

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

Сезонная динамика спектрального показателя ослабления света в озерах Алтайского края*

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

Seasonal Dynamics of Spectral Light Attenuation in Lakes of the Altai Krai

Приведены результаты измерений показателя ослабления света на разных глубинах разнотипных озер Алтайского края в различные сезоны года в период 2011–2013 гг. Исследования сезонной динамики гидрооптических характеристик озер показали, что наибольшие значения показателя ослабления практически во всем изучаемом спектральном диапазоне наблюдаются в конце летнего периода, наименьшие – зимой, до вскрытия льда. Это обусловлено массовым развитием водорослей, более высокой концентрацией и большими размерами частиц (клеток) водорослей фитопланктона. Проведен анализ полученных экспериментальных данных с учетом дисперсного состава частиц (клеток) водорослей фитопланктона.

Ключевые слова: озера, показатель ослабления света, спектральная прозрачность воды, хлорофилл.

DOI 10.14258/izvasu(2013)1.2-38

Исследования гидрооптических параметров озер, имеющих различный генезис, химический состав, трофический уровень, гидрологический режим и неодинаковую степень антропогенной нагрузки, весьма актуальны. Гидрооптика носит физический характер и стремится к точному количественному выражению определяемых величин (показатель ослабления света, показатели поглощения и рассеяния света, прозрачность), но при этом дает возможность характеризовать водные экосистемы и по многим биологическим параметрам (концентрация хлорофилла, биомасса и т. д.), найденным из оптических измерений. Закономерности распространения солнечного света в водоемах в значительной степени определяют возможности жизнедеятельности организмов, обитающих в водной толще. В практической гидробиологии и гидрооптике измерения прозрачности воды принято проводить по белому диску Секки [1–4]. Однако субъективность данного метода обуславливает значительную погрешность при измерениях (по данным из литературных источников, она достигает 20% и более), а невозможность применения в зимних подледных исследованиях приводит к существенным ограничениям в его использовании. Более перспективным в этом отношении являются спектрофото-

This article contains results of measuring light attenuation coefficient values at different water depths in lakes of various kinds located in Altai Krai with regard to seasonal changes during 2011–2013. Seasonal dynamics of the lakes water transparency research data show that maximum values of the attenuation coefficient across almost the whole spectral range are observed at the end of summer season while minimum values — in winter before ice break-up. The reasons are mass propagation of algae, higher concentration, and bigger sizes of phytoplankton particles (cells). The authors have carried out analysis of the obtained experimental data taking into account the particle size (cell size) of phytoplankton.

Key words: lakes, light attenuation coefficient, water spectral transparency, chlorophyll.

метрический и зондовый методы определения прозрачности озер [5–8]. Следует отметить, что водоемы, особенно в Алтайском крае (Западная Сибирь), в гидрооптическом отношении слабо изучены, что в существенной мере затрудняет проведение адекватной оценки интенсивности, своеобразия и особенностей развития водных экосистем.

Вышеизложенное послужило основанием для проведения исследований, основной целью которых является изучение сезонных изменений спектрального показателя ослабления света на различных глубинах разнотипных озер, нахождение зависимости прозрачности воды от содержания хлорофилла «а», влияние дисперсных частиц взвеси на показатель ослабления света в водных пробах.

Основными объектами исследований были выбраны три озера: пойменное оз. Лапа, надпойменное оз. Красиловское и эрозионное оз. Большое Островное, трофический статус которых по значениям прозрачности и содержанию хлорофилла «а» соответствует эвтрофным, мезотрофным и гиперэвтрофным водоемам соответственно.

Для определения коэффициента пропускания (прозрачности) воды использовали спектрофотометрический метод. Спектральные измерения проводились

* 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» и программы Президиума РАН 4.2 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири».

с помощью спектрофотометров СФ-46 и ПЭ-5400УФ с погрешностью, равной 0,5%.

Концентрацию хлорофилла в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТу 17.1.4.02–90 [9]. Погрешность определения концентрации хлорофилла в нашем случае составила не более 10%. Количество и размеры частиц взвеси определялись с помощью камеры Нажотта объемом 0,05 мл с использованием светового микроскопа Nikon Eclipse 80i.

