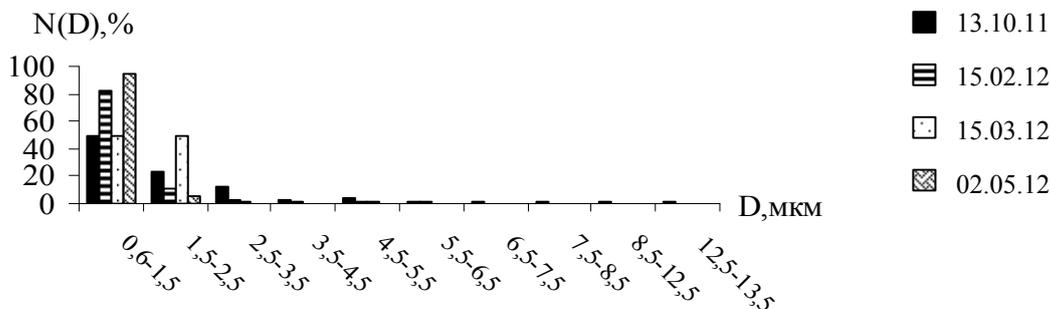


Рис. 1. Сезонная динамика распределения частиц фитопланктона по диаметру

объемом 0,05 мл, –  $\sim 1,3 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$  (15 марта 2012 г.) и  $\sim 4,4 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$  (2 мая 2012 г.). Среднее значение счетной концентрации, измеренной с помощью оптического метода флюктуации прозрачности [7], –  $\sim 5 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$  (15 февраля 2012 г.).

На рисунках 2–5 представлены результаты наших расчетов по спектральному показателю ослабления света на различных глубинах озера по данным сезонных измерений спектральной прозрачности, которые показали, что максимальные значения показателя ослабления имеют место в пробе воды, отобранной с более глубокого слоя (7,5 м).

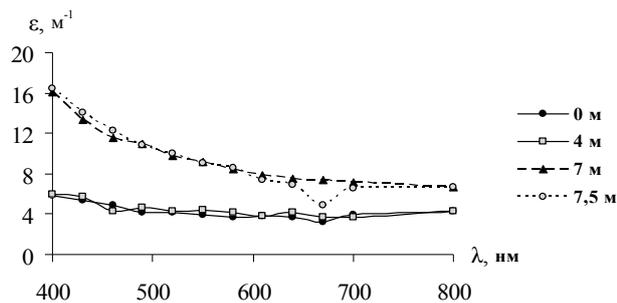


Рис. 2. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на различных глубинах озера 13 октября 2011 г.

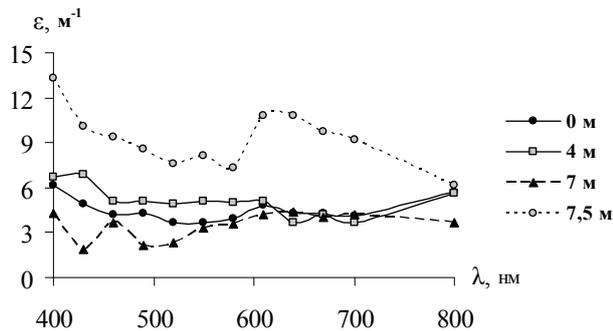


Рис. 3. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на различных глубинах озера 15 февраля 2012 г.

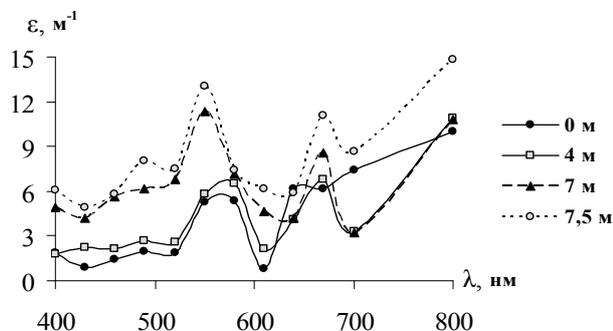


Рис. 4. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на различных глубинах озера 15 марта 2012 г.

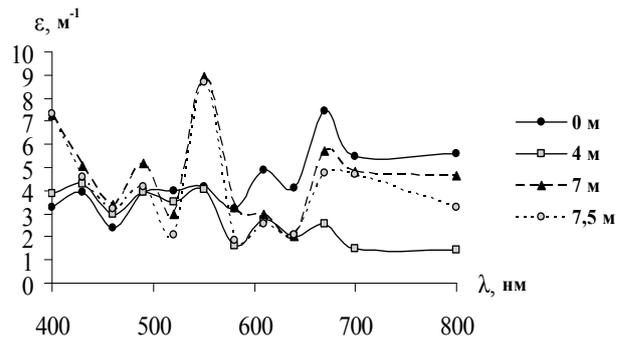


Рис. 5. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на различных глубинах озера 2 мая 2012 г.

