

УДК 556.555.2

Раздел 4

ЭКОЛОГИЯ. ФЛОРА. ФАУНА

Section 4

ECOLOGY. FLORA. FAUNA

УДК 535.8+556.5+574.5

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР РАЗНОГО
ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА**

О.Б. Акулова, В.И. Букатый

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

E-mail: akulova8282@mail.ru, v.bukaty@mail.ru

Представлены экспериментальные данные по исследованию влияния сроков хранения проб на изменчивость спектрального показателя ослабления света и спектрально-го показателя поглощения света желтым веществом на примере озер разного трофического статуса. Работа выполнена в 2018-2019 гг. на пресноводных озерах: Лапа, Красиловское (Алтайский край) и Телецкое (Республика Алтай). На основании результатов экспериментов по исследованию динамики спектрального показателя ослабления света и спектрального показателя поглощения света желтым веществом через различные промежутки времени после взятия проб в озерах и анализа погрешностей измерения можно сделать вывод, что полученные кривые остаются практически неизменными в пределах доверительных интервалов рассчитанных ошибок.

Ключевые слова: спектральный показатель ослабления света, спектральный показатель поглощения света желтым веществом, относительная прозрачность по диску Секки, трофический статус, хлорофилл, фосфор.

DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15605

Дата поступления 18.02.2020

Известно, что оптические свойства различных природных водоемов можно изучать в лаборатории, с помощью погружаемых приборов, а также дистанционными методами. Главным преимуществом погружаемых и дистанционных измерительных приборов является то, что они позволяют вести непрерывные измерения, в то время как отбор проб может производиться лишь с определенных глубин в отдельные моменты времени. Конечно, это обстоятельство существенно ограничивает применимость лабораторных методов для исследования изменчивости гидро-

оптических характеристик в пространстве и во времени, но используемые при этом приборы обладают, как правило, более высокой точностью измерений, чем погружаемые. Также определенным достоинством лабораторных измерений является возможность сравнительного исследования характеристик фильтрованных и нефильтрованных образцов, что позволяет экспериментально оценить влияние различных активных компонентов (чистой воды, взвеси, желтого вещества и хлорофилла) на оптические свойства природной воды. В настоящее время лабораторные измерения исполь-

зуются в основном для исследования спектральных и угловых зависимостей гидрооптических характеристик. Дистанционные методы, которые можно проводить с борта судна и летательных аппаратов, дают возможность в короткий срок получить информацию о распределении оптических характеристик на больших по размерам акваториях, но они имеют также и существенные ограничения. Эти методы дают информацию лишь о поверхностном слое, толщина которого в различных водоемах не превышает нескольких десятков метров. Поэтому их не следует рассматривать как замену традиционных методов [1-4]. Таким образом, исследования оптических свойств различных природных водоемов должны основываться на комплексном использовании дистанционных и контактных методов.

Цель данного эксперимента обусловлена тем, что в настоящее время отсутствуют ГОСТы на методы определения первичных гидрооптических характеристик, среди которых спектральные показатели поглощения, рассеяния и ослабления света в природной воде, коэффициент пропускания слоя водной среды, относительная прозрачность и др. Следует отметить, что проведение измерений спустя определенное времени после взятия проб воды вызвано необходимостью отработки методики исследования на предмет адекватности результатов последовательных экспериментов.

Материалы и методы исследования

Для обоснования достоверности результатов измерений спектральной прозрачности воды в лабораторных условиях нередко возникает вопрос о необходимости их проведения спустя нескольких часов и даже суток после отбора проб в разнотипных водоемах. В качестве объектов исследования выбраны пресноводные озера: Лапа, Красиловское и Телецкое. Водоемы отличаются по происхождению и положению в

ландшафте, по морфологии, проточности и степени трофности, т.е. являются разнотипными.

Озеро-старица Лапа по происхождению и положению в ландшафте относится к пойменным озерам и принадлежит к придаточной системе правобережной поймы реки Оби. Оно расположено ($53^{\circ}37'08''$ N, $83^{\circ}83'21''$ E) в окрестностях г. Барнаула, является непроточным и может сообщаться с рекой только в период весеннего половодья.

