

Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 4 (138). С. 17–26.

Izvestiya of Altai State University. 2024. No 4 (138). P. 17–26.

Научная статья

УДК 535.8:556.5:574.5

DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-02

## Оценка влияния взвеси на спектральный показатель ослабления света в озерной воде

Ольга Борисовна Акулова<sup>1</sup>, Владимир Иванович Букатый<sup>2</sup>,

Константин Владимирович Лаптев<sup>3</sup>, Константин Валерьевич Марусин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, akulova8282@mail.ru

<sup>2</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, v.bukaty@mail.ru

<sup>3</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, laptevkonstantin2001@mail.ru

<sup>4</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, kat@iwep.ru

Original article

## Evaluation of Water Suspension Effect on Spectral Light Attenuation in Lake Water

Olga B. Akulova<sup>1</sup>, Vladimir I. Bukaty<sup>2</sup>, Konstantin V. Laptev<sup>3</sup>,

Konstantin V. Marusin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia, akulova8282@mail.ru

<sup>2</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia, v.bukaty@mail.ru

<sup>3</sup>Altai State University, Barnaul, Russia, laptevkonstantin2001@mail.ru

<sup>4</sup>Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia, kat@iwep.ru

**Аннотация.** Представлены результаты многолетних экспериментальных данных по спектральной прозрачности озерной воды (на примере поверхностного слоя озера Красиловское), полученные в различные гидрологические сезоны 2012–2023 гг. Значения показателей ослабления света, рассчитанных при натуральном основании логарифма в спектральном диапазоне 400–800 нм, за исследуемый период находились в пределах от 3,5 до 35,0 м<sup>-1</sup>, показателей поглощения света желтым веществом — от 2,5 до 26,1 м<sup>-1</sup>. Концентрация хлорофилла-а за 11-летний период изменялась в диапазоне 0,5–55,9 мг/м<sup>3</sup>, желтого вещества — 4,4–60,1 г/м<sup>3</sup>. Для оценки влияния водной взвеси на показатель ослабления света рассчитан ее относительный спектральный вклад в процентах, а также других основных оптически активных компонентов озерной воды — хлорофилла, желтого вещества и чистой воды.

**Abstract.** The paper presents the results of experimental data studies of many years on the spectral transparency of lake water (using the example of the surface layer of Lake Krasilovskoye) obtained in various 2012–2023 hydrological seasons. The calculated Napierian values of light attenuation coefficient in the 400–800 nm spectral range vary from 3.5 to 35.0 m<sup>-1</sup> during the studied period, and the values of yellow substance absorption coefficients vary from 2.5 to 26.1 m<sup>-1</sup>. The values of chlorophyll-a concentration over an 11-year period lies within the range of 0.5–55.9 mg/m<sup>3</sup>, and yellow substance concentration — 4.4–60.1 g/m<sup>3</sup>. To assess the effect of water suspension on light attenuation, the percentage of its relative spectral contribution is calculated along with the other essential optically active components of lake water, like chlorophyll, yellow substance, and pure water. The spectral contribution of the suspension to the light attenuation at λ=430 nm

Спектральный вклад взвеси в показатель ослабления света при  $\lambda=430$  нм находился в диапазоне 4,4–71,3 %, при  $\lambda=550$  нм — 11,7–76,3 %, при  $\lambda=670$  нм — 0,5–59,5 %. Для определения гранулометрического состава и счетной концентрации частиц взвеси использован метод оптической микроскопии. По данным измерений (2013–2023 гг.), средневзвешенные радиусы частиц в пробах воды в поверхностном слое озера находились в интервале 0,5–2,5 мкм, концентрации — от  $1,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  до  $26,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Распределения частиц по размерам аппроксимировали функцией Юнге с коэффициентом детерминации от 0,89 до 0,99.

**Ключевые слова:** метод оптической микроскопии, спектральный показатель ослабления света, счетная концентрация взвеси, радиус частиц, распределение частиц по размерам, гранулометрический состав, функция Юнге

**Для цитирования:** Акулова О.Б., Букатый В.И., Лаптев К.В., Марусин К.В. Оценка влияния взвеси на спектральный показатель ослабления света в озерной воде // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 4 (138). С. 17–26. DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-02.

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

**Благодарность:** благодарим сотрудников ЦКП МРС ИВЭП СО РАН за возможность работы на оборудовании и лично младшего научного сотрудника лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, кандидата географических наук Н.А. Курятникову за предоставленные микрофотографии частиц водной взвеси.

