

Влияние компонентов природной воды на спектральный показатель ослабления света (на примере водоемов Алтайского края)

О.Б. Акулова¹, В.И. Букатый¹, И.А. Суторихин^{1,2*}

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1*

² *Алтайский государственный университет,
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 90*

Поступила в редакцию 18.03.2017 г.

На основе данных натурных исследований, проведенных в период 2014–2016 гг. на водоемах Алтайского края – оз. Лапа, Красиловское и Большое Островное, разработана полуэмпирическая модель для описания спектрального вклада основных компонентов природной воды, включая чистую воду, хлорофилл, желтое вещество, органо-минеральную взвесь, в спектральный показатель ослабления света на трех длинах волн – 430, 550 и 670 нм. Дана оценка прогнозных возможностей разработанной модели интегрального спектрального показателя ослабления света в многокомпонентной водной среде для решения задач комплексного водно-экологического мониторинга и рационального водопользования.

Ключевые слова: озера, показатель ослабления света, природная вода, взвесь, желтое вещество, хлорофилл; lakes, light attenuation coefficient, natural water, suspension, yellow substance, chlorophyll.

Введение

Природная вода по своему происхождению и составу чрезвычайно разнообразна и сложна. Условно ее можно разделить на атмосферную (дождь, туман, снег), поверхностную (реки, озера, пруды, болота и другие водотоки и водоемы), подземную (почвенную, грунтовую, межпластовую, артезианскую, минеральную) и морскую (моря, океаны). Вода всегда содержит различные примеси, характер и количество которых определяют качество воды, т.е. характеризуют возможность ее использования для различных целей в промышленности и в быту. Примеси отличаются не только по химическому составу и концентрации, но и по количественному соотношению между химическими элементами и форме их соединений [1].

Природные поверхностные воды, особенно озера с обитающими в них растениями, рыбами, беспозвоночными животными, микроорганизмами, накопленными донными отложениями с характерными для них изменениями температуры, концентрации растворенного в воде кислорода, состава воды и т.п., с определенной биологической продуктивностью представляют наибольший научно-практический интерес с точки зрения анализа гидрофизических, гидробиологических и гидрохимических характеристик [2–4].

Гидрооптические исследования озер дают возможность совершенствования оперативной оценки, контроля состояния и выработки рекомендаций для их рационального использования в исследуемом регионе. Важным объектом исследований гидрооптических характеристик природных вод Алтайского края являются озера, количество которых по разным литературным данным колеблется от 11 до 13 тыс., из них свыше 230 – площадью более 1 км². Общая площадь озер – 2,5 тыс. км², объем воды в них – более 2,5 тыс. км³. Необходимо отметить, что в гидрооптическом отношении водоемы данной территории практически не изучены.

Цель данной работы состоит в определении спектрального вклада показателей поглощения и рассеяния света основными компонентами озерной воды в интегральный показатель ослабления в поверхностном слое водоемов Алтайского края для решения задач комплексного водно-экологического мониторинга и рационального водопользования.

Объект исследования

Для исследования были выбраны три пресноводных озера Алтайского края: Лапа, Красиловское и Большое Островное. Водоемы отличаются по происхождению и положению в ландшафте, по морфологии, проточности и степени трофности, т.е. являются разнотипными. Лимнологические характеристики озер по состоянию на период 2014–2016 гг. представлены в табл. 1. Более подробно объекты исследования описаны в работе [5].

Ольга Борисовна Акулова (akulova8282@mail.ru); Владимир Иванович Букатый (v.bukaty@mail.ru); Игорь Анатольевич Суторихин (sia@iwer.ru).

Лимнологические характеристики озер

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Прозрачность по диску Секки, см	Спектральный показатель ослабления света, м ⁻¹ ($\lambda = 430$ нм)	Водородный показатель рН	Концентрация общего фосфора, мг/дм ³	Концентрация хлорофилла <i>a</i> , мг/м ³
Лапа	0,76	11,5	—	40–150	3,0–13,6	7,2–8,6	0,022–0,04	0,2–35,4
Красиловское	0,80	6,5	2,7	40–150	2,7–14,3	6,2–8,7	0,056–0,08	2,3–36,2
Большое Островное	28,60	5,6	0,9–1,8	25–45	7,8–31,0	8,5–9,1	0,064–0,15	10,2–54,5

Примечание. «—» — данные отсутствуют.

