

ФИЗИКА

УДК 53:556.55

Водная взвесь и ее влияние на суммарное ослабление света в озерной воде*

О.Б. Акулова, В.И. Букатый, В.В. Кириллов, О.М. Фроленков

Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Water Suspension and its Effect on Total Light Attenuation in Lake Waters

O.B. Akulova, V.I. Bukaty, V.V. Kirillov, O.M. Frolenkov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (Barnaul, Russia)

Материалы, использованные и представленные в данной работе, получены авторами в период 2012–2021 гг. в ходе полевых выездов на пресноводные водоемы Алтайского края. За исследуемый период, по данным гидрооптических измерений, значения показателя ослабления света в диапазоне 400–800 нм, рассчитанных при натуральном основании логарифма в поверхностном слое озер Лапа и Красиловское, варьировали в широких пределах 2,3–19,7 м⁻¹ и 2,9–35,0 м⁻¹ соответственно. Для оценки оптического влияния водной взвеси на суммарный показатель ослабления света рассчитан ее относительный спектральный вклад, а также вклад желтого вещества, хлорофилла и чистой воды на следующих длинах волн: 430, 550 и 670 нм. В результате расчетов получено, что в воде эвтрофного озера Лапа взвесь оказывает максимальное влияние на показатель ослабления света в осенне-зимний период. Осенью максимальный вклад взвеси наблюдался в 2015 г. (на всех трех длинах волн), достигая 88,5 %, минимальные вклады взвеси приходились на 2017 г.: 1,8–2,4 %. Для эвтрофно-гиперэвтрофного озера Красиловское максимальные вклады взвеси в показатель ослабления света несколько более 70 % зафиксированы в 2014 г. зимой и весной — 71,3 % при $\lambda=430$ нм и 71,1 % при $\lambda=550$ нм соответственно.

Для определения размерного состава и счетной концентрации частиц водной взвеси использован метод оптической микроскопии. В результате получено, что средневзвешенный радиус частиц в поверхностном слое оз. Лапа за исследуемый период составил 1,2 мкм, в оз. Красиловское — 1,4 мкм. Среднее значение счетной концентрации частиц взвеси в озерах за период наблюдений изменялось в пределах от $0,2 \cdot 10^6$ см⁻³ до $14,7 \cdot 10^6$ см⁻³ и составило порядка $3,3 \cdot 10^6$ см⁻³ для оз. Лапа и $3,0 \cdot 10^6$ см⁻³ для оз. Красиловское.

The paper presents the data obtained by the authors in 2012–2021 during field trips to freshwater reservoirs of Altai Krai. According to hydro-optical measurements, values of light attenuation index in the range of 400–800 nm calculated using the natural logarithm varied greatly within 2.3–19.7 m⁻¹ and 2.9–35.0 m⁻¹ in the surface layer of lakes Lapa and Krasilovskoye during the study period. The relative spectral contribution of water suspension and contributions of yellow matter, chlorophyll, and pure water constituents at wavelengths of 430, 550, and 670 nm were estimated to assess the optical effect of water suspension on the total light attenuation index. The calculation results demonstrated that water suspension had the maximum effect on light attenuation in waters of eutrophic lake Lapa during the autumn-winter period. The maximum effect at all three wavelengths was observed in autumn of 2015, and the contribution of water suspension to light attenuation reached 88.5%, whereas its minimum (1.8–2.4 %) was recorded in 2017. The maximum contribution of water suspension on light attenuation in waters of eutrophic-hypereutrophic lake Krasilovskoye slightly exceeded the value of 70% during the winter of 2014. The next maximums were revealed during the spring of 2014 and had values of 71.3 % at $\lambda=430$ nm and 71.1 % at $\lambda=550$ nm.