## Введение

Одной из важных оптически активных компонентов любых природных (океанических, морских, озерных) или искусственных (водохранилищ, каналов, прудов) водоемов является водная взвесь. Наряду с чистой водой, хлорофиллом и желтым веществом взвесь оказывает существенное влияние на суммарный показатель ослабления света [1–6], что требует подробного изучения ее оптических характеристик, которые, в свою очередь, определяются количеством, размерами, материалом и формой частиц. В литературе под водной взвесью принято понимать совокупность коллоидных (0,001–0,1 мкм), мелких (0,45–1 мкм) и крупных (диаметром от 0,5 мкм до 1 мм) частиц, которые состоят из минеральной (терригенной) и органической (биологической) фракций [7]. Связь концентраций водной взвеси и спектрального показателя ослабления света непосредственно зависит от состава и свойств самой взвеси, а именно размера, формы и показателя преломления материала частицы. Все эти данные определяют региональные особенности исследуемого водного объекта.

is within the range of 4.4–71.3 %, 11.7–76.3 % at  $\lambda=550$  nm, and 0.5–59.5 % at  $\lambda=670$  nm. The optical microscopy method is used to determine the particle size distribution and number concentration of suspension particles. According to the conducted measurements (2013–2023), the weighted average radius of particles in water samples in the surface layer of the lake varies within the range of 0.5–2.5  $\mu\text{m}$ , while concentrations vary from  $1.0 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$  to  $26.0 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$ . Particle size distributions are approximated by the Junge function with determination coefficient values from 0.89 up to 0.99.

**Keywords:** optical microscopy method, spectral light attenuation, suspended matter concentration, particle radius, particle size distribution, Junge function

**For citation:** Akulova O.B., Bukaty V.I., Laptev K.V., Marusin K.V. Evaluation of Water Suspension Effect on Spectral Light Attenuation in Lake Water. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 4 (138). P. 17–26. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2024)4-02.

**Funding:** the research was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS (state registration number of the project АААА-А17-117041210241-4).

**Acknowledgement:** We would like to thank our colleagues from the IWEP SB RAS Collective Center of Microscopy and X-ray Microscopy for their contribution to the study. We are also immensely grateful to junior researcher of the Laboratory of landscape and water ecological research and nature management, candidate of science in geography N.A. Kuryatnikova, for the provided microphotographs of water suspension particles.

Цель работы — оценить влияние водной взвеси как существенного оптического компонента на спектральный показатель ослабления света по данным основных расчетных характеристик — гранулометрического состава частиц взвеси, средней счетной концентрации и спектрального вклада взвеси в показатель ослабления света на примере поверхностного слоя озера Красиловское в различные гидрологические сезоны 2012–2023 гг.

В основу данной статьи положены результаты исследований авторов, которые ранее были представлены в работах [8–10].

## Материалы и методы исследования

Исследование сезонной динамики спектрального показателя ослабления света  $c(\lambda)$ , спектрального показателя поглощения света желтым веществом  $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ , средней счетной концентрации  $n$  и средневзвешенного радиуса  $r$  частиц водной взвеси в озере выполнили на основе данных, полученных в ходе полевых выездов, проведенных Институтом водных и экологических проблем (ИВЭП СО РАН) в период 2012–2023 гг. Точка отбора водных проб (координаты: 53°18'13" с.ш., 83°36'16" в.д.) указана на рисунке 1.



Рис. 1. Картограмма Красиловского озера с указанием точки отбора проб

В период исследования с поверхностного слоя воды отобрали 41 пробу и провели в лаборатории 984 измерения спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды на стационарном спектрофотометре ПЭ-5400УФ в спектральном интервале 400–800 нм с шагом 30 нм до и после фильтрации проб через мембраны с диаметром пор 0,22 мкм. Затем рассчитали спектральный показатель ослабления света  $c(\lambda)$  по следующей формуле:

$$c(\lambda) = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right), \quad (1)$$

вытекающей из закона Бугера, где  $L$  — длина измерительной кюветы (в эксперименте использовали кю-

веты длиной 10 мм),  $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$  — прозрачность (коэффициент пропускания) в относительных единицах,  $I(\lambda)$ ,  $I_0(\lambda)$  — интенсивности прошедшего и падающего на кювету света соответственно,  $\lambda$  — длина волны света. Максимальная абсолютная погрешность измерений  $c(\lambda)$  и  $a_{CDOM}(\lambda)$  для изучаемого спектрального диапазона составила 0,5 м<sup>-1</sup>.