Исследования на озерах проводились в разные сезоны года в период 2011–2013 гг., в ходе которых осуществлялся отбор проб воды батометром от поверхностного горизонта до дна с интервалом 1 м. В лабораторных условиях проводились измерения коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды в диапазоне 400–800 нм на спектрофотометрах указанных выше. Необходимо отметить, что измерения прозрачности проводились спустя 1–3 часа после взятия проб. По результатам измерений рассчитывалась важная гидрооптическая характеристика — *показатель ослабления* света ε в пробах воды, отобранных на различных глубинах озер по формуле

$$\varepsilon = 1/\ell \cdot \ln(100/I), \quad (1)$$

где ℓ — рабочая длина кюветы; I — относительная интенсивность света (%), прошедшего через воду, другими словами, прозрачность.

Результаты расчетов по спектральному показателю ослабления света на различных глубинах озер по данным сезонных измерений спектральной прозрачности показали, что максимальные его значения имеют место в пробах воды, отобранных в придонном слое водоемов. Следует иметь в виду, что глубина оз. Лапа в месте отбора проб — 10 м, оз. Красиловское — 5 м, оз. Бол. Островное — 2 м. В разные сезоны, когда проводились исследования, глубина озер незначительно менялась. В целом для оз. Лапа показатель ослабления в диапазоне длин волн 400–800 нм зимой (15.02.2012 и 04.02.2013), весной, до (15.03.2012) и после (02.05.2012 и 07.05.2013) вскрытия льда, осенью (12.10.2012) до ледостава в придонном слое водоема существенно меньше, чем летом (30.07.2012), та же динамика сохраняется и для двух других озер. Это, на наш взгляд, обусловлено изменением соотношения между размерами частиц органо-минеральной взвеси и их счетной концентрацией в различные периоды, что подтверждается нашими расчетами показателя ослабления света на основе табличных данных, приведенных в работе [10]. Для сравнения на рисунках 1 и 2 приведены спектральные зависимости показателя ослабления трех разнотипных озер Алтайского края в поверхностном слое в зимний и весенний периоды 2013 г.

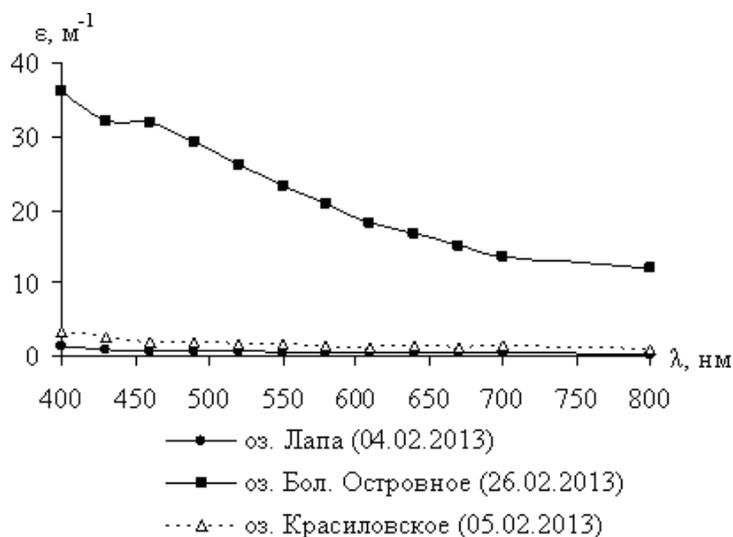


Рис. 1. Спектральная зависимость показателя ослабления ε в диапазоне длин волн 400–800 нм в поверхностном слое разнотипных озер зимой 2013 г.

Для оценки влияния рассеивающих и поглощающих свойств частиц (клеток) фитопланктона на прозрачность нами проводились измерения коэффициента пропускания воды как до, так и после фильтрации пробы через мембранный фильтр с размером пор 0,8 мкм. Полученная разность спектральной зависимости $\Delta\varepsilon$ представляет собой фактически показатель

ослабления света пробой воды, содержащей крупные частицы (с диаметром более 0,8 мкм).