Озеро Красиловское расположено ($53^{\circ}18'77''$ N, $84^{\circ}35'44''$ E) на юге Западно-Сибирской равнины, в зоне сочленения так называемых боровых террас с четвертой террасой правобережья Верхней Оби на абсолютной высоте 220 м. Оно находится в 60 км от краевого центра (Косихинский район Алтайского края). Питание водоема происходит за счет поверхностных и грунтовых вод. Озеро является бессточным.

Телецкое озеро (координаты: между $51^{\circ}21'46''$ и $51^{\circ}48'36''$ N, между $87^{\circ}14'40''$ и $87^{\circ}50'54''$ E) расположено в северо-восточной части Горного Алтая. Это самое глубокое озеро в Западной Сибири, оно занимает 39 место среди глубочайших озер мира. Телецкое озеро – пресноводный, слабоминерализованный, богатый кислородом, холодноводный, проточный горный водоем со снеговым, дождевым и подземным питанием.

Исследования гидрооптических характеристик (показателя ослабления света водой $\varepsilon(\lambda)$, показателя поглощения света желтым веществом $K_{жв}(\lambda)$ и относительной прозрачности Z , измеренной с помощью диска Секки) по акватории Телецкого озера выполнили летом (с 1 по 5 июля 2019 г.) в период экспедиции, организованной Институтом водных и экологических проблем СО РАН. Отбор проб воды с поверхностного слоя озера брали батометром с борта научно-исследовательского судна. В лаборатории провели 504 отдельных измерений спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды в области спек-

тра 400-800 нм на спектрофотометре ПЭ-5400УФ; использовали стеклянные кюветы с рабочей длиной 50 мм.

Отбор проб воды с поверхностного слоя (глубина 10-15 см, т.е. расстояние от границы раздела вода – атмосфера) озер Лапа и Красиловское осуществили 3 и 7 мая 2018 г., соответственно. Здесь применили кварцевые кюветы с рабочей длиной 10 мм. Спектральные измерения провели в лаборатории с помощью спектрофотометра типа ПЭ-5400УФ. Основные технические характеристики этого прибора: спектральный диапазон – 190-1000 нм, погрешность установки длины волны не более 1 нм, предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении спектральных коэффициентов пропускания при T (315-1000 нм) – 0,5 %. Для всех проб выполнили по два измерения (до и после их фильтрации через мембраны «Владипор» с диаметром пор 0,22 мкм) в диапазоне 400-800 нм с шагом 30 нм. Для определения спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды применили спектрофотометрический метод, в основу которого, как известно, положен принцип измерения отношения двух интенсивностей световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. В качестве последней использовали дистиллированную воду высокой очистки – контрольный образец, по отношению к которому производили измерения. Расчеты $\varepsilon(\lambda)$ (при натуральном основании логарифма) провели по формуле:

$$\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T(\lambda)), \quad (1)$$

вытекающей из закона Бугера, где L – длина кюветы, $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ – прозрачность в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ – интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно, λ – длина волны света.

Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{жв}(\lambda)$ определили после измерения спектральной прозрачности исследуемой озерной воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использова-

нием мембран «Владипор». Фильтрационная установка представляет собой воронку, наполняемую исследуемой природной водой, на дне которой расположено «гнездо» для мембранного фильтра. Воронка соединяется с колбой Бунзена, в которой обеспечивается вакуум порядка 10^{-1} - 10^{-2} мм. рт. ст. с помощью форвакуумного насоса. Максимальная абсолютная погрешность измерений показателя ослабления света и показателя поглощения света желтым веществом для озер Лапа и Красиловское составила $0,5 \text{ м}^{-1}$, для оз. Телецкое – $0,1 \text{ м}^{-1}$.

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов озерной воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла «а» и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемых водоемов рассчитали с использованием модифицированной спектральной модели показателя ослабления света [5], которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [4] и имеет вид:

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa_{хл}(\lambda) + \kappa_{жв}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}, \quad (2)$$