Материал и методы исследования

Основой для написания работы послужили результаты обработки и анализа 33 проб озерной воды, отобранных в поверхностном слое водоемов при комплексных сезонных и суточных исследованиях трех озер в период 2014–2016 гг. Проведено 194 измерения спектральной прозрачности воды на приборе ПЭ-5400УФ с погрешностью, равной 0,5%, с применением спектрофотометрического метода. Метод основан на измерении отношения двух световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. В качестве последней использовалась дистиллированная вода высокой очистки.

Концентрацию хлорофилла *a* определяли стандартным спектрофотометрическим методом [6, 7] по экстракту пигментов водорослей фитопланктона. Для приготовления экстракта пробу воды пропускают через мембранный фильтр «Владинор» МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм, пигменты хлорофилла экстрагируют водным раствором ацетона и удаляют из экстракта взвесь центрифугированием. Погрешность определения концентрации хлорофилла — не более 10%.

Результаты исследований и их обсуждение

Пользуясь физической моделью поглощения и рассеяния света в природной воде, приведем алгоритм расчета и результаты определения спектрального вклада компонентов озерной воды (взвесь, хлорофилл *a*, желтое вещество, чистая вода) в показатель ослабления света для водоемов Алтайского края. С учетом вклада основных компонентов озерной воды, влияющих на спектральный показатель ослабления света $\epsilon(\lambda)$ спектральной физической модели ослабления света, предложенной О.В. Копелевичем [8], его можно записать следующим образом:

$$\epsilon(\lambda) = \kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda), \quad (1)$$

где $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — показатели поглощения хлорофиллом и желтым веществом; $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ — показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ — показатель рассеяния органоминеральной взвесью; $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой; λ — длина волны света. В выражении (1) традиционно [8] отсутствует показатель поглощения взвесью $\kappa_{\text{вз}}(\lambda)$ ввиду его малости. Максимальная абсолютная погрешность измерений показателя ослабления света

составила около $0,5 \text{ м}^{-1}$. В (1) показатель поглощения хлорофиллом рассчитывался по формуле [8]:

$$\kappa_{\text{хл}}(\lambda) = \kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda) C_{\text{хл}}. \quad (2)$$

Здесь $C_{\text{хл}}$ — концентрация хлорофилла *a*, мг/м³; $\kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda)$ — удельный показатель поглощения хлорофиллом, м²/мг (его значения приведены в работе [8]). Для расчетов $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ используются табличные данные [9, 10], а для $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ — данные из работы [8].

Так как $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ являются известными из литературных данных оптическими параметрами для различных природных вод, то изменчивость $\epsilon(\lambda)$ в условиях эксперимента определяется изменчивостью концентрации *хлорофилла*, а также составом *желтого вещества* и водной *взвеси*, что проявляется по-разному в зависимости от длины волны падающего света.

Используемая нами полуэмпирическая физическая модель спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$ дает возможность выявить механизм формирования рассеивающих и поглощающих свойств озерной воды в оптическом диапазоне и оценить для реальных ситуаций различные характеристики этих свойств, для которых отсутствуют экспериментальные данные или их недостаточно. Разработанная модель позволяет оценить глубину фотического слоя, в котором интенсивно происходит процесс фотосинтеза, концентрацию хлорофилла как одного из основных показателей трофности водоемов, водной взвеси, обеспечивающей формирование комплекса донных отложений, процессов массо- и теплообмена, содержания желтого вещества и т.д.

В отличие от работы [8], где параметр $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ считался известным из данных спектральных измерений показателя рассеяния частицами водной взвеси, а параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определялся разностью между $\epsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, в данной работе предлагается модифицированный метод. Так как в нашем эксперименте определялся параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ путем пропускания проб воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0,22 мкм и дальнейшего спектрофотометрирования, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ находим из выражения (1) по формуле

$$\sigma_{\text{вз}}(\lambda) = \epsilon(\lambda) - [\kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda)]. \quad (3)$$

Таким образом, все параметры в выражении (1) определены, что позволяет рассчитать спектральный вклад всех компонентов озерной воды в $\epsilon(\lambda)$.