Optical microscopy was used to estimate the size and concentration of water suspension particles. The average weighted value of radius for water suspension particles in the surface layer of lakes Lapa and Krasilovskoye was found to be 1.2 and 1.4 microns, respectively. The average particulate count for water suspension during the observation period varied in the range of $0.2 \cdot 10^6$ cm⁻³– $14.7 \cdot 10^6$ cm⁻³ with values of $3.3 \cdot 10^6$ cm⁻³ for lake Lapa and $3.0 \cdot 10^6$ cm⁻³ for lake Krasilovskoye.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ проекта 0306-2021-0002).

Ключевые слова: спектральный показатель ослабления света, счетная концентрация взвеси, метод оптической микроскопии, радиус частиц, озера.

Key words: spectral light attenuation, suspension particulate count, optical microscopy, particle radius, lakes.

DOI: 10.14258/izvasu(2021)4-01

Введение

В любом природном водоеме, как правило, присутствует большое количество частиц взвеси, которые по своему происхождению можно подразделить на два класса: биогенные (органические) и терригенные (минеральные) частицы. Для минеральных частиц в зависимости от состава образующих их минералов действительная часть относительного показателя преломления находится в пределах 1,15–1,20. Показатель преломления органических частиц в основном заключен в диапазоне 1,02–1,05 [1]. Концентрация взвеси, а также ее соотношение между другими показателями трофности водоемов относится к числу тех показателей, которые характеризуют экологическое состояние пресноводных экосистем. Так, взвесь наряду с желтым веществом, хлорофиллом *a* и чистой водой оказывает существенное влияние на суммарный показатель ослабления света [2–9]. Связь спектрального показателя ослабления света с концентрацией взвеси непосредственно зависит от ее состава и свойств, а именно размера, формы и показателя преломления материала частицы. Все эти данные определяют региональные особенности исследуемого водного объекта.

Цель работы — оценить влияние водной взвеси на суммарное ослабление света в озерной воде, по данным основных экспериментальных характеристик — счетной концентрации, размерного состава частиц, относительного спектрального вклада взвеси в поверхностном слое исследуемых озер.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — два пресноводных озера Алтайского края — Лапа и Красиловское, которые являются разнотипными, так как отличаются по происхождению и положению в ландшафте, по морфологии, проточности и степени трофности.

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

Озеро Красиловское расположено (координаты: 53°18'77" N, 84°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). Питание водоема происходит за счет поверхностных и грунтовых вод. Озеро является бессточным.

Исследование спектрального показателя ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, а также экспериментальное определение средней счетной концентрации \bar{n} и средневзвешенного радиуса \bar{r} частиц взвеси в поверхностном слое водоемов в различные сезоны года в период 2012–2021 гг. выполнили на основе данных, полученных в ходе полевых выездов, проведенных Институтом водных и экологических проблем (ИВЭП СО РАН).

За исследуемый период с поверхностного слоя (0–10 см, т.е. расстояние от границы раздела вода — атмосфера) озер отобрали 48 проб, провели 1152 отдельных измерения спектральной прозрачности воды на спектрофотометре типа ПЭ-5400УФ. 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 через 30 нм. 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. Максимальная абсолютная погрешность определения показателя ослабления света и показателя поглощения света желтым веществом составила 0,5 м⁻¹.

Относительный спектральный вклад оптически активных компонентов озерной воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла *a* и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемых водоемов рассчитали с использованием модифицированной спектральной модели показателя ослабления света [10], которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [11] и имеет вид

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

где $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — спектральные показатели поглощения хлорофиллом *a* 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.

Показатель поглощения хлорофиллом *a* рассчитали по формуле, взятой из работы [11]

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

Здесь $C_{хл}$ — концентрация хлорофилла a , в $мг/м^3$, $\kappa_{уд.хл}(\lambda)$ — удельный показатель поглощения хлорофиллом a , в $м^2/мг$, его значения приведены в работе [11]. Для расчетов $\kappa_{чв}(\lambda)$ использовали табличные данные из работ [12, 13], для $\sigma_{мол}(\lambda)$ — [13]. Как видно из выражения (2), спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. В отличие от ранее выполненных работ, где параметр $\sigma_{вз}(\lambda)$ определяется экспериментально, а $\kappa_{жв}(\lambda)$ находится как разность между измеренным $\epsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, нами рекомендован другой подход. Так как в эксперименте определяли параметр $\kappa_{жв}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{вз}(\lambda)$ можно найти из выражения (2) по формуле [10]

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

Количество и размеры частиц взвеси определялись с использованием счетной камеры Нажотта (в период 2012–2018 гг.) и камеры Горяева (в период 2019–2021 гг.), а также светового микроскопа Nikon Eclipse 80i. В период исследования было обработано 480 микрофотографий с общим количеством частиц 35835 штук, что обеспечивало статистическую достоверность полученных результатов.