где $\kappa_{хл}(\lambda)$ и $\kappa_{жв}(\lambda)$ – спектральные показатели поглощения хлорофиллом «а» и желтым веществом, соответственно, $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ – спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ – спектральный показатель рассеяния взвесью, $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения чистой водой. При анализе выражения (2) необходимо иметь в виду, что при экспериментальном определении $\varepsilon(\lambda)$ можно получить неверный результат в зависимости от функциональных особенностей прибора. В нашем приборе (спектрофотометр ПЭ-5400УФ) при измерениях $T(\lambda)$ используется однолучевая фотометрическая схема, когда сравнивается световой поток, прошедший через эталонный образец (чистая вода) и световой поток, прошедший через исследуемую среду. Поэтому вычисляемый показатель ослабления по формуле (1) не содержит данные о показателе ослабления чистой водой $\varepsilon_{\text{чв}}(\lambda) = \kappa_{\text{чв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)$. Таким обра-

зом, в формуле (2) значения $\varepsilon(\lambda)$, полученные из измерений на спектрофотометре, должны суммироваться со значениями $\varepsilon_{\text{чб}}(\lambda)$, взятых из справочных данных [6-7], что и выполнено в исследованиях.

Показатель поглощения хлорофиллом «а» рассчитали по формуле, взятой из работы [4]:

$$\kappa_{\text{хл}}(\lambda) = \kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda) \cdot C_{\text{хл}}. \quad (3)$$

Здесь $C_{\text{хл}}$ – концентрация хлорофилла «а», в мг/м³, $\kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda)$ – удельный показатель поглощения хлорофиллом «а», в м²/мг, его значения приведены в работе [2]. Для расчетов $\kappa_{\text{чб}}(\lambda)$ использовали табличные данные из работы [6], для $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ – [7].

Как видно из выражения (2) спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. В отличие от ранее выполненных работ, где параметр $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ определяется экспериментально, а $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ находится как разность между измеренным $\varepsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, нами рекомендован другой подход. Так как в эксперименте определяли параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ можно найти из выражения (2) по формуле:

$$\sigma_{\text{вз}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [\kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda)]. \quad (4)$$

Оценка ошибок определения спектрального показателя ослабления света

В соответствии с формулой (1) погрешность определения величины $\varepsilon(\lambda)$ обусловлена систематической относительной погрешностью измерения коэффициента пропускания $(\Delta T/T) \cdot 100\%$ с помощью спектрофотометра (по паспорту прибора), систематической погрешностью определения длины кюветы $(\Delta L/L) \cdot 100\%$ и случайной погрешностью измерений коэффициента пропускания.

Коэффициент пропускания равен $T = \bar{T} \pm \Delta T$, где \bar{T} – среднее значение спектрального коэффициента пропускания

(спектральной прозрачности), ΔT – суммарная абсолютная ошибка (погрешность) определения коэффициента пропускания. Вначале находится среднее значение \bar{T} в случае многократных измерений (в эксперименте $n=4$), затем вычисляется стандартное отклонение $S_{\bar{T}}$ для среднего значения \bar{T} . Для заданной значимости (по-другому, надежности) $\alpha=0,95$ и числа измерений n определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}=3,18$, с помощью которого находится полуширина доверительного интервала для случайной погрешности измерения

$$\Delta T_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \cdot S_{\bar{T}}. \quad (5)$$

Затем вычисляется полуширина систематической погрешности $\Delta T_{\text{сист}}$ по формуле:

$$\Delta T_{\text{сист}} = (0,5\% \cdot T) / 100\%, \quad (6)$$

где величина 0,5% взята из паспорта прибора.

Вычисляется абсолютное значение результирующей погрешности величины ΔT как

$$\sqrt{(\Delta T_{\text{сл}})^2 + (\Delta T_{\text{сист}})^2}. \quad (7)$$

Тогда погрешность определения $\varepsilon(\lambda)$ без учета погрешности определения длины кюветы будет иметь вид

$$|\Delta \varepsilon| = 1/L \cdot 1/T \cdot \Delta T. \quad (8)$$

Подставляя в эту формулу $\Delta T_{\text{сл}}^2 = (t_{\alpha n} \cdot S_{\bar{T}})^2 = (3,2 \cdot 0,1\%)^2$, $\Delta T_{\text{сист}}^2 = (0,5\% \cdot T / 100\%)^2$, при $L=10$ мм, при $T=80-90\%$ имеем полуширину доверительного интервала, равную $\Delta \varepsilon \approx 0,7-0,8$ м⁻¹. Таким образом, полный доверительный интервал рассчитанных погрешностей составляет 1,4-1,6 м⁻¹.

Для погрешности определения длины кюветы паспортные данные отсутствуют, но можно предположить, что абсолютная ошибка для используемых кювет составляет около 0,01 мм, что также может вносить дополнительную погрешность.

