



УДК 535.8+556.5

О.Б. Акулова, В.И. Букатый, К.П. Попов
O.B. Akulova, V.I. Bukatiy, K.P. Popov

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ЖЁЛТЫМ ВЕЩЕСТВОМ НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ ОЗЕРА КРАСИЛОВСКОЕ

CHANGES IN LIGHT ABSORPTION BY YELLOW SUBSTANCE AT DIFFERENT DEPTHS OF THE KRASILOVSKOYE LAKE

Ключевые слова: озеро Красиловское, спектральная прозрачность воды, показатели ослабления и поглощения света, растворённое органическое вещество, жёлтое вещество, хлорофилл, взвесь, корреляция, коэффициент детерминации.

Приводятся результаты экспериментальных данных по изменению показателя поглощения света жёлтым веществом на разных глубинах озера Красиловское (Алтайский край), полученных летом 2016 г. в ходе экспедиционных исследований гидрооптических характеристик. Рассчитан относительный спектральный вклад компонентов озёрной воды (жёлтого вещества, взвеси, хлорофилла, чистой воды) в показатель ослабления света по вертикали исследуемого водоёма. Значения показателя поглощения света жёлтым веществом при натуральном основании логарифма за исследуемый период находились в диапазоне $0,8-7,4 \text{ м}^{-1}$. Концентрация жёлтого вещества эвтрофно-гиперэвтрофного оз. Красиловское, рассчитанная по измеренному коэффициенту пропускания жёлтым веществом, варьировала в пределах $17,92-26,17 \text{ г/м}^3$. На всех глубинах исследуемого водоёма основной вклад в показатель ослабления света вносят жёлтое вещество (ЖВ) и взвесь. Наибольший вклад ЖВ приходится на глубину 5 м, где он составляет 80,0%. На длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьировал в пределах от 22,0% (2 м) до 86,8% (4 м), при $\lambda=670 \text{ нм}$ – от 16,9% (3 м) до 68,7% (5 м). Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления при $\lambda=430 \text{ нм}$ на глубине 1 м и составляет 27,6%. Вклад взвеси возрастает до 68,8% (3 м) при $\lambda=550 \text{ нм}$. На длине волны 670 нм вклад взвеси находился в диапазоне от 7,0% (5 м) до 32,2% (6 м). Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda=430 \text{ нм}$ на всех глубинах и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в длинноволновой области: до 1,4% (4 м) при $\lambda=550 \text{ нм}$ и до 11,4%

(2 м) при $\lambda=670 \text{ нм}$. Вклад хлорофилла при $\lambda=430 \text{ нм}$ существенен только для глубины 3 м (61,3%). Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет 0,1%.

Keywords: Krasilovskoye Lake, water spectral transparency, coefficients of light attenuation and absorption, dissolved organic matter, yellow substance, chlorophyll, suspended matter, correlation, determination coefficient.

The paper presents experimental data on the variation of light absorption by yellow substance at different depths of the Krasilovskoye Lake (Altai Region) obtained in the summer of 2016 during in situ studies of hydro-optical characteristics. Relative spectral contribution of lake water components (yellow substance, suspended matter, chlorophyll, pure water) to light attenuation was calculated. The coefficients of light absorption by yellow substance in the natural logarithmic base for the study period were within $0.8-7.4 \text{ м}^{-1}$. The concentration of yellow substance from eutrophic-hypereutrophic Krasilovskoye Lake calculated according to measured spectral water transparency varied within $17.92-26.17 \text{ g м}^3$. Yellow substance (YS) and suspension made the greatest contribution to light attenuation at all depths of the reservoir under study; for instance, the greatest contribution of YS was found at a depth of 5 m (80.0%). At a wavelength of 550 nm the contribution of yellow substance ranged from 22.0% (2 m) to 86.8% (4 m), and at $\lambda = 670 \text{ nm}$ – from 16.9% (3 m) to 68.7% (5 m). The maximum contribution of suspension to light attenuation was observed at $\lambda = 430 \text{ nm}$ at a depth of 1 m (27.6%). The contribution of suspension increases to 68.8% (3 m) at $\lambda = 550 \text{ nm}$. At the wavelength of 670 nm the contribution of suspended matter was in the range from 7.0% (5 m) to 32.2% (6 m). The contribution of pure water to light attenuation is negligible at $\lambda = 430 \text{ nm}$ at all depths (within 0.1%), but it