Результаты и обсуждение

За исследуемый период 2012–2021 гг. значения спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$ (при натуральном основании логарифма) в диапазоне 400–800 нм в пробах воды, отобранных в поверхностном слое озера Лапа, варьировали в широких пределах 2,3–19,7 $м^{-1}$, на озере Красиловском значения $\epsilon(\lambda)$ находились в диапазоне 2,9–35,0 $м^{-1}$. Среднее значение относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки, составляло для озер Лапа и Красиловское — 100,7 и 95,2 см соответственно. Значения измеренных концентраций хлорофилла a в поверхностном слое водоемов за период наблюдений изменялись для оз. Лапа в пределах от 0,2 до 33,8 $мг/м^3$, а для оз. Красиловское — от 2,3 до 55,9 $мг/м^3$.

В результате расчетов относительного спектрального вклада основных оптически активных компонентов воды (чистой воды, взвеси, желтого вещества и хлорофилла) получено, что максимальный вклад в $\epsilon(\lambda)$ на озерах Лапа и Красиловское вносит взвесь и желтое вещество. В таблицах 1, 2 приведены результаты расчетов спектрального вклада взвеси в суммарное ослабление света в озерной воде для поверхностного слоя двух разнотипных водоемов Алтайского края в различные сезоны в период с 2014 по 2021 г.

Таблица 1

Относительный спектральный вклад водной взвеси в суммарный показатель ослабления света на озере Лапа

Дата	$C_{хл}, мг/м^3$	$\frac{\sigma_{вз}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}, \%$			$\epsilon(\lambda), м^{-1}$		
		$\lambda = 430 нм$	$\lambda = 550 нм$	$\lambda = 670 нм$	$\lambda = 430 нм$	$\lambda = 550 нм$	$\lambda = 670 нм$
22.05.2014	5,9	28,1	69,7	56,5	3,7	3,0	2,7
31.07.2014	17,9	41,1	66,1	38,1	9,9	6,0	4,3
14.10.2014	13,5	25,1	51,4	21,4	7,1	4,2	3,5
25.02.2015	0,2	52,4	69,9	66,7	3,4	2,8	2,5
05.05.2015	14,3	55,9	71,6	55,6	13,6	7,8	5,4
25.11.2015	35,4	38,3	88,5	82,2	8,0	9,4	12,1
25.01.2016	1,1	3,6	41,9	20,2	3,0	2,0	1,6
04.05.2016	14,1	26,1	59,4	49,1	6,0	4,3	4,5
02.08.2016	6,3	17,8	22,6	9,9	6,7	4,0	3,2
04.10.2016	33,8	4,3	46,6	6,1	7,2	5,0	3,3
09.02.2017	1,0	9,7	31,3	32,2	5,2	3,2	2,8
03.05.2017	11,0	30,5	51,8	45,0	10,5	7,1	5,8
22.08.2017	10,4	3,0	8,5	6,6	10,2	5,9	4,5
10.10.2017	13,1	2,4	1,8	2,2	8,3	5,5	4,5
13.02.2018	2,3	56,0	74,3	78,4	13,6	12,3	13,5
03.05.2018	14,0	10,1	20,2	15,3	16,6	10,7	8,6
01.08.2018	8,7	21,2	28,2	14,8	8,5	5,3	4,2
09.10.2018	12,9	26,5	43,1	32,6	12,3	8,5	6,6
24.01.2019	0,8	16,4	24,4	27,9	8,1	5,5	4,8
14.05.2019	16,8	17,5	30,4	24,8	14,0	10,0	8,4
13.08.2019	6,0	18,7	28,5	17,7	9,2	6,0	4,7
15.10.2019	24,5	21,9	33,1	15,7	13,4	8,1	6,3
05.02.2020	1,0	7,4	17,5	20,1	7,0	4,8	4,1
11.08.2020	4,4	17,6	24,5	1,1	9,9	6,2	4,8
06.10.2020	8,5	9,2	24,9	27,7	11,1	6,8	5,9
08.02.2021	3,3	16,1	39,5	35,4	10,1	6,9	5,2