В табл. 2–4 приведены результаты расчетов спектрального вклада отдельных компонентов озерной воды в интегральный показатель ослабления света для поверхностного слоя трех разнотипных водоемов Алтайского края в различные сезоны 2014–2016 гг. Значения $\varepsilon(\lambda)$ указаны при натуральном основании логарифма. Выбранные длины волн 430 и 670 нм характеризуются максимальным поглощением света хлорофиллом *a* в данном спектральном диапазоне, а длина волны 550 нм соответствует центру спектрального интервала 400–700 нм, на который приходится подавляющая часть энергии солнечного излучения.

Таким образом, на основании проведенных исследований получены следующие результаты.

Наибольший вклад взвеси в общее ослабление при $\lambda = 430$ нм приходится на гиперэвтрофное оз. Большое Островное весной – 80,5% (2015 г.), 79,3% (2014 г.) и летом – 72,3% (2014 г.); на

оз. Красиловское зимой (71,2%). При $\lambda = 550$ нм вклад взвеси летом 2014 г. на оз. Большое Островное достигает 90,4%, весной – 92,0%, а на оз. Лапа – 69,6% весной и 66,0% летом. При $\lambda = 670$ нм максимальные значения вклада взвеси в весенне-летний период 2014 г. приходятся также на оз. Большое Островное – 83,9 и 79,1% соответственно.

Желтое вещество дает максимальный вклад в показатель ослабления света (при $\lambda = 430$ нм) зимой 2016 г. на оз. Лапа (93,3%), оз. Красиловское (85,7%); летом 2016 г. на оз. Лапа (74,6%), оз. Большое Островное (79,2%); зимой в 2015 г. на оз. Красиловское (81,9%), оз. Большое Островное (55,1%). На оз. Лапа весной и осенью 2014 г. вклад желтого вещества достигает 59%, а для оз. Большое Островное – 11,5 и 19,5% соответственно. При $\lambda = 550$ нм вклад желтого вещества на оз. Красиловское наблюдался в пределах от 26,4 до 82,1% за исследуемый

Таблица 2

Относительный спектральный вклад (%) компонентов озерной воды в показатель ослабления света на оз. Лапа

Дата	$C_{\text{хл.}}$, мг/м ³	Показатель поглощения			Показатель рассеяния		Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
		$\frac{\kappa_{\text{чв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{жв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{хл}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
$\lambda = 430$ нм							
21.01.14 г.	0,6	0,1	36,5	0,9	62,4	0,1	4,8
22.05.14 г.	5,9	0,1	59,0	12,8	28,0	0,1	3,7
31.07.14 г.	17,9	0,1	42,7	16,1	41,0	0,1	9,9
14.10.14 г.	13,5	0,1	59,5	15,3	25,0	0,1	7,1
25.02.15 г.	0,2	0,1	47,0	0,5	52,3	0,1	3,4
05.05.15 г.	14,3	0,1	36,0	8,0	55,8	0,1	13,6
25.11.15 г.	35,4	0,1	26,2	35,4	38,2	0,1	8,0
25.01.16 г.	1,1	0,1	93,3	3,0	3,5	0,1	3,0
04.05.16 г.	14,1	0,1	55,0	18,8	26,0	0,1	6,0
02.08.16 г.	6,3	0,1	74,6	7,5	17,7	0,1	6,7
04.10.16 г.	33,8	0,1	58,1	37,5	4,2	0,1	7,2
$\lambda = 550$ нм							
22.05.14 г.	5,9	2,0	27,0	1,3	69,6	0,1	3,0
31.07.14 г.	17,9	1,0	30,9	2,0	66,0	0,1	6,0
14.10.14 г.	13,5	1,0	45,6	2,0	51,3	0,1	4,2
25.02.15 г.	0,2	0,2	28,0	0,1	69,8	0,1	2,8
05.05.15 г.	14,3	0,7	26,6	1,1	71,5	0,1	7,8
25.11.15 г.	35,4	0,6	8,5	2,4	88,4	0,1	9,4
25.01.16 г.	1,1	2,8	55,0	0,3	41,8	0,1	2,0
04.05.16 г.	14,1	1,3	37,2	2,1	59,3	0,1	4,3
02.08.16 г.	6,3	1,4	75,0	1,0	22,5	0,1	4,0
04.10.16 г.	33,8	1,1	48,0	4,3	46,5	0,1	5,0
$\lambda = 670$ нм							
22.05.14 г.	5,9	16,0	18,8	8,7	56,4	0,1	2,7
31.07.14 г.	17,9	10,0	35,5	16,4	38,0	0,1	4,3
14.10.14 г.	13,5	12,2	51,2	15,2	21,3	0,1	3,5
25.02.15 г.	0,2	17,0	16,0	0,3	66,6	0,1	2,5
05.05.15 г.	14,3	8,0	25,9	10,5	55,5	0,1	5,4
25.11.15 г.	35,4	3,6	2,5	11,7	82,1	0,1	12,1
25.01.16 г.	1,1	27,1	50,0	2,7	20,1	0,1	1,6
04.05.16 г.	14,1	9,6	28,8	12,5	49,0	0,1	4,5
02.08.16 г.	6,3	13,6	68,7	7,8	9,8	0,1	3,2
04.10.16 г.	33,8	13,2	54,4	26,2	6,0	0,1	3,3