increases sharply in the long-wave region: up to 1.4% (4 m) at $\lambda = 550$ nm and to 11.4% (2 m) at $\lambda = 670$ nm. The contribution of chlorophyll at $\lambda = 430$ nm is significant only for a 3 m depth

(61.3%). Molecular light scattering by pure water in the studied spectral interval contributes insignificantly (0.1%).

Акулова Ольга Борисовна, к.т.н., н.с., лаб. гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-501. E-mail: akulova8282@mail.ru.

Букатый Владимир Иванович, д.ф.-м.н., проф., гл. н.с., лаб. гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-502. E-mail: v.bukatyy@mail.ru.

Попов Кирилл Павлович, аспирант, лаб. гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул. Тел.: (3852) 666-502. E-mail: k237p@mail.ru.

Akulova Olga Borisovna, Cand. Tech. Sci., Staff Scientist, Hydrology and Geoinformatics Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-501. E-mail: akulova8282@mail.ru.

Bukatyy Vladimir Ivanovich, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Chief Staff Scientist, Hydrology and Geoinformatics Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-502. E-mail: v.bukatyy@mail.ru.

Popov Kirill Pavlovich, post-graduate student, Hydrology and Geoinformatics Lab., Institute for Water and Environmental Problems, Sib. Branch of Rus. Acad. of Sci., Barnaul. Ph.: (3852) 666-502. E-mail: k237p@mail.ru.

Введение

Состав растворённого органического вещества (РОВ) в природной воде сложен и насчитывает множество различных классов органических соединений. Большинство из них в видимой области спектра слабо поглощают свет. Исключение составляет часть РОВ, представленная преимущественно гумусовыми кислотами, которые сильно поглощают свет в коротковолновой области видимого спектра и в ультрафиолете. Вследствие поглощения синих лучей эта часть растворенной органики имеет желтоватую окраску, что и обусловило её название – жёлтое вещество (ЖВ) [1, 2]. Известно, что жёлтое вещество является определяющим компонентом, влияющим на процессы биологического самоочищения и формирования качества вод, т.е. на экологическое состояние водоёмов. В связи с этим определение содержания ЖВ в водных объектах с помощью различных методов, в том числе и оптических, в настоящее время является актуальной задачей.

В наших работах приводятся экспериментальные данные по спектральному вкладу ЖВ в суммарный показатель ослабления света только в поверхностном слое разнотипных озёр Алтайского края [3, 4].

Целью работы является оценка изменения показателя поглощения света жёлтым веществом и его концентрации, а также спектрального вклада компонентов воды в суммарный показатель ослабления света на

разных глубинах оз. Красиловское летом 2016 г.

Характер поглощения света жёлтым веществом обусловлен электронными переходами в молекулах органических соединений [5]. Спектральная зависимость показателя поглощения света жёлтым веществом $K_{жв}(\lambda)$ описывается экспоненциальным законом [6]:

$$K_{жв}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda},$$

где λ – длина волны света;

μ – коэффициент, характеризующий наклон спектральной кривой поглощения, значение которого не является постоянным для различных водоёмов.

Материалы и методы исследования

Летом 2016 г. в ходе экспедиционных работ был проведён отбор проб воды на разных глубинах оз. Красиловское. Точка отбора (координаты: 53.18771 N, 84.35447 E) проб указана на рисунке 1 (в основе батиметрическая карта, выполненная ведущим инженером лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН А.А. Коломейцевым). Обработано и проанализировано 7 проб, проведено 168 измерений спектральной прозрачности воды на спектрофотометре до и после фильтрации проб.