В сезонной динамике распределения содержания хлорофилла в озерах отмечена тенденция накопления в течение вегетационного периода и снижения его концентрации в условиях подледного режима, когда подо льдом и покрывающим его слоем снега фо-

тосинтез фитопланктона практически прекращается и величины первичной продукции становятся близкими к нулю. Концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое оз. Лапа 15 февраля 2012 г. равна $0,53 \text{ мг/м}^3$, 15 марта 2012 г. – $0,95 \text{ мг/м}^3$, но для сравнения в оз. Бол. Островное 22 марта 2012 г. концентрация составила $15,06 \text{ мг/м}^3$. В этом случае логично предположить, что при малой глубине оз. Бол.

Островное его фотический слой простирается до дна. Содержание хлорофилла в придонном слое озера Лапа (30 июля 2012 г.), Красиловское (13 августа 2012 г.), Бол. Островное (17 августа 2012 г.) составило соответственно $25,26$; $212,67$; $63,09 \text{ мг/м}^3$. Сравнение вертикального распределения содержания хлорофилла «а» в разнотипных озерах в зимний и весенний периоды 2013 г. представлено на рисунке 3а–б.

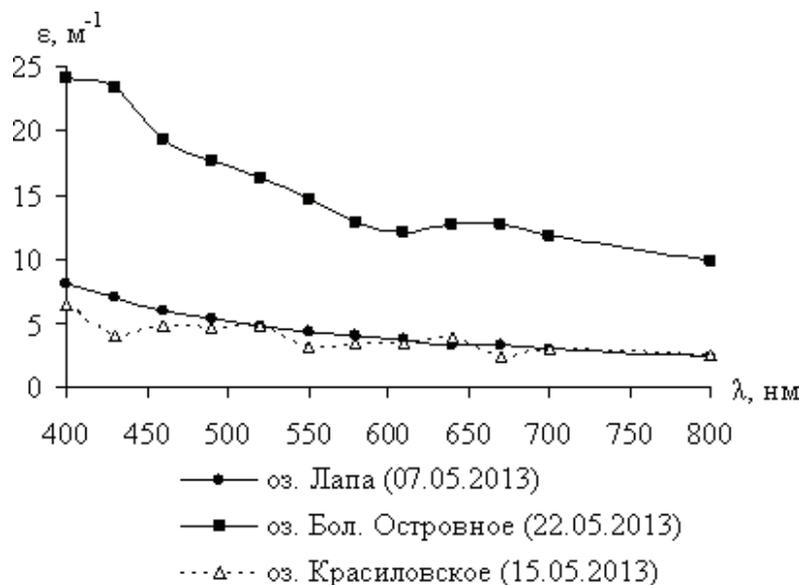


Рис. 2. Спектральная зависимость показателя ослабления ϵ в диапазоне длин волн 400–800 нм в поверхностном слое разнотипных озёр весной 2013 г.

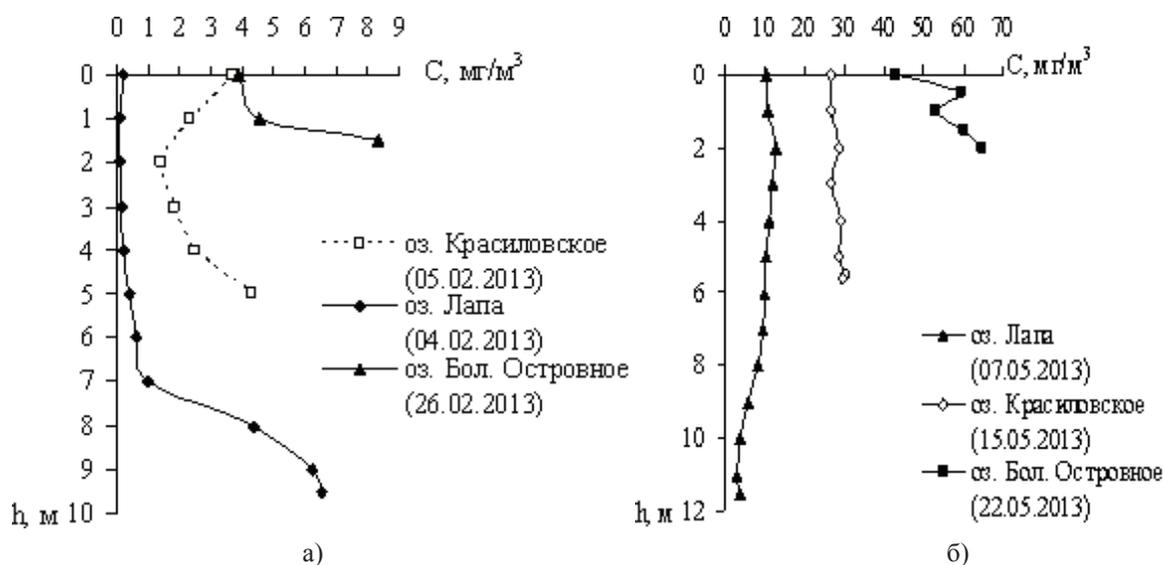


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания хлорофилла «а» в разнотипных озёрах в зимний (а) и весенний (б) период 2013 г.

В ходе исследований необходимо было определить микрофизические параметры гидрозолей в связи с тем, что ослабление света в сравнительно чистых

озерных экосистемах обусловлено, в основном, поглощением и рассеянием взвешенных частиц биологического происхождения.

Распределение клеток водорослей фитопланктона по радиусу для оз. Лапа в различные сезоны представлено на рисунке 4. Аппроксимация экспериментальных точек проводилась в соответствии с формулой Юнге. При этом коэффициент корреляции лежит в ди-

апазоне от 0.85 до 0.99, что говорит об удовлетворительной аппроксимации.

По данным сезонных измерений размеры клеток в пробах озер находились в пределах 0,3–8,5 мкм по радиусу.

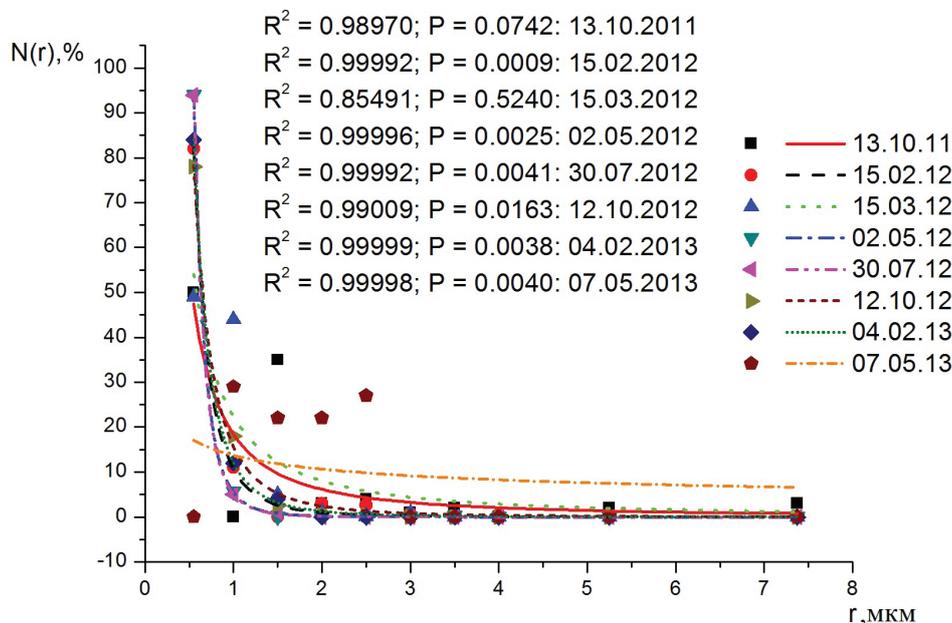


Рис. 4. Распределение клеток водорослей фитопланктона по радиусу для оз. Лапа в разные сезоны в период 2011–2013 гг.

Среднее значение счетной концентрации, измеренной с помощью камеры Нажотта, для оз. Лапа, составило порядка $1,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (15 марта 2012 г.), $4,4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (2 мая 2012 г.), $1,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (30 июля 2012 г.), $1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (12 октября 2012 г.), $1,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (4 февраля 2013 г.) и $0,22 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (7 мая 2013 г.); для оз. Красиловское — $1,9 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (23 мая 2012 г.), $3,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (13 августа 2012 г.), $1,7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (31 октября 2012 г.), $0,7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (5 февраля 2013 г.) и $1,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (15 мая 2013 г.) и для оз. Бол. Островное — $1,7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (29 мая 2012 г.), $2,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (17 августа 2012 г.), $1,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (30 октября 2012 г.), $5,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (26 февраля 2013 г.) и $1,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (22 мая 2013 г.).

На основании проведенных экспериментальных исследований спектральной прозрачности воды в диапазоне 400–800 нм в различные сезоны 2011–2013 гг. для трех разнотипных озер Алтайского края можно сделать следующие выводы. По данным сезонных измерений коэффициента пропускания воды и содержания хлорофилла «а» на разных глубинах озер обнаружена обратная зависимость величины прозрачности на исследуемых длинах волн

от концентрации основного фотосинтетического пигмента. Прозрачность водоема уменьшается в придонном слое вследствие оседания отмерших клеток водорослей фитопланктона и взмучивания донных отложений.

Исследования сезонной динамики гидрооптических характеристик показали, что наибольшие значения показателя ослабления практически во всем изучаемом спектральном диапазоне наблюдаются в конце летнего периода, наименьшие – зимой, до вскрытия льда. Это обусловлено массовым развитием водорослей фитопланктона, более высокой концентрацией и большими размерами частиц (клеток) водорослей.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией водной экологии к.б.н. В. В. Кириллову за помощь в работе, н.с., к.б.н. А. В. Котовицкову за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла, с.н.с., к.б.н. Е. Ю. Митрофановой и аспиранту О. С. Сутченковой за предоставленные фотографии частиц взвеси, а также аспиранту У. И. Залаевой за помощь при обработке данных.

Библиографический список

1. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, №2.
2. Carstensen J. Censored data regression: Statistical methods for analyzing Secchi transparency in shallow systems // *Limnology and Oceanography: methods* 8. — 2010.
3. Vollenweider R. A., Kerekes J. The loading concept as basis for controlling eutrophication philosophy and preliminary results of the OECD programme on eutrophication // *Progr. Water Technol.* — 1980. — Vol. 12, №2.
4. Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко Я. А., Павловский С. А. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. — Петрозаводск, 2008.
5. Сидько Ф. Я., Апонасенко А. Д., Васильев В. А. Экспрессный спектрофотометрический метод определения концентрации хлорофилла фитопланктона // *Гидробиологический журнал*. — 1989. — Т. 25, №5.
6. Суторихин И. А., Букатый В. И., Акулова О. Б. Динамика спектральной прозрачности воды разнотипных озер Алтайского края в разные сезоны // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2013. — №3 (10), ч. 2.
7. Суторихин И. А., Букатый В. И., Котовщиков А. В., Акулова О. Б. Исследования спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла с учетом дисперсности гидрозолевых частиц водоема (на примере озера- старицы Лапа Алтайского края) // *Ползуновский вестник*. — 2012. — №2/1.
8. Суторихин И. А., Букатый В. И., Котовщиков А. В., Акулова О. Б. Сезонная динамика спектральной прозрачности воды и концентрации хлорофилла в пойменном озере с учетом дисперсности частиц фитопланктона // *Известия АлтГУ*. — 2012. — №1/2.
9. ГОСТ 17.1.4.02–90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». — М., 2003.
10. Шифрин К. С., Салганик И. Н. Таблицы по светорассеянию. Рассеяние света моделями морской воды. — Л., 1973. — Т. 5.