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов озерной воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла-*a* и чистой воды) в  $c(\lambda)$  в поверхностном слое исследуемого водоема рассчитали с использованием модифицированной полуэмпирической модели ослабления света, которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [1, с. 229] и имеет вид

$$c(\lambda) = a_{chl}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + b_s(\lambda) + a_{pw}(\lambda), \quad (2)$$

где  $a_{chl}(\lambda)$  и  $a_{CDOM}(\lambda)$  — спектральные показатели поглощения хлорофиллом-*a* и желтым веществом соответственно,  $b_{mol}(\lambda)$  — спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой,  $b_s(\lambda)$  — спектральный показатель рассеяния водной взвесью,  $a_{pw}(\lambda)$  — спектральный показатель поглощения чистой

водой. Как видно из данного выражения, спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. Так как в эксперименте определяли параметр  $a_{CDOM}(\lambda)$ , то спектральный показатель рассеяния взвесью  $b_s(\lambda)$  можно найти по формуле, вытекающей из выражения (2)

$$b_s(\lambda) = c(\lambda) - [a_{chl}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + a_{pw}(\lambda)]. \quad (3)$$

Концентрацию желтого вещества в пробах воды определили по формуле

$$C_{CDOM} = a_{CDOM}(450) / a_{sp.CDOM}(450), \quad (4)$$

где  $C_{CDOM}$  — концентрация желтого вещества, в  $г/м^3$ ,  $a_{sp,CDOM}(450)$  — удельный показатель поглощения света желтым веществом на длине волны  $\lambda=450$  нм, в  $м^2/г$ , взято из работы [11]. Дополнительно определили концентрацию хлорофилла-а стандартным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ 17.1.4.02-90.

В настоящее время для измерений параметров водной взвеси применяется большое количество различных методов, но пока ни один не может быть признан универсальным. Для объективной оценки взвеси желателен параллельное использование нескольких методов. В настоящей работе количество и размеры частиц взвеси определили с помощью двух счетных камер — Нажотта (глубина 0,5 мм) и Горяева (глубина 0,1 мм) с использованием световых микроскопов — Nikon Eclipse 80i и Axio Lab 1.0 (Carl Zeiss, Германия) при помощи цифровой фотокамеры Axioscam 208 (Carl Zeiss) с программным обеспечением ZEN 3.0. (микроскопы находятся в центре коллективного пользования микроскопии и рентгеновской спектроскопии института (ЦКП МРС ИВЭП СО РАН). Метод оптической микроскопии позволяет получать изображение частиц, которое возможно проанализировать как вручную, так и автоматически. Измерения размера частиц провели по фотографиям после микрофотографирования и увеличения изображения объектов. Обработали 115 микрофотографий с общим количеством частиц 18 779 шт., что обеспечило высокую статистическую достоверность полученных результатов.

Особенностью в распределении частиц водной взвеси по размерам в наших измерениях является увеличение их счетной концентрации с уменьшением радиуса. Такое распределение описывается функцией типа Юнге [12]

$$N = A \cdot r^{-\gamma}, \quad (5)$$

где  $A$  — нормировочный множитель,  $N$  — счетная концентрация частиц,  $\gamma$  — константа, которая, по дан-

ным разных исследователей для океанов и морей, варьирует от 0,7 до 6 [13].

### Результаты исследования

За исследуемый период (2012–2023 гг.) значения показателя ослабления света  $c(\lambda)$  в спектральном диапазоне 400–800 нм в пробах воды, отобранных в поверхностном слое озера, находились в достаточно широком диапазоне от 3,5 до 35,0  $м^{-1}$ , показателя поглощения света желтым веществом  $a_{CDOM}(\lambda)$  от 2,5 до 26,1  $м^{-1}$ . За 11-летний период оптических исследований на озере амплитуда колебаний значений  $c(\lambda)$  в поверхностном слое изменялась в широких пределах, максимальные величины  $c(\lambda)$  зафиксированы весной в 2018 г., минимальные — зимой 2013 г. Водоем за период исследований изменил свой трофический статус дважды, от мезотрофного (2012 г.) до эвтрофно-гиперэвтрофного (2018 г.), и в 2023 г. значения  $c(\lambda)$  оказались близки к минимальным величинам 2012 г. Это говорит нам о том, что экосистема озера оказалась устойчивой к антропогенным факторам нагрузки и способной к самоочищению. В нашем случае причиной существенных изменений показателя ослабления света  $c(\lambda)$  является сильная его зависимость от концентраций хлорофилла-а  $C_{chl}$  и желтого вещества  $C_{CDOM}$ . Содержание хлорофилла-а в поверхностном слое водоема изменялось за 11-летний период в пределах 0,5–55,9  $мг/м^3$ , которое за последние три года довольно сильно снизилось до 0,5–13,1  $мг/м^3$ . Результаты по концентрации желтого вещества  $C_{CDOM}$  в поверхностном слое озера за 6-летний период (2017–2023 гг.) варьировали также в широком диапазоне 4,4–60,1  $г/м^3$  со средним значением 27,2  $г/м^3$ . За последние два года значения  $C_{CDOM}$  снизились до минимума, равного 4,4  $г/м^3$ .