Лимнологические характеристики исследуемого водоёма представлены в таблице 1.

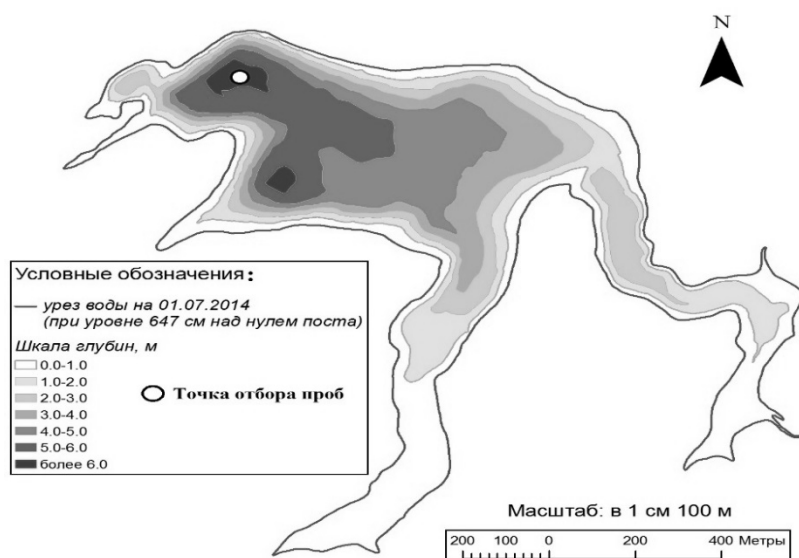


Рис. 1. Карта-схема оз. Красиловское с указанием точки отбора проб и шкалы глубин

Таблица 1

Лимнологические характеристики оз. Красиловское

S, км ²	H _{макс} , м	H _{ср} , м	SD _{макс} , см	□(λ)*, м ⁻¹	K _{жв} (λ)*, м ⁻¹	pH	Chl "a", мг/м ³
0,80	6,0	2,7	150	2,7-12,0	0,8-8,2	6,6-7,8	24,8-87,6

Примечание. S – площадь зеркальной поверхности; H_{макс} – максимальная глубина; H_{ср} – средняя глубина; SD_{макс} – максимальная прозрачность по диску Секки; □(λ)* и K_{жв}(λ)* – диапазон значений показателя ослабления света и показателя поглощения света жёлтым веществом при натуральном основании логарифма соответственно; pH – водородный показатель; Chl "a" – концентрация хлорофилла "a"

Измерения коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды в области спектра 400-800 нм проводились сразу же после отбора проб в стационарных условиях на спектрофотометре типа ПЭ-5400УФ с погрешностью, равной 0,5%. Спектральный показатель ослабления света ε(λ) рассчитывался по формуле:

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

где L – длина кюветы;

$T = I/I_0$ – коэффициент пропускания в относительных единицах;

I, I₀ – интенсивности прошедшего и падающего света соответственно;

λ – длина волны света.

Максимальная абсолютная погрешность величины ε(λ) составила не более 0,5 м⁻¹.

Показатель поглощения света жёлтым веществом K_{жв}(λ) определялся после измерения спектральной прозрачности озёрной воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембранных фильтров «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм.

Относительный спектральный вклад компонентов озёрной воды в ε(λ) на разных глубинах оз. Красиловское рассчитывался с

использованием спектральной физической модели ослабления света, предложенной О.В. Копелевичем в работе [6]:

$$\varepsilon(\lambda) = K_{хл}(\lambda) + K_{жв}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda) + \sigma_{вз}(\lambda) + K_{чв}(\lambda),$$

где K_{хл}(λ) и K_{жв}(λ) – показатели поглощения хлорофиллом и жёлтым веществом;

σ_{мол}(λ) – показатель молекулярного рассеяния чистой водой;

σ_{вз}(λ) – показатель рассеяния органико-минеральной взвесью;

K_{чв}(λ) – показатель поглощения чистой водой.