Относительный спектральный вклад водной взвеси в суммарный показатель ослабления света на озере Красиловское

Дата	$C_{\text{вл}}$, мг/м ³	$\frac{\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}, \%$			$\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$		
		$\lambda = 430 \text{ нм}$	$\lambda = 550 \text{ нм}$	$\lambda = 670 \text{ нм}$	$\lambda = 430 \text{ нм}$	$\lambda = 550 \text{ нм}$	$\lambda = 670 \text{ нм}$
27.02.2014	3,6	71,3	66,0	59,5	8,6	6,0	5,5
15.05.2014	31,2	49,9	71,1	55,9	14,3	10,4	8,6
30.07.2014	31,5	34,1	65,1	30,1	7,2	4,2	3,7
02.10.2014	36,2	11,6	56,8	28,7	6,7	3,8	3,1
18.02.2015	2,3	11,2	13,2	9,1	2,7	1,5	1,1
26.05.2015	32,1	6,3	55,1	16,7	7,0	4,0	3,6
08.10.2015	25,3	30,4	64,9	39,4	6,5	4,3	3,7
25.02.2016	7,7	4,4	39,1	43,2	6,3	4,6	5,0
24.05.2016	10,4	36,4	52,0	40,4	6,5	4,0	3,6
18.07.2016	26,2	25,5	51,3	23,6	9,0	6,0	5,2
05.10.2016	31,8	6,3	33,5	11,3	10,2	7,3	6,1
20.02.2017	5,6	12,1	23,3	15,2	5,8	4,3	3,3
04.05.2017	22,4	5,7	44,8	23,6	7,2	4,7	4,1
23.08.2017	24,6	5,0	11,7	10,0	12,2	6,8	5,0
11.10.2017	21,5	10,4	12,0	10,0	9,6	5,0	4,0
07.05.2018	34,6	16,1	36,5	20,7	20,6	8,0	6,2
02.08.2018	21,4	25,5	23,5	4,4	16,0	9,4	7,1
10.10.2018	26,6	15,6	29,6	16,5	15,1	9,4	7,3
17.05.2019	15,4	13,5	24,6	15,2	12,3	7,1	5,6
15.08.2019	23,5	6,4	12,4	1,9	14,5	9,2	7,2
14.10.2019	19,4	30,9	42,6	25,3	13,1	7,8	5,9
11.08.2020	20,3	44,7	40,9	35,0	17,8	10,1	7,3
06.10.2020	20,3	6,3	28,3	16,3	12,2	7,5	5,9

В эвтрофном озере Лапа в зимний период исследования наибольший вклад взвеси в суммарное ослабление света на трех длинах волн наблюдался в 2018 г. (при $\lambda=670$ нм вклад взвеси доходил до 78,4 %). В весенний период при $\lambda=430$ нм вклад взвеси находился в пределах от 10,1 % до 55,9 %, при $\lambda=550$ нм — от 20,2 % до 71,6 % и при $\lambda=670$ нм — от 15,3 % до 56,5 %. Весенние максимумы вклада взвеси зафиксированы в 2015 г. на двух длинах волн — 430 и 550 нм и в 2014 г. — 670 нм соответственно. В летний период на озере Лапа вклад взвеси в $\varepsilon(\lambda)$ достигал максимума в 2014 г. при $\lambda=670$ нм и составил 66,1 %. Осенью, как и зимой, вклад взвеси также максимально наблюдался на трех длинах волн, но только в 2015 г., достигая 88,5 %, минимальные вклады взвеси пришлось на 2017 г. (1,8–2,4 %). Таким образом, в результате расчетов получено, что влияние взвеси на суммарное ослабление света в воде оз. Лапа максимально приходится в осенне-зимний период.