В таблице 1 представлены результаты расчетов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов озерной воды для поверхностного слоя водоема в период 2014–2023 гг.

Таблица 1

Относительный спектральный вклад (%) основных оптически активных компонентов озерной воды в показатель ослабления света в поверхностном слое озера Красиловское

Дата	$C_{chl}$ $мг/м^3$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $c(\lambda)$ , $м^{-1}$
		$\frac{a_{pw}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{CDOM}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{chl}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{b_s(\lambda) + b_{moi}(\lambda)}{c(\lambda)}$	
(при $\lambda = 430$ нм)						
27.02.2014	3,6	0,1	25,3	3,3	71,3	8,6
15.05.2014	31,2	0,1	32,6	17,4	49,9	14,3
30.07.2014	31,5	0,1	30,7	35,1	34,1	7,2
02.10.2014	36,2	0,1	45,0	43,3	11,6	6,7
18.02.2015	2,3	0,1	81,9	6,8	11,2	2,7
26.05.2015	32,1	0,1	57,1	36,5	6,3	7,0
08.10.2015	25,3	0,1	38,4	31,1	30,4	6,5

Оценка влияния взвеси на спектральный показатель...

Продолжение таблицы 1

Дата	$C_{\text{вп}}^{\text{р}}$ мг/м <sup>3</sup>	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $c(\lambda)$ , м <sup>-1</sup>
		$\frac{a_{\text{pw}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{\text{CDOM}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{\text{chl}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{b_s(\lambda) + b_{\text{mot}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	
25.02.2016	7,7	0,1	85,7	9,8	4,4	6,3
24.05.2016	10,4	0,1	50,7	12,8	36,4	6,5
18.07.2016	26,2	0,1	51,1	23,3	25,5	9,0
05.10.2016	31,8	0,1	68,6	25,0	6,3	10,2
20.02.2017	5,6	0,1	80,1	7,7	12,1	5,8
04.05.2017	22,4	0,1	69,4	24,8	5,7	7,2
23.08.2017	24,6	0,1	78,8	16,1	5,0	12,2
11.10.2017	21,5	0,1	72,0	17,5	10,4	9,6
07.05.2018	34,6	0,1	70,4	13,4	16,1	20,6
02.08.2018	21,4	0,1	63,7	10,7	25,5	16,0
10.10.2018	26,6	0,1	70,2	14,1	15,6	15,1
17.05.2019	15,4	0,1	76,4	10,0	13,5	12,3
15.08.2019	23,5	0,1	80,6	12,9	6,4	14,5
14.10.2019	19,4	0,1	57,2	11,8	30,9	13,1
11.08.2020	20,3	0,1	46,1	9,1	44,7	17,8
06.10.2020	20,3	0,1	80,3	13,3	6,3	12,2
11.05.2021	11,5	0,1	58,0	6,4	35,5	14,3
10.08.2021	6,3	0,1	58,1	4,1	37,7	12,4
12.10.2021	7,3	0,1	64,3	5,9	29,7	9,8
17.05.2022	2,8	0,1	26,7	5,0	68,2	4,5
09.08.2022	7,0	0,1	53,4	7,7	38,8	7,3
11.10.2022	6,8	0,1	54,8	12,9	32,2	4,2
16.05.2023	3,5	0,1	30,9	6,7	62,3	4,2
08.08.2023	2,1	0,1	37,5	5,3	57,1	3,2
10.10.2023	13,1	0,1	65,6	16,4	17,9	6,4
(при $\lambda = 550$ нм)						
27.02.2014	3,6	0,9	32,7	0,4	66,0	6,0
15.05.2014	31,2	0,5	26,4	2,0	71,1	10,4
30.07.2014	31,5	1,0	29,0	4,9	65,1	4,2
02.10.2014	36,2	1,5	35,6	6,1	56,8	3,8
18.02.2015	2,3	3,7	82,1	1,0	13,2	1,5
26.05.2015	32,1	1,4	43,0	0,5	55,1	4,0
08.10.2015	25,3	1,3	30,0	3,8	64,9	4,3
25.02.2016	7,7	1,2	58,7	1,0	39,1	4,6
24.05.2016	10,4	1,4	45,0	1,6	52,0	4,0
18.07.2016	26,2	0,9	45,0	2,8	51,3	6,0
05.10.2016	31,8	0,7	63,0	2,8	33,5	7,3
20.02.2017	5,6	1,3	74,6	0,8	23,3	4,3
04.05.2017	22,4	1,2	51,0	3,0	44,8	4,7
23.08.2017	24,6	0,8	85,2	2,3	11,7	6,8
11.10.2017	21,5	1,1	84,2	2,7	12,0	5,0
07.05.2018	34,6	0,7	60,0	2,8	36,5	8,0
02.08.2018	21,4	0,6	74,4	1,5	23,5	9,4
10.10.2018	26,6	0,6	68,0	1,8	29,6	9,4
17.05.2019	15,4	0,8	73,2	1,4	24,6	7,1
15.08.2019	23,5	5,6	80,4	1,6	12,4	9,2
14.10.2019	19,4	0,7	55,1	1,6	42,6	7,8
11.08.2020	20,3	0,6	45,5	13,0	40,9	10,1
06.10.2020	20,3	0,7	69,3	1,7	28,3	7,5
11.05.2021	11,5	0,6	50,0	0,8	48,6	8,8