Показатель поглощения хлорофиллом рассчитывался по формуле:

$$K_{хл}(\lambda) = K_{уд.хл}(\lambda) \cdot C_{хл},$$

где C_{хл} – концентрация хлорофилла "a", мг/м³;

K_{уд.хл}(λ) – удельный показатель поглощения хлорофиллом, м²/мг, его значения приведены в работе [6]. Для расчётов K_{чв}(λ) используются табличные данные [7, 8], а для σ_{мол}(λ) – взяты из работы [6].

Спектральный показатель рассеяния взвесью σ_{вз}(λ) определялся по формуле:

$$\sigma_{вз}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [K_{хл}(\lambda) + K_{жв}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda) + K_{чв}(\lambda)]$$

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 в логарифмическом масштабе приведены результаты измерений $K_{жв}(\lambda)$ (в обратных метрах) в исследуемом

озере, а также соответствующие аппроксимационные зависимости от длины волны в виде линейных уравнений.

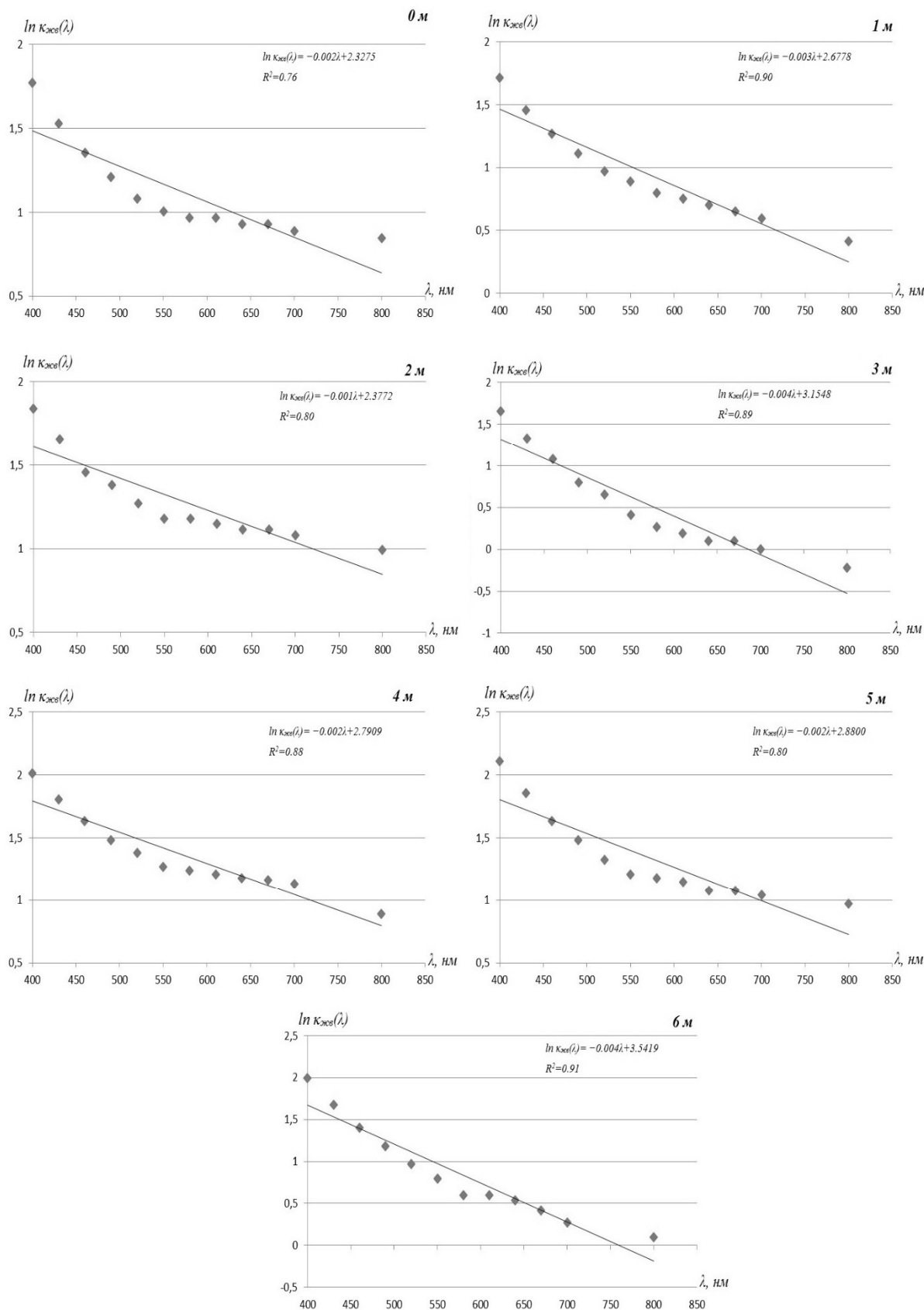


Рис. 2. Спектральная изменчивость логарифма показателя поглощения света жёлтым веществом $K_{жв}(\lambda)$ на разных глубинах оз. Красиловское

Из рисунка 2 видно, что имеет место удовлетворительная корреляция между значениями $\ln K_{\text{жв}}(\lambda)$ и длиной волны λ , так как во всех случаях коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,76$. Коэффициент экспоненциального наклона μ варьировал в пределах 0,001-0,004 нм^{-1} . По данным разных исследований [9-12] для океанов и морей значе-

ние коэффициента μ варьирует от 0,014 до 0,019 нм^{-1} , увеличиваясь с глубиной. При этом отмечен отход экспериментальной зависимости $\mu(\lambda)$ от экспоненты в длинноволновой области спектра, который авторы объясняют рассеянием и поглощением света частицами взвеси, остающимися в пробе после фильтрации.

Таблица 2