Для эвтрофно-гиперэвтрофного озера Красиловское максимальные вклады взвеси в $\varepsilon(\lambda)$ (чуть более 70,0 %) наблюдались в 2014 г. зимой и весной — 71,3 % при $\lambda=430$ нм и 71,1 % при $\lambda=550$ нм соответственно. Летний разброс максимального вклада взвеси на трех длинах волн составил 35,0–65,1 %, минимальный — 1,9–11,7 %. Осенью на озере Красиловское в 2015 г. вклад взвеси достигал почти до 65,0 % (при $\lambda=550$ нм). При $\lambda=670$ нм вклад взвеси за исследуемый период наблюдался в пределах от 10,0 % до 39,4 %.

По данным сезонных измерений методом оптической микроскопии размеры частиц (по радиусу) в пробах озер находились преимущественно в пределах 0,5–2,5 мкм. В таблице 3 представлен результат экспериментального определения среднего размера и средней концентрации частиц взвеси с помощью метода оптической микроскопии в поверхностном слое исследуемых водоемов в различные сезоны в период с 2012 по 2021 г.

Размер и концентрация частиц взвеси в поверхностном слое озер

Озеро Лапа					
Дата	\bar{r} , мкм	\bar{n} , $\cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$	Дата	\bar{r} , мкм	\bar{n} , $\cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$
15.02.2012	0,7	5,0	25.01.2016	0,7	2,3
15.03.2012	1,0	1,3	04.05.2016	0,9	1,9
02.05.2012	0,6	4,4	02.08.2016	1,3	2,1
30.07.2012	0,8	1,1	04.10.2016	1,0	1,9
12.10.2012	0,8	1,2	09.02.2017	1,6	1,5
04.02.2013	0,8	1,1	03.05.2017	1,7	2,3
07.05.2013	1,7	0,2	22.08.2017	1,3	2,7
06.08.2013	2,2	0,7	10.10.2017	1,4	2,8
21.10.2013	2,3	2,0	13.02.2018	1,0	2,6
21.01.2014	0,9	9,7	13.08.2019	1,6	4,7
22.05.2014	1,5	2,1	15.10.2019	0,5	14,7
29.08.2015	0,8	2,3	05.02.2020	1,6	11,6
25.11.2015	1,0	0,9	08.02.2021	0,8	4,2
01.12.2015	0,9	1,0			
Озеро Красиловское					
23.05.2012	0,8	1,9	25.02.2016	1,4	2,2
13.08.2012	0,8	3,0	24.05.2016	1,1	2,1
31.10.2012	0,9	1,7	18.07.2016	1,2	1,9
05.02.2013	0,8	0,7	05.10.2016	1,2	2,3
15.05.2013	2,4	1,3	20.02.2017	1,8	2,0
08.08.2013	2,5	1,0	04.05.2017	1,9	1,6
23.10.2013	2,5	1,3	23.08.2017	1,6	2,2
27.02.2014	1,3	8,3	11.10.2017	1,1	1,7
15.05.2014	1,6	9,5	15.08.2019	1,6	6,3
08.10.2015	0,5	2,2	14.10.2019	0,6	7,6
27.11.2015	1,2	1,4			

В результате получено, что средневзвешенный радиус частиц в поверхностном слое оз. Лапа за исследуемый период составил 1,2 мкм, в оз. Красиловское — 1,4 мкм. Среднее значение счетной концентрации частиц взвеси в исследуемых озерах за период наблюдений изменялось в больших пределах от $0,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ до $14,7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и составило порядка $3,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ для оз. Лапа и $3,0 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ для оз. Красиловское.

Выводы

В статье приведены результаты экспериментальных данных по водной взвеси и ее влиянию на суммарное ослабление света, полученные в ходе реализации серии гидрооптических исследований на двух разнотипных озерах Алтайского края в различные сезоны 2012–2021 гг. Представлены данные о количественном составе полидисперсных частиц взвеси и их распределении по размерам, которые находились преимущественно в пределах $0,5 \div 2,5$ мкм. Также получены статистически обеспеченные данные по спектральным вкладам взвеси в показатель ослабления света на трех длинах волн в период исследо-

вания 2014–2021 гг. Полуэмпирическая физическая модель ослабления света позволила получить достоверную информацию по экологическому состоянию исследуемых водных объектов в пространственно-временном аспекте и прогнозу их изменений в условиях антропогенного влияния.

В связи с тем что взвесь является одной из наиболее оптически активных компонент озерной воды, существенно влияющих на суммарное ослабление света, она требовала подробного изучения ее оптических характеристик, а именно количества и размера частиц взвеси, а также ее относительного спектрального вклада в показатель ослабления света в различные сезоны года в поверхностном слое исследуемых водоемов. Вопрос дальнейшего изучения взвеси в озерах, как важного показателя качества воды, приобрел особую важность и актуальность. Поэтому полученные авторами данные по исследованию водной взвеси могут быть полезны при планировании мониторинговых работ на пресноводных озерах для оценки их экологического состояния.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН, а именно: гл. науч. сотр. И.А. Суторихину,

науч. сотр. К.В. Марусину и А.В. Дьяченко, инженеру А.А. Коломейцеву за отбор проб воды на озерах в период исследования 2012–2021 гг.

Библиографический список

1. Лопатин В.Н., Приезжев А.В., Апонасенко А.Д., Шепелевич Н.В., Лопатин В.В., Пожиленкова П.В., Простакова И.В. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред. М., 2004.
2. Reinart A., Paavel B., Pierson D., Strömbeck N. Inherent and apparent optical properties of Lake Peipsi, Estonia // *Boreal Env. Res.* 2004. № 9.
3. Mitchell B.G., Kahru M., Wieland J., Stramska M. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples // *Ocean Optics Protocols for Satellite. Ocean Color Sensor Validation.* 2002. Revision 3. Vol. 2. Chapter 15.
4. Onderka M., Rodný M., Velísková Y. Suspended particulate matter concentrations retrieved from self-calibrated multispectral satellite imagery // *J. Hydrol. Hydromech.* 2011. Vol. 59. № 4. DOI: 10.2478/v10098-011-0021-9.
5. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Shuchman R., Sayers M., Sawtell R., Moiseev A.V. Bio-optical retrieval algorithm for the optically shallow waters of Lake Michigan. I. Model description and sensitivity/robustness assessment // *Transactions of KarRC RAS.* 2017. № 3. DOI: 10.17076/lim473.
6. Shuchman R.A., Leshkevich G., Sayers M.J., Johengen T.H., Brooks C.N., Pozdnyakov D. An algorithm to retrieve chlorophyll, dissolved organic carbon, and suspended minerals from Great Lakes satellite data // *J. Great Lakes Res.* 2013. Vol. 32.
7. Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A., Suslin V.V., Usoltseva M.V., Zakharova Yu.R., Titova L.A., Gnatovsky R.Yu., Blinov V.V. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal // *Limnol. and Freshwat. Biol.* 2018. № 1. DOI:10.31951/2658-3518-2018-A-1-58.
8. Shi L., Mao Z., Wu J., Liu M., Zhang Y., Wang Z. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu // *Water.* 2017. № 9. P. 352. DOI:10.3390/w9050352.
9. Clavano W.R., Boss E., Karp-Boss L. Inherent optical properties of non-spherical Marine-like particles – from theory to observation // *Oceanogr. and Marin. Biol.: An Ann. Rev.* 2007. № 45.
10. 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.
11. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // *Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монины. М., 1983.*
12. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics.* 1997. Vol. 36. № 33.
13. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Applied Optics.* 1981. Vol. 20. № 2.