Дата	$C_{\text{ЧР}}$ мг/м <sup>3</sup>	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления света $c(\lambda)$ , м <sup>-1</sup>
		$\frac{a_{\text{pw}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{\text{CDOM}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{a_{\text{chl}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	$\frac{b_s(\lambda) + b_{\text{mol}}(\lambda)}{c(\lambda)}$	
12.10.2021	7,3	1,0	52,7	0,8	45,5	5,5
17.05.2022	2,8	2,8	20,0	0,9	76,3	2,0
09.08.2022	7,0	1,3	35,7	1,1	61,9	4,2
11.10.2022	6,8	2,7	66,7	2,1	28,5	2,1
16.05.2023	3,5	3,3	29,4	1,3	66,0	1,7
08.08.2023	2,1	4,0	35,7	0,9	59,4	1,4
10.10.2023	13,1	1,7	60,6	2,6	35,1	3,3
(при $\lambda = 670$ нм)						
27.02.2014	3,6	7,9	30,0	2,6	59,5	5,5
15.05.2014	31,2	5,0	24,6	14,5	55,9	8,6
30.07.2014	31,5	11,4	24,5	34,0	30,1	3,7
02.10.2014	36,2	13,0	43,0	15,3	28,7	3,1
18.02.2015	2,3	29,5	43,1	8,3	9,1	1,1
26.05.2015	32,1	12,0	36,1	35,2	16,7	3,6
08.10.2015	25,3	11,7	21,6	27,3	39,4	3,7
25.02.2016	7,7	8,7	42,0	6,1	43,2	5,0
24.05.2016	10,4	12,0	36,1	11,5	40,4	3,6
18.07.2016	26,2	8,3	48,0	20,1	23,6	5,2
05.10.2016	31,8	7,1	60,6	21,0	11,3	6,1
20.02.2017	5,6	13,1	64,9	6,8	15,2	3,3
04.05.2017	22,4	10,6	44,0	21,8	23,6	4,1
23.08.2017	24,6	8,7	61,6	19,7	10,0	5,0
11.10.2017	21,5	10,8	58,1	21,1	10,0	4,0
07.05.2018	34,6	7,0	50,0	22,3	20,7	6,2
02.08.2018	21,4	6,1	77,5	12,0	4,4	7,1
10.10.2018	26,6	6,0	63,0	14,5	16,5	7,3
17.05.2019	15,4	7,7	66,1	11,0	15,2	5,6
15.08.2019	23,5	6,0	79,1	13,0	1,9	7,2
14.10.2019	19,4	7,4	54,2	13,1	25,3	5,9
11.08.2020	20,3	6,0	47,9	11,1	35,0	7,3
06.10.2020	20,3	7,3	62,7	13,7	16,3	5,9
11.05.2021	11,5	5,8	45,3	6,1	42,8	7,5
10.08.2021	6,3	8,7	46,0	5,0	40,3	5,0
12.10.2021	7,3	9,5	41,3	6,3	42,9	4,6
17.05.2022	2,8	27,2	6,3	7,0	59,5	1,6
09.08.2022	7,0	13,2	24,2	8,5	54,1	3,3
11.10.2022	6,8	33,5	46,1	20,9	0,5	1,3
16.05.2023	3,5	54,4	12,5	17,5	15,6	0,8
08.08.2023	2,1	54,3	12,5	10,5	22,7	0,8
10.10.2023	13,1	19,8	45,5	23,8	10,9	2,2

В результате расчетов получено, что максимальный вклад в  $c(\lambda)$  в основном вносят взвесь (ВЗ) и желтое вещество (ЖВ). Суммарное ослабление света взвесью на длине волны 550 нм составило 11,7–76,3 %. Наибольший вклад ВЗ в  $c(\lambda)$  при  $\lambda=430$  нм приходится на май 2022–2023 гг. и февраль 2014 г. — 68,2, 62,3 и 71,3 % соответственно. При  $\lambda=670$  нм максимальные значения вклада ВЗ зафиксированы также в мае