Значения показателя поглощения света жёлтым веществом $K_{\text{жв}}(\lambda)$ и концентрации жёлтого вещества $C_{\text{жв}}$ на разных глубинах оз. Красиловское в июле 2016 г.

Глубина, м	$K_{\text{жв}}(450), \text{м}^{-1}$	Коэффициент $\mu, \text{нм}^{-1}$	$C_{\text{жв}}, \text{г}/\text{м}^3$
0	4,1	0,002	19,4
1	3,8	0,003	18,0
2	4,6	0,001	21,7
3	3,2	0,004	15,2
4	5,4	0,002	25,6
5	5,5	0,002	26,2
6	4,5	0,004	21,2

Таблица 3

Относительный спектральный вклад (%) компонентов озёрной воды в показатель ослабления света на разных глубинах оз. Красиловское (18.07.2016 г.)

Длина волны света $\lambda, \text{нм}$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$
	$\frac{K_{\text{чв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{K_{\text{жв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{K_{\text{хл}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
0 м (при $C_{\text{хл}}=26,2 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	51,1	23,3	25,5	9,0
550	0,9	45,0	2,8	51,3	6,0
670	8,3	48,0	20,1	23,6	5,2
1 м (при $C_{\text{хл}}=24,8 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	49,4	22,8	27,7	8,7
550	0,1	43,6	2,9	53,4	5,5
670	0,9	39,5	20,6	30,9	4,8
2 м (при $C_{\text{хл}}=28,6 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	56,2	31,3	12,4	7,3
550	1,2	67,1	4,0	27,7	4,7
670	11,4	40,0	30,1	18,5	3,8
3 м (при $C_{\text{хл}}=87,6 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	32,4	61,3	6,2	11,4
550	0,8	22,0	8,3	68,9	6,8
670	6,7	16,9	53,3	23,1	6,5
4 м (при $C_{\text{хл}}=41,7 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	26,7	45,7	27,5	7,3
550	1,4	86,8	6,7	5,1	4,0
670	13,5	68,7	5,2	12,6	3,2
5 м (при $C_{\text{хл}}=25,5 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	80,0	14,8	5,1	8,0
550	1,1	68,7	3,4	26,8	4,8
670	10,1	67,4	15,4	7,1	4,3
6 м (при $C_{\text{хл}}=33,0 \text{ мг}/\text{м}^3$)					
430	0,1	56,3	28,0	15,6	9,4
550	1,0	40,0	4,0	55,0	5,5
670	9,0	31,2	27,5	32,3	4,8

Согласно закону Бугера в пределах его применимости показатель поглощения света жёлтым веществом прямо пропорционален его концентрации. Тогда, следуя работе [2], измерив $K_{жв}(450)$, можно определить концентрацию ЖВ в озёрной воде по формуле:

$$C_{жв} = K_{жв}(450) / K_{уд.жв}(450),$$

где $C_{жв}$ – концентрация жёлтого вещества, г/м³;

$K_{уд.жв}(450)$ – удельный показатель поглощения света ЖВ при $\lambda=450$ нм, м²/г.

В работе [13] рассчитаны значения $K_{уд.жв}(\lambda)$ на длине волны 450 нм, другие данные нам не известны. Поэтому насколько величина $K_{уд.жв}(450)$, приводимая в [13], является универсальной, до сих пор считается не ясным. Тем не менее с учётом предложенного в [2] подхода нами были рассчитаны значения $C_{жв}$ с использованием величины $K_{уд.жв}(450)$, взятой из работы [13].

В таблице 2 представлены результаты измерений $K_{жв}(\lambda)$ в пробах воды, отобранных по вертикали оз. Красиловское и расчётов $C_{жв}$.

Концентрация жёлтого вещества $C_{жв}$ эвтрофно-гиперэвтрофного оз. Красиловское находилась в диапазоне 17,92–26,17 г/м³. Для сравнения приведём данные значений $C_{жв}$ в олиготрофном оз. Телецкое (июль 2016 г.), которые варьировали в пределах 5,50–13,68 г/м³.

В таблице 3 приведены результаты расчётов спектрального вклада компонентов озёрной воды (жёлтого вещества, взвеси, хлорофилла, чистой воды) в спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ в процентах. Здесь значения $K_{жв}(\lambda)$ и $\varepsilon(\lambda)$ указаны при натуральном основании логарифма.

Выводы

1. Определён показатель поглощения света жёлтым веществом в озёрной воде по измерениям коэффициента пропускания воды в диапазоне 400–800 нм в пробах воды, отфильтрованной через фильтр с диаметром пор 0,22 мкм.

2. Рассчитаны концентрации жёлтого вещества $C_{жв}$, коэффициенты спектральной изменчивости показателя поглощения жёлтым веществом μ на разных глубинах оз. Красиловское.

3. Определены спектральные вклады компонентов озёрной воды в показатель ослабления света по вертикали исследуемого водоёма.

Библиографический список

1. Маньковский В.И. Основы оптики океана: методическое пособие. – Севастополь: Изд-во МГИНАУ, 1996. – 119 с.
2. Маньковский В.И. Жёлтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 3. – С. 53–61.
3. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Спектральный вклад компонентов озёрной воды в показатель ослабления света в разнотипных водоёмах юга Западной Сибири // Известия АлтГУ. – 2015. – № 1/1 (85). – С. 59–63.
4. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озёр Алтайского края: монография / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, Н.Ф. Харламова, О.Б. Акулова; отв. ред. В.Н. Седалищев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т вод. и экол. проблем; М-во образования и науки РФ, Алт. гос. ун-т. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 162 с.
5. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 278 с.
6. Оптика океана / под ред. А.С. Молина. – Т. 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, 1983. – 372 с.
7. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36 (330). – P. 8710–8723.
8. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – № 3. – Т. 7. – С. 3–22.
9. Копелевич О.В., Шифрин К.С. Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы. – М.: Наука, 1981. – С. 4–55.
10. Пелевина М.А. Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворённым органическим «жёлтым» веществом в водах Балтийского моря // Световые поля в океане. – М.: ИО АН СССР, 1979. – С. 92–97.
11. Atkins W.R.G., Poole H.H. An experimental study of the scattering of light by natural waters // Proc. Roy. Soc. London B., 1952. – Vol. 140. – P. 321–338.
12. Hojerslev N.K. On the origin of yellow substance in marine environment // Rap. Inst. Fysiks Oceanogr. – Copenhagen, 1980. – No. 42. – P. 57–81.
13. Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special refer-

ence to lignin sulfonates and humic substances // PhD Thesis, Goteborgs Universitet, Goteborg, Sweden, 1979. – 200 pp.

References

1. Mankovskiy V.I. Osnovy optiki okeana: metodicheskoe posobie. – Sevastopol: Izd-vo MGINANU, 1996. – 119 s.

2. Mankovskiy V.I. Zheltoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh vostochnoy chasti Tropichestoy Atlantiki // Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. – 2015. – № 3. – S. 53-61.

3. Sutorikhin I.A., Bukatyy V.I., Akulova O.B. Spektralnyy vklad komponentov ozernoy vody v pokazatel oslableniya sveta v raznotipnykh vodoemakh yuga Zapadnoy Sibiri // Izvestiya AltGU. – 2015. – № 1/1 (85). – S. 59-63.

4. Klimaticheskie usloviya i gidroopticheskie kharakteristiki presnovodnykh ozer Altayskogo kraya: monografiya / I.A. Sutorikhin, V.I. Bukatyy, N.F. Kharlamova, O.B. Akulova; otv. red. V.N. Sedalishchev; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t vod. i ekol. problem; M-vo obrazovaniya i nauki RF, Alt. gos. un-t. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016. – 162 s.

5. Shifrin K.S. Vvedenie v optiku okeana. – L.: Gidrometeoizdat, 1983. – 278 s.

6. Optika okeana / pod red. A.S. Monina – T. 1. Fizicheskaya optika okeana. – M.: Nauka, 1983. – 372 s.

7. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36 (330). – P. 8710-8723.

8. Levin I.M. Maloparametricheskie modeli pervichnykh opticheskikh kharakteristik morskoy vody // Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika. – 2014. – T. 7. – № 3. – S. 3-22.

9. Kopelevich O.V., Shifrin K.S. Sovremennyye predstavleniya ob opticheskikh svoystvakh morskoy vody // Optika okeana i atmosfery. – M., Nauka, 1981. – S. 4-55.

10. Pelevina M.A. Metodika i rezultaty izmereniy spektralnogo pogloshcheniya sveta rastvorennym organicheskim «zhelтым» veshchestvom v vodakh Baltiyskogo morya // Svetovyye polya v okeane. – M.: IO AN SSSR, 1979. – S. 92-97.

11. Atkins W.R.G., Poole H.H. An experimental study of the scattering of light by natural waters // Proc. Roy. Soc. London B., 1952. – Vol. 140. – P. 321-338.

12. Hojerslev N.K. On the origin of yellow substance in marine environment // Rap. Inst. Fysiks Oceanogr. – Copenhagen, 1980. – No. 42. – P. 57-81.

13. Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances // PhD Thesis, Goteborgs Universitet, Goteborg, Sweden, 1979. – 200 pp.

Выражаем благодарность аспиранту лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН М.Е. Литвику за помощь при обработке данных по спектральной прозрачности воды, ведущему инженеру А.А. Коломейцеву за батиметрические данные исследуемого озера, а также И.М. Фроленкову за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла.