Из сравнения рисунков 2–5 видно, что в целом показатель ослабления в диапазоне длин волн 400–800 нм в зимний и весенний (15 марта 2012 г. до вскрытия льда) периоды существенно меньше, чем в осенний период. Это может быть обусловлено, на наш взгляд, изменением соотношения между размерами частиц водорослей фитопланктона и их счетной концентрацией в различные периоды.

Чтобы подтвердить сделанное предположение и оценить влияние рассеивающих и поглощающих свойств частиц фитопланктона на прозрачность, нами проводились измерения коэффициента пропускания воды как до фильтрации, так и после фильтрации пробы. На рисунке 6 представлена соответствующая зависимость показателя ослабления в пробах воды, отобранных 2 мая 2012 г.

Разность между показателями ослабления до фильтрации и после фильтрации, характеризующая именно ослабление на частицах с размерами свыше 0,8 мкм, представлена на рисунке 7.

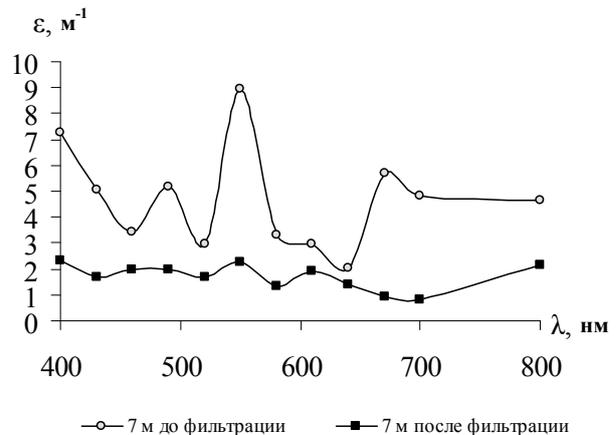


Рис. 6. Зависимость показателя ослабления от длины волны  $\lambda$  на глубине озера 7 м в мае 2012 г.

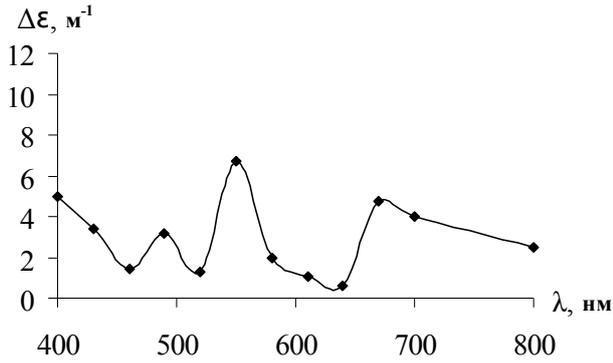


Рис. 7. Спектральная зависимость разности показателей ослабления  $\Delta\epsilon$  до и после фильтрации пробы воды

Указанная на рисунке 7 спектральная зависимость  $\Delta\epsilon$  представляет собой фактически показатель ослабления для крупных частиц (с диаметром более 0,8 мкм). Для сравнения с экспериментальными результатами, показанными на данном рисунке, сделаем оценку показателя ослабления  $\Delta\epsilon$  в соответствии с формулами, приведенными в работе [7]. Для этого будем считать, что исследуемый фитопланктон состоит из монодисперсных частиц с размером, равным среднеарифметическому диаметру реального распределения. Тогда можно записать

$$\Delta\epsilon = N \times \pi \times \overline{D}^2 \times K(\rho) / 4, \quad (2)$$

где  $N$  – концентрация крупных частиц;  $\overline{D}$  – их среднеарифметический диаметр;  $K(\rho)$  – безразмерный поперечник ослабления света, равный сумме безразмерных поперечников поглощения и рассеяния;  $\rho$  – дифракционный параметр Ми;

$\rho = \pi \times \overline{D} / \lambda$ ,  $\lambda = \lambda_0 / n$ ,  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме;  $n$  – показатель преломления воды.

Подставляя значения  $N = 4,4 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ ,  $\overline{D} = 0,9 \text{ мкм}$ ,  $K(\rho) \approx 0,2$  для длины волны  $\lambda = 400 \text{ нм}$  и  $\rho = 9,4$ ,  $n = 1,33$  из формулы (2), находим  $\Delta\epsilon \approx 5,6 \text{ м}^{-1}$ . Следовательно, различие между экспериментальным значением  $\Delta\epsilon$  и расчетным составило около 15%, что можно считать удовлетворительным.

Результаты определения концентрации хлорофилла «а» стандартным экстракционным методом (рис. 8) выявили различия вертикального распределения содержания пигмента в разные сезоны. Осенью и весной распределение имеет стратифицированный характер: в октябре максимум наблюдали в придонном слое (7–8 м), а в мае – в среднем (4 м). Подо льдом в феврале-марте вертикальные различия были выражены слабее в связи с низкой концентрацией хлорофилла «а», тем не менее наиболее высокие значения отмечены в придонном слое. Отметим, что при стратифицированном распределении зеленого пигмента, содержание феопигментов (разрушенных хлорофиллов) осенью в придонном слое достигало 80% от их суммы с «чистым» хлорофиллом, а в верхнем слое составило в среднем 34%. Весной распределение феопигментов было более равномерным при колебаниях от 34 до 49%, с максимумом также у дна.