2014 г. и 2022 г. и составили около 60 %. Наибольший вклад ЖВ (более 80 %) в общее ослабление при  $\lambda=430$  нм приходится на период 2015–2017 гг., а также 2019 и 2020 гг., минимальный вклад ЖВ в показатель ослабления света зафиксирован в феврале 2014 г. — 25,3 %. На длине волны 550 нм вклад ЖВ в период исследования находился в пределах от 20,0 (2022 г.) до 82,1 % (2015 г.), а в длинноволновой области спектра (при  $\lambda=670$  нм) — от 6,3 (2022 г.) до 79,1 % (2019 г.).

Таким образом, отмечается, что вклад ЖВ преобладает в летний и осенний периоды и заметно снижается в весенний период (до 25,3 % при  $\lambda=430$  нм, до 20,0 % при  $\lambda=550$  нм, до 6,3 % при  $\lambda=670$  нм). Вклад хлорофилла (ХЛ) в ослабление света максимален при  $\lambda=430$  и 670 нм, минимум — при  $\lambda=550$  нм. Выбранные длины волн для расчетов — 430 и 670 нм — характеризуются максимальным поглощением света хлорофиллом-а в данном спектральном диапазоне, а длина волны 550 нм соответствует центру спектрального интервала 400–800 нм, на который приходится подавляющая часть энергии солнечного излучения. Вклад ХЛ при  $\lambda=430$  нм в сум-

марное ослабление света преобладает осенью 2014 г. (43,3 %), весной 2015 г. (36,5 %) и летом 2014 г. (35,1 %), лишь немного превышая вклад взвеси. При  $\lambda=550$  нм хлорофилл минимально оказывает влияние на ослабление света, лишь трижды превышая 3 % (осенью 2015 г. — 3,8 %, летом и осенью 2014 г. — 4,9 % и 6,1 % соответственно, а также летом 2020 г. — 13,0 %). Чистая вода (ЧВ) вносит несущественный вклад в ослабление света при  $\lambda=430$  нм, во всех случаях составляет не более 0,1 %, но резко увеличивается при  $\lambda=550$  нм до 5,6 %. Отметим, что за последние три года заметно вырос вклад чистой воды (более 50,0 %) в  $s(\lambda)$  в длинноволновой области спектра.

Таблица 2

Концентрация и гранулометрический состав частиц взвеси в озере Красиловское

$r$ , мкм	$n$ , $10^6 \text{ см}^{-3}$	Дата
2,4	1,3	15.05.2013
2,5	1,0	08.08.2013
2,5	1,3	23.10.2013
1,6	9,5	15.05.2014
0,5	2,2	08.10.2015
1,2	1,4	27.11.2015
1,1	2,1	24.05.2016
1,2	1,9	18.07.2016
1,2	2,3	05.10.2016
1,9	1,6	04.05.2017
1,6	2,2	23.08.2017
1,1	1,7	11.10.2017
1,6	6,3	15.08.2019
0,6	7,6	14.10.2019
0,6	4,3	11.05.2021
0,6	14,8	10.08.2021
0,6	14,4	12.10.2021
0,9	5,4	17.05.2022
0,8	17,4	09.08.2022
0,9	4,2	11.10.2022
1,0	6,2	16.05.2023
0,8	26,0	08.08.2023
0,9	9,8	10.10.2023

В таблице 2 представлен результат экспериментального определения средней счетной концентрации  $n$  и средневзвешенного радиуса  $r$  частиц взвеси в поверхностном слое водоема с помощью метода оптической микроскопии. По данным измерений (2013–2023 гг.), средневзвешенные радиусы частиц в пробах воды с поверхностного слоя озера в различные гидрологические сезоны находились в интервале  $0,5 \div 2,5$  мкм, концентрации — от  $1,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  до  $26,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

В качестве примера на рисунке 2 представлены функции распределения частиц по размерам в поверхностном слое исследуемого водоема в период

2022–2023 гг. Распределения частиц по размерам аппроксимировали функцией Юнге с коэффициентом детерминации от 0.89 до 0.99. Здесь  $N(r)$  — относительное содержание частиц с размерами  $r$  в единице объема, находящихся в интервале  $[r, r \pm \Delta r]$ . Для данного случая было обработано 30 микрофотографий по 6 пробам с общим количеством частиц 4942 шт., что обеспечивает хорошую статистику.