Относительный спектральный вклад (%) компонентов озерной воды в показатель ослабления света на оз. Красиловское

Дата	$C_{хл.}$, мг/м ³	Показатель поглощения			Показатель рассеяния		Показатель ослабления света $\epsilon(\lambda)$, м ⁻¹
		$\frac{\kappa_{фв}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{жв}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{хл}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{вз}(\lambda) + \sigma_{мол}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{мол}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	
$\lambda = 430$ нм							
27.02.14 г.	3,6	0,1	25,3	3,3	71,2	0,1	8,6
15.05.14 г.	31,2	0,1	32,6	17,4	49,8	0,1	14,3
30.07.14 г.	31,5	0,1	30,7	35,1	34,0	0,1	7,2
02.10.14 г.	36,2	0,1	45,0	43,3	11,5	0,1	6,7
18.02.15 г.	2,3	0,1	81,9	6,8	11,1	0,1	2,7
26.05.15 г.	32,1	0,1	57,1	36,5	6,2	0,1	7,0
08.10.15 г.	25,3	0,1	38,4	31,1	30,3	0,1	6,5
25.02.16 г.	7,7	0,1	85,7	9,8	4,3	0,1	6,3
24.05.16 г.	10,4	0,1	50,7	12,8	36,3	0,1	6,5
18.07.16 г.	26,2	0,1	51,1	23,3	25,4	0,1	9,0
05.10.16 г.	31,8	0,1	68,6	25,0	6,2	0,1	10,2
$\lambda = 550$ нм							
27.02.14 г.	3,6	0,9	32,7	0,4	65,9	0,1	6,0
15.05.14 г.	31,2	0,5	26,4	2,0	71,0	0,1	10,4
30.07.14 г.	31,5	1,0	29,0	4,9	65,0	0,1	4,2
02.10.14 г.	36,2	1,5	35,6	6,1	56,7	0,1	3,8
18.02.15 г.	2,3	3,7	82,1	1,0	13,1	0,1	1,5
26.05.15 г.	32,1	1,4	43,0	0,5	55,0	0,1	4,0
08.10.15 г.	25,3	1,3	30,0	3,8	64,8	0,1	4,3
25.02.16 г.	7,7	1,2	58,7	1,0	39,0	0,1	4,6
24.05.16 г.	10,4	1,4	45,0	1,6	51,9	0,1	4,0
18.07.16 г.	26,2	0,9	45,0	2,8	51,2	0,1	6,0
05.10.16 г.	31,8	0,7	63,0	2,8	33,4	0,1	7,3
$\lambda = 670$ нм							
27.02.14 г.	3,6	7,9	30,0	2,6	59,4	0,1	5,5
15.05.14 г.	31,2	5,0	24,6	14,5	55,8	0,1	8,6
30.07.14 г.	31,5	11,4	24,5	34,0	30,0	0,1	3,7
02.10.14 г.	36,2	13,0	43,0	15,3	28,6	0,1	3,1
18.02.15 г.	2,3	29,5	43,1	8,3	9,0	0,1	1,1
26.05.15 г.	32,1	12,0	36,1	35,2	16,6	0,1	3,6
08.10.15 г.	25,3	11,7	21,6	27,3	39,3	0,1	3,7
25.02.16 г.	7,7	8,7	42,0	6,1	43,1	0,1	5,0
24.05.16 г.	10,4	12,0	36,1	11,5	40,3	0,1	3,6
18.07.16 г.	26,2	8,3	48,0	20,1	23,5	0,1	5,2
05.10.16 г.	31,8	7,1	60,6	21,0	11,2	0,1	6,1