Таким образом, сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» в фотическом слое пойменного озера характеризовалась максимумом в начале мая и минимумом в подледный период. Повышение показателя в придонном афотическом слое осенью обусловлено, по-видимому, скоплением отмерших клеток водорослей.

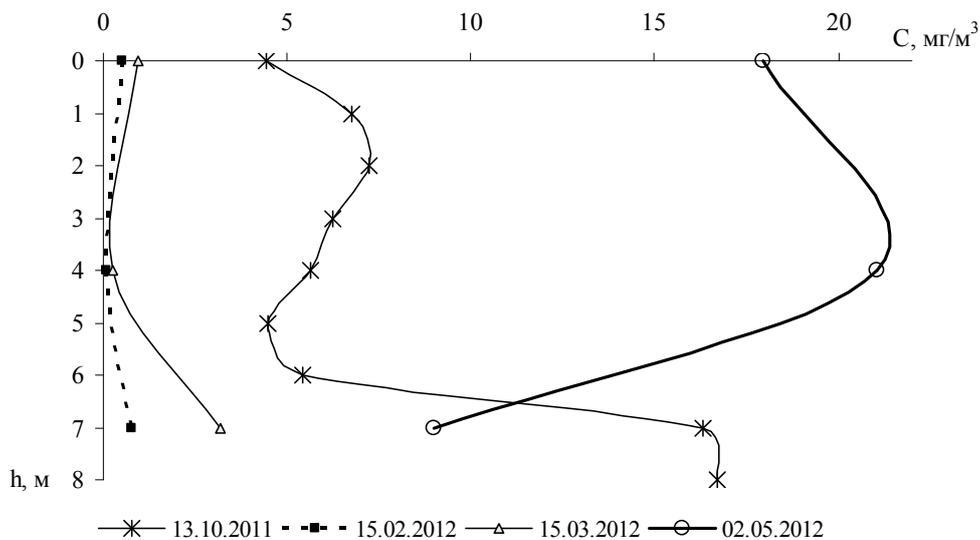


Рис. 8. Вертикальное распределение содержания хлорофилла «а» в оз. Лапа в 2011–2012 гг.

Результаты измерений спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в фитопланктоне озера Лапа показали обратную зависимость величины прозрачности от концентрации основного фотосинтетического пигмента в области его полос поглощения.

Показано существенное влияние дисперсных частиц водорослей фитопланктона на показатель ослабления света в водных пробах.

*Коллектив авторов выражает благодарность Е.Ю. Митрофановой и О.С. Сутченко за предоставленные микрофотографии частиц водорослей фитопланктона.*

### Библиографический список

1. Меншуткин В.В., Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. – М., 2004. – Т. 2.
2. Кириллов В.В., Зарубина Е.Ю., Безматерных Д.М. и др. Сравнительный анализ экосистем разнотипных озер Касмалинской и Кулундинской долин древнего стока. Наука – Алтайскому краю, 2009 г. – Барнаул, 2009. – Вып. 3.
3. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Исследования спектральной прозрачности внутренних водоемов (на примере озера-старицы Лапа Алтайского края) [Электронный ресурс]. – URL: <http://eftj.secna.ru>.
4. Суторихин И.А., Букатый В.И., Котовщиков А.В., Акулова О.Б. Исследования прозрачности и концентрации хлорофилла в бессточном водоеме // Ползуновский альманах. – 2011. – №1.
5. Суторихин И.А., Букатый В.И., Котовщиков А.В., Акулова О.Б. Исследования спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла в пойменном озере (бассейн Верхней Оби, Алтайский край) // Известия АлтГУ. – 2012. – №1/1.
6. Суторихин И.А., Букатый В.И., Котовщиков А.В., Акулова О.Б. Исследования спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла с учетом дисперсности гидрозольных частиц водоема (на примере озера-старицы Лапа Алтайского края) // Ползуновский вестник. – 2012. – №2/1.
7. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л., 1983.
8. Кронберг П. Дистанционное изучение земли. – М., 1988.
9. Сидько Ф.Я., Апонасенко А.Д., Васильев В.А. Экспрессный спектрофотометрический метод определения концентрации хлорофилла фитопланктона // Гидробиологический журнал. – 1989. – Т. 25, №5.
10. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. – СПб., 1994.
11. Мусатов А.П. Оценка параметров экосистем внутренних водоемов. – М., 2001.
12. Апонасенко А.Д. Количественная закономерность функциональной организации водных экосистем: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. – СПб., 2002.
13. Апонасенко А.Д., Щур Л.А., Лопатин В.Н. Связь содержания хлорофилла с биомассой и дисперсной структурой фитопланктона // ДАН. – 2007. – Т. 412, №5.
14. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. – Минск, 1960.
15. Сиренко Л.А., Курейшевич А.В. Определение содержания хлорофилла в планктоне пресных вод. – Киев, 1982.
16. Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов / под ред. И.Л. Пыриной. – СПб., 1993.
17. ГОСТ 17.1.4.02-90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». – М., 2003.