Проведен анализ динамики среднего радиуса и средней счетной концентрации частиц взвеси в поверхностном слое озера Красиловское, который показал, что в последние годы отмечено заметное

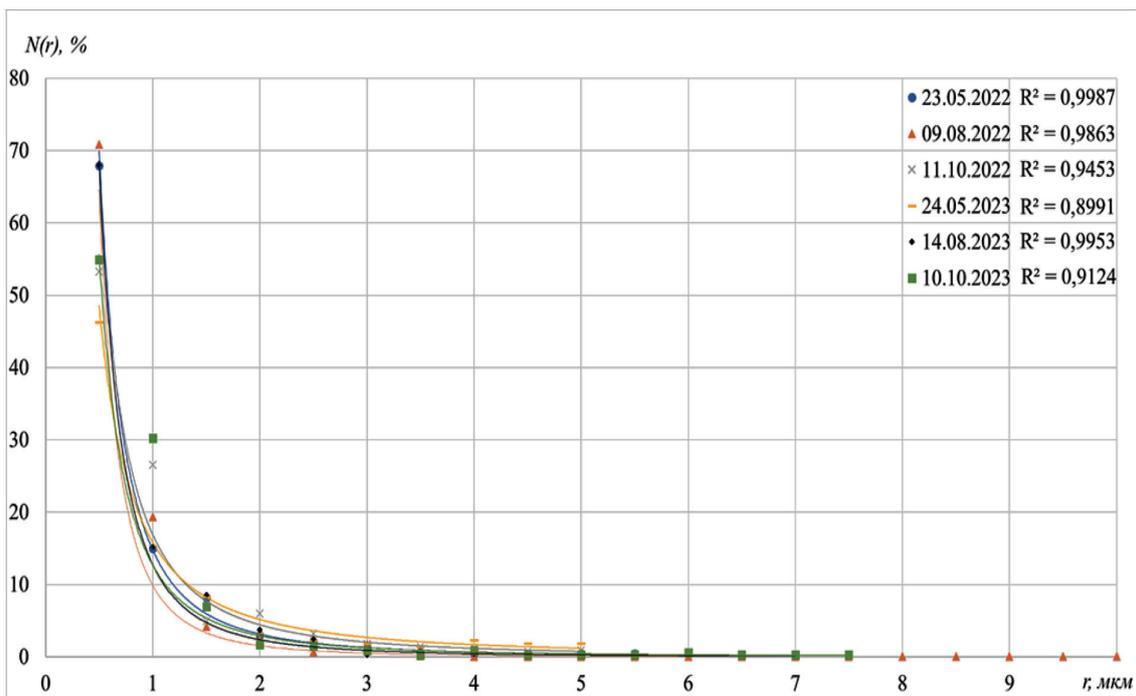


Рис. 2. Функция распределения частиц по размерам

уменьшение среднего радиуса частиц во все сезоны (наибольшее летом — в 2,1 раза, наименьшее осенью — в 1,4 раза) и увеличение средней счетной концентрации частиц (особенно летом).

Уменьшение среднего радиуса частиц в поверхностном слое исследуемого водоема в последние годы, возможно, обусловлено изменениями различных внешних факторов среды, которые влияют на сохранение размера более крупных частиц, в результате чего появляется большое количество довольно мелких частиц радиусом  $0,5 \div 1,0$  мкм, что, в свою очередь, приводит к увеличению средней счетной концентрации водной взвеси.

#### Заключение

В настоящей статье рассмотрены результаты экспериментальных данных по влиянию водной взвеси на суммарный показатель ослабления света, полученные в ходе реализации серии гидрооптических исследований на озере в период 2012–2023 гг.

Приведены данные о количественном составе полидисперсных частиц водной взвеси и их распределении по размерам, которые находились в интервале  $0,5 \div 2,5$  мкм со средним значением 1,0 мкм по радиусу. Экспериментальное определение размерного состава частиц взвеси с помощью метода оптической микроскопии в исследуемом водоеме показали, что распределение частиц по размерам можно аппроксимировать функцией типа Юнге. При этом коэффициент детерминации находился в диапазоне от 0,89 до 0,99, что говорит об удовлетворительной аппроксимации.

В связи с тем что водная взвесь при определенных физико-химических условиях может быть как источником вторичного загрязнения водных объектов, так и способствовать их самоочищению, то вопрос ее дальнейшего исследования как важного показателя качества воды приобретает особую значимость и актуальность. Полученные данные могут быть полезны для исследования водной взвеси во внутренних водоемах Сибири.

#### Библиографический список

1. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / ред. А.С. Монин. М.: Наука, 1983. С. 208–234.
2. Маньковский В.И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного

света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 5. С. 14–29.

3. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7. № 3. С. 3–22.

4. Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A. et al. Preliminary Results of Bio-Optical Investigations at Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. No 1. P. 58–61.