период, на оз. Лапа достигал 37,2% весной, 75,0% летом, 48,0% осенью и 55,0% зимой. Для оз. Большое Островное произошло резкое увеличение значений к зиме 2016 г. (17,7%) от весенне-летнего периода (6,7 и 7,6% соответственно), с заметным повышением осенью 2014 г. – 20,9% и летом 2016 г. – 25,2%. При $\lambda = 670$ нм максимальные значения вклада желтого вещества зафиксированы только на оз. Лапа летом 2016 г. (50,0%) и осенью на оз. Большое Островное (60,6%).

Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм во всех водах и составляет не более 0,1%; ее вклад резко увеличивается в длинноволновой области (при $\lambda = 670$ нм) и дости-

гает 27,1% для оз. Лапа, 29,5% для оз. Красиловское и 8,5% для оз. Большое Островное.

Вклад хлорофилла в ослабление света при $\lambda = 430$ нм максимален зимой только для оз. Большое Островное (10,2% в 2014 г. и 10,4% в 2015 г.), что почти на порядок выше, чем на оз. Лапа (0,9% в 2014 г. и 0,5% в 2015 г.); для оз. Красиловское вклад хлорофилла составляет 3,3% в 2014 г. и 6,8% в 2015 г. Летом происходит значительное увеличение вклада хлорофилла для всех озер на всех длинах волн. Наибольшее значение осенью 2014 г. зафиксировано для оз. Красиловское – 43,3%, в то время как на оз. Лапа и Большое Островное оно составило 15,3 и 14,0% соответственно.

Относительный спектральный вклад (%) компонентов озерной воды в показатель ослабления света на оз. Большое Островное

Дата	$C_{\text{хл}}$, мг/м ³	Показатель поглощения			Показатель рассеяния		Показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$, м ⁻¹
		$\frac{\kappa_{\text{чв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{жв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{хл}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{мол}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
$\lambda = 430$ нм							
26.02.14 г.	16,3	0,1	35,3	10,2	54,3	0,1	12,6
23.05.14 г.	35,2	0,1	11,5	9,0	79,3	0,1	31,0
22.08.14 г.	49,8	0,1	12,4	15,1	72,3	0,1	26,2
07.10.14 г.	40,7	0,1	19,5	14,0	66,3	0,1	23,2
19.02.15 г.	10,2	0,1	55,1	10,4	34,3	0,1	7,8
27.05.15 г.	27,6	0,1	7,4	11,9	80,5	0,1	18,5
09.10.15 г.	54,5	0,1	21,1	14,4	64,3	0,1	30,2
17.02.16 г.	10,8	0,1	37,8	6,5	55,5	0,1	13,2
27.05.16 г.	18,0	0,1	26,8	9,0	64,0	0,1	16,0
04.08.16 г.	11,1	0,1	79,2	4,1	16,5	0,1	21,3
14.10.16 г.	43,8	0,1	23,0	18,3	58,5	0,1	19,1
$\lambda = 550$ нм							
26.02.14 г.	16,3	0,6	27,5	1,2	70,6	0,1	8,8
23.05.14 г.	35,2	0,2	6,7	1,0	92,0	0,1	23,3
22.08.14 г.	49,8	0,3	7,6	1,6	90,4	0,1	20,0
07.10.14 г.	40,7	0,3	20,9	1,4	77,3	0,1	18,4
19.02.15 г.	10,2	1,0	43,1	1,2	54,6	0,1	5,2
27.05.15 г.	27,6	0,4	7,6	0,1	91,8	0,1	12,3
09.10.15 г.	54,5	0,2	16,4	1,6	81,7	0,1	22,5
17.02.16 г.	10,8	0,5	17,7	0,7	81,0	0,1	9,6
27.05.16 г.	18,0	0,5	18,3	1,0	80,1	0,1	10,9
04.08.16 г.	11,1	0,4	25,2	0,5	73,8	0,1	14,7
14.10.16 г.	43,8	0,4	12,4	2,1	85,0	0,1	13,7
$\lambda = 670$ нм							
26.02.14 г.	16,3	5,8	27,7	8,8	57,6	0,1	7,4
23.05.14 г.	35,2	2,3	6,1	7,6	83,9	0,1	18,4
22.08.14 г.	49,8	2,7	5,8	12,3	79,1	0,1	16,2
07.10.14 г.	40,7	2,7	17,6	10,2	69,4	0,1	16,0
19.02.15 г.	10,2	8,5	27,3	8,0	56,1	0,1	5,1
27.05.15 г.	27,6	4,2	7,4	10,7	77,6	0,1	10,3
09.10.15 г.	54,5	2,3	16,1	11,7	69,8	0,1	18,6
17.02.16 г.	10,8	4,7	13,1	4,7	77,4	0,1	9,1
27.05.16 г.	18,0	5,0	16,2	8,3	70,4	0,1	8,6
04.08.16 г.	11,1	3,4	22,2	3,5	70,8	0,1	12,6
14.10.16 г.	43,8	3,6	9,1	14,6	72,6	0,1	12,0

Молекулярное рассеяние света чистой водой вносит незначимый вклад – 0,1% для всех водоемов.

Заключение

Получены статистически обеспеченные экспериментальные данные по спектральным вкладам компонентов природной воды в интегральный показатель ослабления света для трех разнотипных озер и различных сезонов 2014–2016 гг. Разработанная полуэмпирическая физическая модель позволяет получить достоверную гидрооптическую оценку состояния экосистем в пространственно-временном аспекте и прогноз их изменений в условиях антропогенного влияния. Результаты работы могут быть использованы при междисциплинарных лимнологи-

ческих исследованиях, прежде всего интерпретации данных по гидрооптике, гидробиологии и гидрохимии, прогнозе распространения антропогенных загрязнений в водоемах разного типа. Результаты исследования целесообразно использовать при планировании экологического мониторинга состояния пресноводных озер.

Авторы глубоко признательны за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла *a* сотрудникам ИВЭП СО РАН канд. биол. наук А.В. Котовщикову (данные 2014 г.) и И.М. Фроленкову (данные 2015–2016 гг.).

1. Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник. Изд. 3-е, доп. Ростов н/Д.: НОК, 2008. 461 с.

2. Богословский Б.Б. Озероведение. М.: Изд-во МГУ, 1960. 335 с.
3. Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 592 с.
4. Ершова М.Г., Заславская М.Б., Даценко Ю.С., Эдельштейн К.К. Практикум по гидроэкологии озер и водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 2004. 104 с.
5. Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф., Акулова О.Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.
6. ГОСТ 17.1.4.02-90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.
7. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 320 с.
8. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1983. С. 208–234.
9. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 33. P. 8710–8723.
10. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.

O.V. Akulova, V.I. Bukaty, I.A. Sutorikhin. The effect of natural water components on spectral light attenuation (water bodies of Altai Krai as a case study).

A semi-empirical model for the description of spectral contribution of main components of natural water, including pure water, chlorophyll, yellow substance, and organo-mineral suspension into spectral light attenuation at three wavelengths of 430, 550, and 670 nm is developed based on the data from field studies conducted at Altai Krai waterbodies, i.e., Lapa, Krasilovskoye, and Bolshoye Ostrovnoye lakes, in 2014–2016. The predictive capabilities of the developed model of integral spectral light attenuation in the multicomponent aqueous medium for solving problems of complex water and environmental monitoring and rational water management are estimated.