Дополнительно определили стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ 17.1.4.02-90 концентрацию хлорофилла «а» $C_{\text{хл}}$ в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона, концентрацию общего азота

$N_{общ}$ – ГОСТ 33045-2014, общего углерода $C_{общ}$ – ГОСТ 31958-2012 и концентрацию общего фосфора $P_{общ}$ в соответствии с РД 52.24.387-2006.

Трофический статус в период исследования оценили с применением трофического индекса TSI (Trophic State Index) Карлсона [8] и с использованием значений спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ [9]. В основу расчетов TSI положены тесные корреляции между параметрами водной среды: прозрачностью (Z), концентрацией хлорофилла (C_{chl}) и содержанием общего фосфора ($P_{общ}$). В результате расчетов получено, что трофический статус оз. Лапа можно охарактеризовать, в основном, как эвтрофный, оз. Красиловского – эвтрофно-гиперэвтрофный, оз. Телецкое – олиготрофный с элементами мезотрофии.

Результаты и обсуждение

В исследуемый период значения спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ (рассчитан при натуральном основании логарифма) в диапазоне 400-800 нм в пробах воды, отобранных на различных глубинах озера Лапа варьировали в широких пределах 3,8-20,7 м⁻¹, озера Красиловское – 4,3-50,8 м⁻¹. Среднее значение относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период составило для озера Лапа и Красиловское – 49 и 98 см, соответственно.

Значения концентраций хлорофилла «а» на разных глубинах озера за период наблюдений изменялись для оз. Лапа в пределах от 2,0 до 14,0 мг/м³, а для оз. Красиловское – от 27,0 до 34,6 мг/м³. Среднее значение концентрации общего фосфора в поверхностном слое озера Лапа за исследуемый период составило 60,0 мг/м³, общего азота – 1270,0 мг/м³, общего углерода – 7500,0 мг/м³, для аналогичных гидрохимических показателей озера Красиловское – 100,0 мг/м³, 930,0 мг/м³, 1000,0 мг/м³, соответственно.

В результате расчетов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, взвеси, желтого вещества и хлорофилла) установлено, что максимальный вклад в $\varepsilon(\lambda)$ на озерах Лапа и Красиловское вносит желтое вещество (ЖВ) и взвесь (табл. 1).

На рисунках 1-2 представлены результаты экспериментальных данных по динамике показателя ослабления света от длины волны λ для оз. Лапа. В данном случае пробы отобрали 3 мая 2018 г., затем измерили их в указанное на рисунках время ежедневно. При отработке данной методики измерений пробы хранились в холодильнике при температуре 4-6°С. На рисунке 3 приведены результаты экспериментальных данных по изменению показателя поглощения света желтым веществом от длины волны λ для озера Красиловское по описанной выше методике.

Таблица 1

Относительный спектральный вклад компонентов озерной воды в показатель ослабления света на исследуемых озерах весной 2018 г., %

Длина волны λ , нм	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
	$\frac{\kappa_{чв}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{жв}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{chl}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{вз}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
<i>Озеро Лапа (при $C_{chl} = 14,0 \text{ мг/м}^3$)</i>					
430	0,1	83,1	6,7	10,1	16,6
550	0,5	78,5	0,8	20,2	10,7
670	5,0	73,2	6,5	15,3	8,6
<i>Озеро Красиловское (при $C_{chl} = 34,6 \text{ мг/м}^3$)</i>					
430	0,1	70,4	13,4	16,1	20,6
550	0,7	60,0	2,8	36,5	8,0
670	7,0	50,0	22,3	20,7	6,2

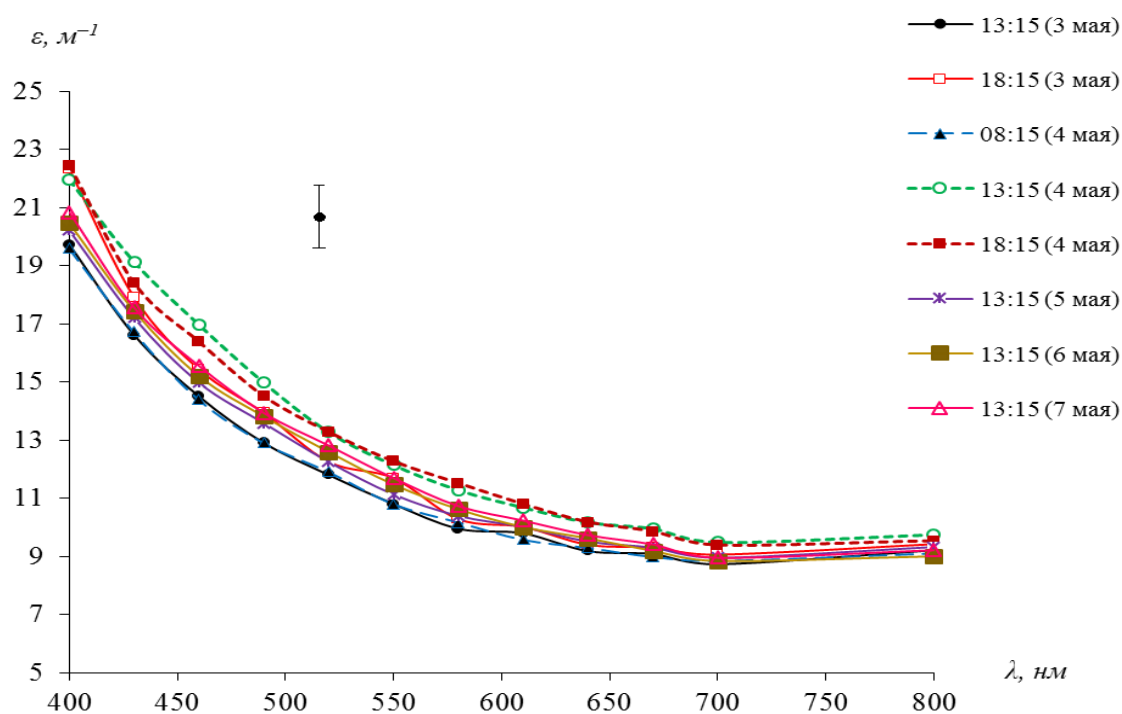


Рис. 1. Изменения показателя ослабления света от длины волны в пробах воды из поверхностного слоя оз. Лапа, 3 мая 2018 г.

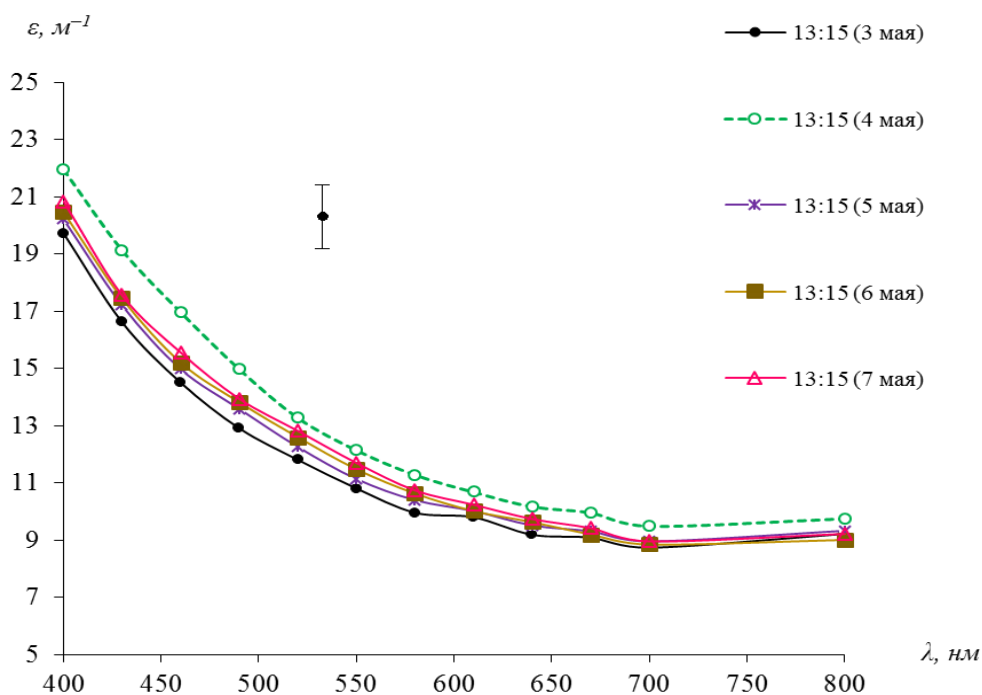


Рис. 2. Изменения спектрального показателя ослабления света в пробах воды из поверхностного слоя оз. Лапа за одинаковый промежуток времени, 3-7 мая 2018 г.

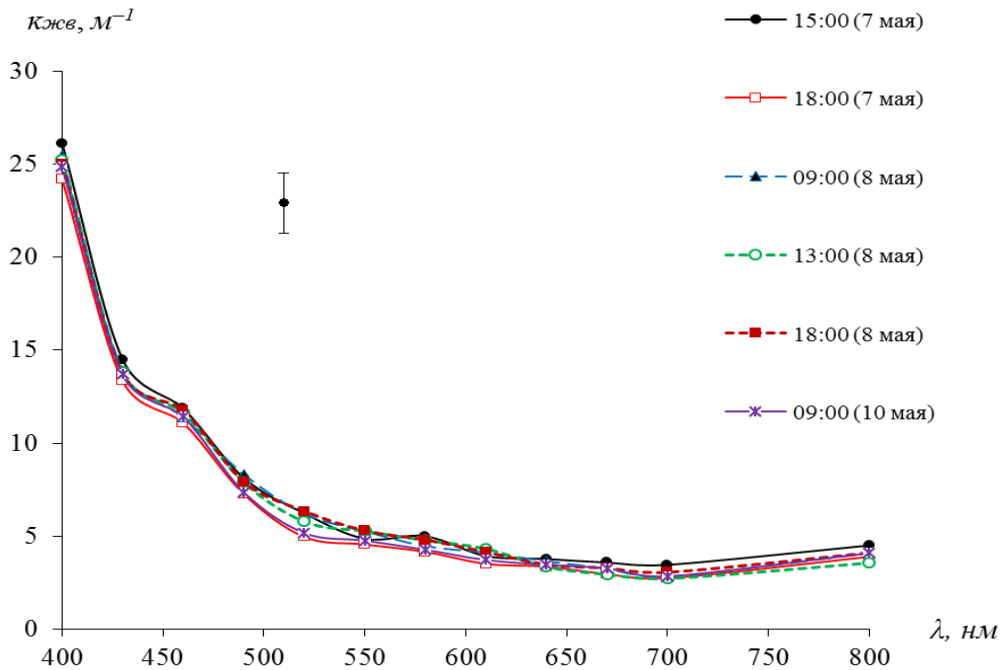


Рис. 3. Изменения показателя поглощения света желтым веществом от длины волны в пробах воды из поверхностного слоя оз. Красиловское, 7 мая 2018 г.

На Телецком озере в различных точках отбора проб значения $\varepsilon(\lambda)$ в области спектра 400-800 нм за исследуемый период находились в диапазоне 0,2-4,5 м⁻¹, $K_{жв}(\lambda)$ – 0,1-3,9 м⁻¹ (рассчитаны при натуральном основании логарифма). Например, на длине волны 430 нм значения $\varepsilon(\lambda)$ варьировали в пределах 1,2-4,0 м⁻¹, на $\lambda=550$ нм – 0,4-2,6 м⁻¹. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки за исследуемый период, находились в диапазоне 0,8-11,0 м со средним значением 5,4 м. Концентрация хлорофилла «а» S_{chl} за время наблюдений варьировала в пределах от 0,1 до 1,8 мг/м³, средняя величина составила 0,6 мг/м³.

В результате расчетов спектрального вклада оптически активных компонентов озерной воды в спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают также желтое вещество и взвесь. Наибольший вклад ЖВ при $\lambda=430$ нм

приходится на пелагиаль озера, напротив рек Чулюш, Кыга и Кокши, где он составляет 87,1, 85,7 и 85,1 %, соответственно. При длине волны 550 нм вклад желтого вещества варьирует в пределах от 50,0 % (пелагиаль напротив р. Б. Корбу и в районе Каменного залива, соответственно) до 95,4 % (пелагиаль напротив р. Чулюш). Взвесь дает максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda=430$ нм в точке 025 (пелагиаль напротив р. Адамыш) и составляет 31,5 %. Вклад взвеси возрастает до 41,9 % (точка 113 – пелагиаль напротив Каменного залива) при $\lambda=550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda=430$ нм на всех точках и составляет не более 0,4 %, но резко увеличивается в зеленой области спектра – до 14,1 % при $\lambda=550$ нм. Вклад хлорофилла при $\lambda=430$ нм находился в диапазоне от 0,6 до 8,5 %, при $\lambda=550$ нм – 0,1-1,8 %. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет около 0,1 %.

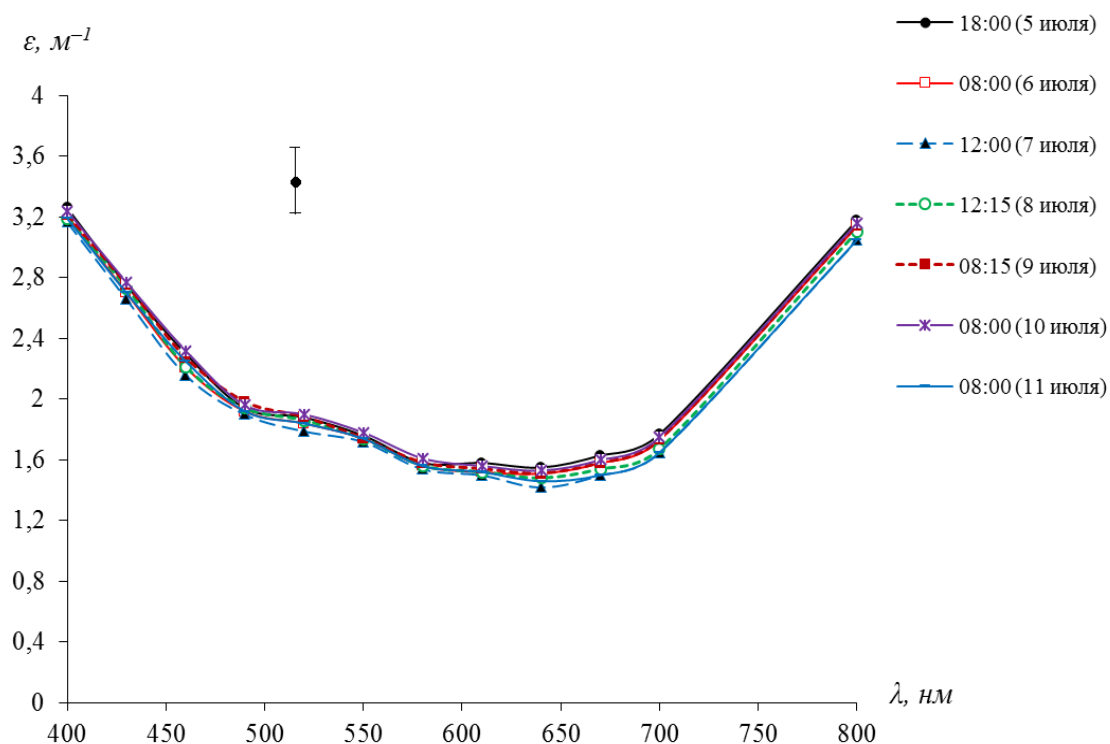


Рис. 4. Изменения показателя ослабления света от длины волны в пробах воды из поверхностного слоя оз. Телецкое в точке 021 – пелагиаль озера, напротив устья реки Кокши, лето 2019 г.

На рисунке 4 представлены спектральные кривые показателя ослабления света для поверхностного слоя Телецкого озера в точке 021 – пелагиаль озера, напротив устья реки Кокши (координаты: 51°56'67" N, 87°66'76" E). В этом случае пробы отобрали 3 июля 2019 г., а измерения $\varepsilon(\lambda)$ провели последовательно с 5 по 11 июля в указанное на рисунке время. Пробы в промежутке между измерениями также находились в холодильнике.

Выводы

На основании результатов эксперимента по исследованию динамики спектрального показателя ослабления света через различные промежутки времени после взятия проб в озерах и анализа погрешностей измерения можно сделать вывод, что полученные кривые соответствуют доверительным интервалам рассчитанных ошибок, т.е. практически они совпадают.

Также можно отметить, что применение кювет спектрофотометра ПЭ-5400УФ с длиной хода менее 50 мм нельзя использовать для изучения оптических свойств природных вод с их высокой прозрачностью (например, оз. Телецкое).

Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических характеристик при исследовании разнотипных озер для наблюдения за распространением уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворенных веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния природных вод.

Результаты работы могут быть использованы при междисциплинарных гидрологических исследованиях прежде всего интерпретации данных по гидрооптике, гидробиологии и гидрохимии, прогнозе распространения антропогенных загрязнений в водоемах разного типа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ гос. регистрации проекта АААА-А17-117041210241-4).

Выражаем благодарность заведующему лабораторией гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН А.Т. Зиновьеву за организацию экспедиции на озеро Телецкое в 2019 г., ведущему инженеру А.А. Коломейцеву за помощь в отборе проб озерной воды в 2018 г. при весенних полевых выездах, сотрудникам ХАЦ ИВЭП СО РАН под руководством д-ра хим. наук Т.С. Папиной за предоставленные данные измерений концентрации общего углерода, азота и фосфора для всех исследуемых озер.

Список литературы

1. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Оптика океана: учеб. – М., МАКС Пресс, 2010. – 216 с.
2. Апонасенко А.Д. Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой: дис... докт. физ.-мат. наук. – Красноярск, 2001. – 316 с.
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л., 1983. – 278 с.
4. Оптика океана // Физическая оптика океана. – М., 1983. – Т. 1. – 371 с.
5. Акулова О.Б. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоемов (на примере озер Алтайского края): дис... канд. тех. наук. – Барнаул, 2015. – 176 с.
6. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. – V. 36. – № 33. – P. 8710-8723.
7. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) // Applied Optics. 1981. – V. 20. – № 2. – P. 177-184.
8. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. – V. 22. – № 2. – P. 361-369.
9. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, Н.Ф. Харламова, О.Б. Акулова. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2016. – 162 с.

References

1. Pokazeev K.V., Chaplina T.O., Chashechkin Yu.D. Optika okeana: ucheb. – M., MAKS Press, 2010. – 216 s.
2. Aponasenko A.D. Kolichestvennyye zakonomernosti funktsional'noj organizatsii vodnykh ekosistem v svyazi s ih dispersnoy strukturoy: dis... dokt. fiz.-mat. nauk. – Krasnoyarsk, 2001. – 316 s.
3. Shifrin K.S. Vvedenie v optiku okeana. – L., 1983. – 278 s.
4. Optika okeana // Fizicheskaya optika okeana. – M., 1983. – T. 1. – 371 s.
5. Akulova O.B. Razrabotka metodov i izmeritel'no-vychislitel'nogo kompleksa dlya ocenki ekologicheskii znachimykh gidroopticheskikh harakteristik presnovodnykh vodoemov (na primere ozer Altajskogo kraja): dis... kand. tekh. nauk. – Barnaul, 2015. – 176 s.
6. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. – V. 36. – № 33. – P. 8710-8723.
7. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) // Applied Optics. 1981. – V. 20. – № 2. – P. 177-184.
8. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. – V. 22. – № 2. – P. 361-369.
9. Klimaticheskie usloviya i gidroopticheskie harakteristiki presnovodnykh ozer Altajskogo kraja / I.A. Sutorihin, V.I. Bukatyy, N.F. Harlamova, O.B. Akulova. – Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2016. – 162 s.

STUDY OF SPECTRAL LIGHT ATTENUATION BY THE EXAMPLE OF LAKES WITH DIFFERENT TROPHIC STATUS

O.B. Akulova, V.I. Bukatiy

Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul

E-mail: akulova8282@mail.ru, v.bukaty@mail.ru

The paper presents experimental data on temporal dynamics of spectral light attenuation and spectral light absorption by yellow matter on the example of lakes with different trophic status. The research is based on the analysis of findings of hydro-optical studies (2018-2019) of three freshwater lakes, i.e. Lapa, Krasilovskoye (Altai Krai) and Teletskoye (the Altai Mountains). Experiments on studying dynamics of spectral light attenuation and spectral light absorption by yellow matter at different intervals after water sampling from lakes and measurement error analysis suggest that the obtained curves remain practically unchanged within the confidence intervals for calculated errors.

Keywords: spectral light attenuation, spectral light absorption by yellow matter, relative transparency by Secchi disk, trophic status, chlorophyll, phosphorus.

Received February 18, 2020