5. Shi L., Mao Z., Wu J. et al. Variations in Spectral Absorption Properties of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Qiandaohu // *Water*. 2017. No 9 (352). P. 1–20.

6. Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. Optical Characteristics of Water at the Mouth of the Ob River // *Limnology and Freshwater Biology*. 2021. No 3. P. 1147–1151.

7. Clavano W.R., Boss E., Karp-Boss L. Inherent Optical Properties of Non-Spherical Marine-Like Particles — from Theory to Observation // *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 2007. No 45. P. 1–38.

8. Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края : монография / 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.

9. Акулова О.Б., Букатый В.И., Кириллов В.В. и др. Водная взвесь и ее влияние на спектральное ослабление света в озерной воде // *Известия Алтайского государственного университета*. 2021. № 4 (120). С. 11–16. DOI: 10.14258/izvasu(2021)4-01

10. Акулова О.Б., Букатый В.И., Марусин К.В. Многолетняя динамика спектральной прозрачности воды на разных глубинах озера Красилдовское (Алтайский край) // *Известия Алтайского отделения Русского географического общества. Раздел 2. Гидрология. Климат*. 2023. № 4 (71). С. 15–24.

11. Nyquist G. Investigation of Some Optical Properties of Sea Water with Special Reference to Lignin Sulfonates and Humic Substances: Ph. D. thesis. Göteborg, 1979. 200 p.

12. Bader H. The Hyperbolic Distribution of Particle Sizes // *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75 (15). P. 2822–2830.

13. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.

## References

1. Kopelevich O.V. Low-parameter Models of Optical Properties of seawater. Ocean Optics. T.1. *Physical Optics of the Ocean*. Moscow: Nauka, 1983. P. 208–234. (In Russ.).

2. Mankovskiy V.I. Spectral Contribution of Components of Seawater to an Indicator of Weakening of a Directional Light in a Surface Water of the Mediterranean Sea. *Marine Hydrophysical Journal*. 2011. No 5. P. 14–29. (In Russ.).

3. Levin I.M. Few-Parameter Optical Models of Seawater Inherent Optical Properties. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014. No 7 (3). P. 3–22. (In Russ.).

4. Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A. et al. Preliminary Results of Bio-Optical Investigations at Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. No 1. P. 58–61.

5. Shi L., Mao Z., Wu J. et al. Variations in Spectral Absorption Properties of Phytoplankton, Non-Algal Particles and Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Qiandaohu. *Water*. 2017. No 9 (352). P. 1–20.

6. Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. Optical Characteristics of Water at the Mouth of the Ob River. *Limnology and Freshwater Biology*. 2021. No 3. P. 1147–1151.

7. Clavano W.R., Boss E., Karp-Boss L. Inherent Optical Properties of Non-Spherical Marine-Like Particles — from Theory to Observation. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. 2007. No 45. P. 1–38.

8. Sutorikhin I.A., Bukatyy V.I., N.F. Kharlamova, Akulova O.B. *Climatic Conditions and Hydrooptic Characteristics of Freshwater Lakes of the Altai Krai*: monograph. отв. ред. V.N. Sedalishchev, Grew. acad. sciences, Sib. Department, Water In. And ecol. Problems, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Altai State University. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2016. 162 p. (In Russ.).

9. Akulova O.B., Bukaty V.I., Kirillov V.V. et al. Water Suspension and Its Effect on the Spectral Attenuation of Light in Lake Water. *Izvestiya of Altai State University*. 2021. No 4 (120). P. 11–16. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2021)4-01.

10. Akulova O.B., Bukaty V.I., Marusin K.V. Long-Term Dynamics of Spectral Transparency of Water at Different Depths of Lake Krasilovskoye (Altai Krai). *Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. Section 2. Hydrology. Climate*. No 4 (71). P. 15–24. (In Russ.).

11. Nyquist G. *Investigation of Some Optical Properties of Sea Water with Special Reference to Lignin Sulfonates and Humic Substances*: Ph. D. thesis. Göteborg, 1979. 200 p.

12. Bader H. The Hyperbolic Distribution of Particle Sizes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75 (15). P. 2822–2830.

13. Erlov N.G. *Sea Optics*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 248 p. (In Russ.).

## Сведения об авторах

**О.Б. Акулова**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

**В.И. Букатый**, доктор физико-математических наук, профессор, почетный профессор, Алтайский государственный университет, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

**К.В. Лаптев**, магистрант Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

**К.В. Марусин**, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия.

***Information about the authors***

**О.В. Akulova**, Candidate of Sciences in Technology, Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

**В.И. Bukaty**, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

**К.В. Laptev**, Master Student of the Department of General and Experimental Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

**К.В. Marusin**, Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia.