

Анализ влияния взвеси на прозрачность воды в пресноводных озерах Алтайского края

И.А. Суторихин^{1,2}, В.И. Букатый¹, О.Б. Акулова¹, М.Е. Литвих¹, К.Ю. Эккердт²

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

² Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Analysis of Suspension Effect on Water Transparency in Freshwater Lakes of Altai Krai

I.A. Sutorikhin^{1,2}, V.I. Bukaty¹, O.B. Akulova¹, M.E. Litvih¹, K.U. Ekkerdt²

¹ Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (Barnaul, Russia)

² Altai State University (Barnaul, Russia)

Описан анализ влияния взвеси на прозрачность воды в пресноводных озерах Алтайского края в период 2014–2015 гг. Приведены данные о количественном составе полидисперсных частиц взвеси и их распределении по размерам, а также определен спектральный вклад компонентов озерной воды в показатель ослабления света. Наибольший вклад взвеси в суммарный показатель ослабления ϵ при $\lambda = 430$ нм (зимой) приходится на оз. Красиловское, где он составляет более 70%, и на оз. Большое Островное (весной) — 80,5%. Желтое вещество дает максимальный вклад в показатель ослабления ϵ (зимой) на оз. Красиловское и при $\lambda = 430$ нм составляет 81,9%. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света (при $\lambda = 430$ нм) во всех водах и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в длинноволновой области (17% — оз. Лапа, 29,5% — оз. Красиловское при $\lambda = 670$ нм). Вклад хлорофилла в ϵ максимален зимой только для озера Большое Островное (10,4%) и на порядок выше, чем на оз. Лапа (0,5%), а весной и летом для оз. Красиловское — 36,5 и 35,1% соответственно, при $\lambda = 430$ нм. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет менее 0,1%.

Исследования оптических свойств поверхностного слоя озер показали, что наибольшие значения показателя ослабления света наблюдаются на оз. Большое Островное по сравнению с двумя другими озерами. Это обусловлено, прежде всего, высоким содержанием взвеси и желтого вещества, а также колебаниями температуры воды и, как следствие, изменением концентрации хлорофилла в фитопланктоне озер.

Ключевые слова: озера, показатель ослабления света, чистая вода, взвесь, желтое вещество, хлорофилл.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-11

The paper is devoted to the analysis of suspended solids influence on water transparency in freshwater lakes of Altai Krai during 2014–2015. The data on the quantitative composition of polydisperse suspension particles and the size distribution are presented, and the spectral contribution of lake water components to the light attenuation coefficient is estimated. The greatest contribution of suspension to the total attenuation coefficient ϵ at $\lambda = 430$ nm (winter) was found in Lake Krasilovskoye (more than 70%) and in Lake Bol'shoje Ostrovnoye (80.5%) in springtime. Yellow substance makes the largest contribution to the attenuation coefficient ϵ (in winter) in Lake Krasilovskoye; at $\lambda = 430$ nm it makes up 81.9%. Clean water makes a negligible contribution to the light attenuation ($\lambda = 430$ nm) in all waters and does not exceed 0.1%, increasing sharply in the long-wave region (17% in Lake Lapa, and 29.5% in Lake Krasilovskoye at $\lambda = 670$ nm). Maximum contribution of chlorophyll to ϵ is observed in winter only in Lake Bol'shoje Ostrovnoye (10.4%); that is by an order greater than in Lake Lapa (0.5%). In spring and summer periods it is the largest in Lake Krasilovskoye — 36.5% and 35.1%, respectively, at $\lambda = 430$ nm. Molecular light scattering by clean water in the spectral range under study does not contribute significantly and is less than 0.1%.

The study of optical properties of the surface layer of the lakes shows the highest light attenuation in Lake Bol'shoje Ostrovnoye as compared to the other lakes. This is due primarily to a high content of suspension and yellow substance, and water temperature fluctuations, and consequently, the change of chlorophyll concentration in phytoplankton of lakes.

Key words: lakes, light attenuation coefficient, clean water, suspension, yellow substance, chlorophyll.

В настоящее время на фоне интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы возрастает научный интерес к их состоянию, охране и рациональному использованию. Для оценки такого воздействия служит экологический мониторинг, который базируется на постоянном контроле за основными гидрофизическими, гидрохимическими и гидробиологическими параметрами экосистем озер.

Широкоприменяемым показателем в гидрофизике является прозрачность воды, что является важным параметром, характеризующим оптические свойства вод и несущим информацию об их качестве и биопродуктивности. Прозрачность однозначно связана с другими основными первичными гидрооптическими характеристиками — показателями ослабления, рассеяния и поглощения света, которые зависят от параметров взвеси и растворенного органико-минерального вещества.

Как показано в работах отечественных и зарубежных авторов [1, с. 7269; 2, с. 3178; 3, с. 734; 4, с. 18; 5, с. 798], прозрачность природных вод существенно зависит от концентрации и размеров частиц взвеси, поэтому изучение микрофизических характеристик гидрозолей является актуальной задачей. Необходимо отметить, что в научной литературе приведены результаты многочисленных исследований прозрачности воды и ее взаимосвязи со взвесью в океанах, морях и крупных озерах, в то время как для средних и малых водоемов они практически отсутствуют.

Целью данной работы является исследование концентрации и размерного состава частиц взвеси в пресноводных озерах Алтайского края и оценка их влияния на прозрачность.

Для определения коэффициента пропускания (прозрачности) воды использовался спектрофотометрический метод, в основу которого положен принцип измерения отношения двух световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. Спектральные измерения проводились с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ.

Величина показателя ослабления света воды является суммой показателей поглощения и рассеяния света чистой водой и содержащимися в ней взвешенными и растворенными веществами — хлорофиллом, растворенными органическими (желтое вещество) и неорганическими соединениями, минеральной и органической взвесью [6, с. 119]. В общем случае взвесь включает в себя частицы разнообразного происхождения размером от 0,5 мкм до 1 мм, находящиеся во взвешенном состоянии в воде. Взвесь, содержащаяся в озерной воде, необычайно разнообразна по своему составу и происхождению — это терригенные частицы (продукты размыва горных пород суши), биогенные частицы (фитопланктон, фрагменты тел и экскременты пресноводных организмов), вулканогенные частицы (обломочный материал вулканических извержений), хемогенные частицы (продукты

химических реакций), космогенные частицы (космическая пыль), газовые пузырьки [7, с. 41]. Основными объектами исследований были выбраны три разнотипных водоема: пойменное оз. Лапа, надпойменное оз. Красиловское и эрозионное оз. Большое Островное. Разнотипность озер обусловлена гидрологическими особенностями экосистем, литологией пород, составом вод питающего бассейна, трофностью и различной степенью антропогенной нагрузки.

Как будет показано ниже, во всех водоемах основной максимальной вклад в показатель ослабления света вносит взвесь, в связи с чем были проведены исследования концентрации и размерного состава частиц в указанных озерах в различные сезоны в период 2011–2015 гг. Отбор проб объемом 1,5 л осуществлялся батометром с различных глубин озер с интервалом 0,5–1 м. Концентрация и размеры частиц взвеси определялись с помощью счетной камеры Нахотта объемом 0,05 мл с использованием светового микроскопа Nikon Eclipse 80i.

В ходе исследований было обработано 178 микрофотографий по 34 пробам с общим количеством частиц 19879 штук, что обеспечивает хорошую статистику и свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов. Характерной чертой в распределении частиц по размерам является увеличение их счетной концентрации с уменьшением радиуса. Распределение частиц по размерам может быть описано функцией типа Юнге

$$N = A \times r^{-\gamma}, \quad (1)$$

где A — нормировочный множитель, N — концентрация частиц, γ — константа, которая по данным разных исследователей для океанов и морей варьирует от 0,7 до 6. Для примера на рисунке представлены результаты измерений распределения частиц в поверхностном слое оз. Большое Островное. Аппроксимационная кривая построена в соответствии с формулой типа Юнге. Здесь $N(r)$ — относительное содержание частиц с радиусом r в единице объема, находящихся в интервале $[r, r \pm \Delta r]$.

Размер частиц находился преимущественно в интервале от 0,6 до 10,5 мкм по радиусу. При этом коэффициент корреляции находился в диапазоне от 0,77 до 0,99, что говорит об удовлетворительной аппроксимации. В результате получено, что средневзвешенный радиус частиц за исследуемый период для оз. Лапа составил 1,2 мкм, для озера Красиловское и Большое Островное — 1,5 мкм. Среднее значение счетной концентрации частиц взвеси в исследуемых озерах за период наблюдений изменялось в пределах от $0,22 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ до $9 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ и составило для оз. Лапа $2,6 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, для оз. Красиловское — $3,2 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ и оз. Большое Островное — $3,9 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$. Сравнивая значения концентраций частиц взвеси в поверхностном и придонном слоях оз. Большое Островное, мож-

но отметить, что концентрация в придонном слое на 57% больше, чем в поверхностном. Это может быть связано с массовым развитием фитопланктона, отмиранием и осадением клеток водорослей, что приводит их к большому количеству на дне водоема.

Как известно, показатель ослабления света водой $\varepsilon(\lambda)$ является физической величиной, обратной расстоянию, на котором параллельный пучок излучения ослабляется в 10 (или в e) раз в результате совместного действия поглощения и рассеяния света в водной среде. В этом случае его можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon(\lambda) = \sigma(\lambda) + \kappa(\lambda), \quad (2)$$

где $\sigma(\lambda)$ — показатель рассеяния, $\kappa(\lambda)$ — показатель поглощения, λ — длина волны света.

С учетом основных компонентов озерной воды, влияющих на $\varepsilon(\lambda)$, его можно представить, используя спектральную физическую модель ослабления света [8, с. 165], следующим образом:

$$\varepsilon(\lambda) = \kappa_{\text{хл}}(\lambda) + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda), \quad (3)$$

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 мелкой и крупной фракциями взвеси; $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой. В формуле (2) показатель поглощения взвесью не учитывается, так как он значительно меньше, чем $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$. Для расчетов $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$ используются табличные дан-

ные [9, с. 8712]. Показатель поглощения хлорофиллом определялся по формуле

$$\kappa_{\text{хл}} = \kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda) \times C_{\text{хл}}. \quad (4)$$

Здесь $\kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda)$ — удельный показатель поглощения хлорофиллом, его значения приведены в работе [9, с. 165]. $C_{\text{хл}}$ — концентрация хлорофилла «а» ($\text{мг}/\text{м}^3$), которая экспериментально определялась по ГОСТу 17.1.4.02–90. Погрешность измерения хлорофилла в нашем случае составила не более 10%. Спектральный показатель поглощения желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определялся в диапазоне 400–800 нм с использованием фильтра с диаметром пор 0,22 мкм. Погрешность измерения коэффициента пропускания составляет 0,5%. Спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ можно найти из выражения (3) с использованием модифицированного подхода, предложенного в работе [6, с. 135]:

$$\sigma_{\text{вз}}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [\kappa_{\text{уд.хл}}(\lambda) \times C_{\text{хл}} + \kappa_{\text{жв}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda) + \kappa_{\text{чв}}(\lambda)]. \quad (5)$$

В таблицах 1–3 приведены результаты расчетов спектрального вклада компонентов озерной воды в поверхностном слое озер в различные сезоны 2014–2015 гг. Здесь значения $\varepsilon(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ указаны при натуральном основании логарифма. Используемые длины волн 430 и 670 нм характеризуются максимальным поглощением хлорофиллом «а» в данном спектральном диапазоне, а длина волны 550 нм соответствует области высокой прозрачности исследуемой озерной воды.

Таблица 1

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света ε в поверхностном слое оз. Лапа

Дата	$C_{\text{хл}}, \text{мг}/\text{м}^3$	Поглощение			Рассеяние		Показатель ослабления света, $\text{м}^{-1} [\varepsilon(\lambda)]$
		чистая вода $[\kappa_{\text{чв}}(\lambda)]$	желтое вещество $[\kappa_{\text{жв}}(\lambda)]$	хлорофилл $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$	взесь + молекулярное рассеяние $[\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)]$	молекулярное рассеяние $[\sigma_{\text{мол}}(\lambda)]$	
(при $(\lambda) = 430 \text{ нм}$)							
21.01.2014	0,6	0,1	36,5	0,9	62,4	0,1	4,8
22.05.2014	5,9	0,1	59,0	12,8	28,0	0,1	3,7
31.07.2014	17,9	0,1	42,7	16,1	41,0	0,1	9,9
14.10.2014	13,5	0,1	59,5	15,3	25,0	0,1	7,1
25.02.2015	0,2	0,1	47,0	0,5	52,3	0,1	3,4
05.05.2015	14,3	0,1	36,0	8,0	55,8	0,1	13,6
(при $(\lambda) = 550 \text{ нм}$)							
22.05.2014	5,9	2,0	27,0	1,3	69,6	0,1	3,0
31.07.2014	17,9	1,0	30,9	2,0	66,0	0,1	6,0
14.10.2014	13,5	1,0	45,6	2,0	51,3	0,1	4,2

Дата	C _{хл} , мг/м ³	Поглощение			Рассеяние		Показатель ослабления света, м ⁻¹ [ε(λ)]
		чистая вода [κ _{чв} (λ)]	желтое вещество [κ _{жв} (λ)]	хлорофилл κ _{хл} (λ)	взвесь + молекулярное рассеяние [σ _{вз} (λ) + σ _{мол} (λ)]	молекулярное рассеяние [σ _{мол} (λ)]	
25.02.2015	0,2	0,2	28,0	0,1	69,8	0,1	2,8
05.05.2015	14,3	0,7	26,6	1,1	71,5	0,1	7,8
(при (λ) = 670 нм)							
22.05.2014	5,9	16,0	18,8	8,7	56,4	0,1	2,7
31.07.2014	17,9	10,0	35,5	16,4	38,0	0,1	4,3
14.10.2014	13,5	12,2	51,2	15,2	21,3	0,1	3,5
25.02.2015	0,2	17,0	16,0	0,3	66,6	0,1	2,5
05.05.2015	14,3	8,0	25,9	10,5	55,5	0,1	5,4

Таблица 2

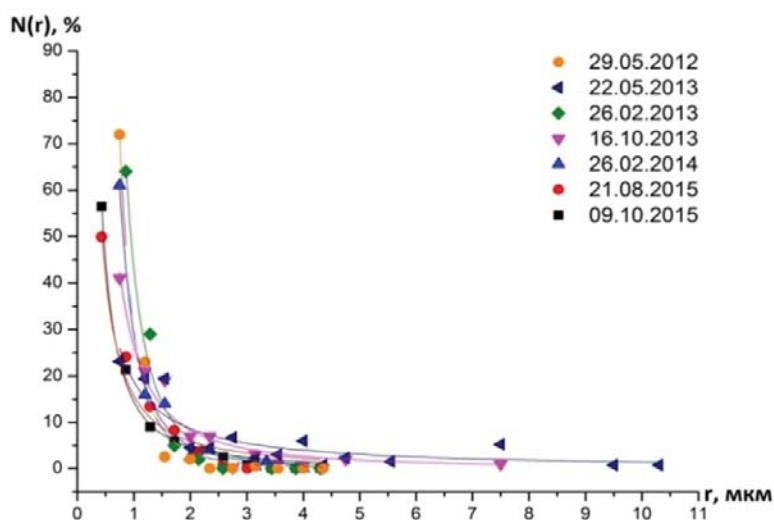
Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света ε в поверхностном слое оз. Красиловское

Дата	C _{хл} , мг/м ³	Поглощение			Рассеяние		Показатель ослабления света, м ⁻¹ [ε(λ)]
		чистая вода [κ _{чв} (λ)]	желтое вещество [κ _{жв} (λ)]	хлорофилл κ _{хл} (λ)	взвесь + молекулярное рассеяние [σ _{вз} (λ) + σ _{мол} (λ)]	молекулярное рассеяние [σ _{мол} (λ)]	
(при (λ) = 430 нм)							
27.02.2014	3,62	0,1	25,3	3,3	71,2	0,1	8,6
15.05.2014	31,2	0,1	32,6	17,4	49,8	0,1	14,3
30.07.2014	31,5	0,1	30,7	35,1	34,0	0,1	7,2
02.10.2014	36,2	0,1	45,0	43,3	11,5	0,1	6,7
18.02.2015	2,3	0,1	81,9	6,8	11,1	0,1	2,7
26.05.2015	32,1	0,1	57,1	36,5	6,2	0,1	7,0
08.10.2015	25,3	0,1	38,4	31,1	30,3	0,1	6,5
(при (λ) = 550 нм)							
27.02.2014	3,6	0,9	32,7	0,4	65,9	0,1	6,0
15.05.2014	31,2	0,5	26,4	2,0	71,0	0,1	10,4
30.07.2014	31,5	1,0	29,0	4,9	65,0	0,1	4,2
02.10.2014	36,2	1,5	35,6	6,1	56,7	0,1	3,8
18.02.2015	2,3	3,7	82,1	1,0	13,1	0,1	1,5
26.05.2015	32,1	1,4	43,0	0,5	55,0	0,1	4,0
08.10.2015	25,3	1,3	30,0	3,8	64,8	0,1	4,3
(при (λ) = 670 нм)							
27.02.2014	3,6	7,9	30,0	2,6	59,4	0,1	5,5
15.05.2014	31,2	5,0	24,6	14,5	55,8	0,1	8,6
30.07.2014	31,5	11,4	24,5	34,0	30,0	0,1	3,7
02.10.2014	36,2	13,0	43,0	15,3	28,6	0,1	3,1
18.02.2015	2,3	29,5	43,1	8,3	9,0	0,1	1,1
26.05.2015	32,1	12,0	36,1	35,2	16,6	0,1	3,6

Таблица 3

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света ϵ в поверхностном слое оз. Большое Островное

Дата	$C_{\text{хл}}, \text{мг/м}^3$	Поглощение			Рассеяние		Показатель ослабления света, $\text{м}^{-1} [\epsilon(\lambda)]$
		чистая вода $[\kappa_{\text{чв}}(\lambda)]$	желтое вещество $[\kappa_{\text{жв}}(\lambda)]$	хлорофилл $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$	взвесь + молекулярное рассеяние $[\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{мол}}(\lambda)]$	молекулярное рассеяние $[\sigma_{\text{мол}}(\lambda)]$	
(при $(\lambda) = 430 \text{ нм}$)							
26.02.2014	16,3	0,1	35,3	10,2	54,3	0,1	12,6
23.05.2014	35,2	0,1	11,5	9,0	79,3	0,1	31,0
22.08.2014	49,8	0,1	12,4	15,1	72,3	0,1	26,2
07.10.2014	40,7	0,1	19,5	14,0	66,3	0,1	23,2
19.02.2015	10,2	0,1	55,1	10,4	34,3	0,1	7,8
27.05.2015	27,6	0,1	7,4	11,9	80,5	0,1	18,5
09.10.2015	54,5	0,1	21,1	14,4	64,3	0,1	30,2
(при $(\lambda) = 550 \text{ нм}$)							
26.02.2014	16,3	0,6	27,5	1,2	70,6	0,1	8,8
23.05.2014	35,2	0,2	6,7	1,0	92,0	0,1	23,3
22.08.2014	49,8	0,3	7,6	1,6	90,4	0,1	20,0
07.10.2014	40,7	0,3	20,9	1,4	77,3	0,1	18,4
19.02.2015	10,2	1,0	43,1	1,2	54,6	0,1	5,2
27.05.2015	27,6	0,4	7,6	0,1	91,8	0,1	12,3
09.10.2015	54,5	0,2	16,4	1,6	81,7	0,1	22,5
(при $(\lambda) = 670 \text{ нм}$)							
26.02.2014	16,3	5,8	27,7	8,8	57,6	0,1	7,4
23.05.2014	35,2	2,3	6,1	7,6	83,9	0,1	18,4
22.08.2014	49,8	2,7	5,8	12,3	79,1	0,1	16,2
07.10.2014	40,7	2,7	17,6	10,2	69,4	0,1	16,0
19.02.2015	10,2	8,5	27,3	8,0	56,1	0,1	5,1
27.05.2015	27,6	4,2	7,4	10,7	77,6	0,1	10,3
09.10.2015	54,5	2,3	16,1	11,7	69,8	0,1	18,6



Распределение частиц взвеси по радиусу в оз. Большое Островное

Таким образом, на основании результатов, представленных в таблицах, можно сделать следующие выводы. Во всех озерах основной максимальный вклад в показатель ослабления света вносит взвесь. Наибольший вклад взвеси в общее ослабление при $\lambda = 430$ нм зимой приходится на оз. Красиловское, где он составляет более 80%, а весной и летом — на оз. Большое Островное — 79,3 и 72,3%, соответ-

ственно. При $\lambda = 550$ нм вклад взвеси летом на оз. Большое Островное достигает 90,4%, весной — 92%, а по сравнению с оз. Лапа в эти же сезоны — 69,6% (весной), 66% (летом). При $\lambda = 670$ нм максимальные значения вклада взвеси в весенне-летний период приходятся на оз. Большое Островное — 83,9 и 79,1%, соответственно.

Библиографический список

1. Slade W.H., Boss E. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size // *Appl. Optics*. — 2015. — V. 54, №24.
2. Kostadinov T.S., Siegel D.A., Maritorena S., Guillocheau N. Optical assessment of particle size and composition in the Santa Barbara Channel, California // *Appl. Optics*. — 2012. — V. 51, №16.
3. Кукушкин А.С., Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н. Особенности формирования поля прозрачности в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в зимне-весенний период // *Оптика атмосферы и океана*. — 2010. — №8.
4. Маньковский В.И. Структура взвеси в озере Байкал по измерениям индикатрис рассеяния света // *Морской гидрофизический журнал*. — 2011. — №3.
5. Тарашанский Б.А., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р., Рябов Е.В., Ягунов А.С. Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15 // *Оптика атмосферы и океана*. — 2010. — №9.
6. Акулова О.Б. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоемов (на примере озер Алтайского края) : дисс. ... канд. техн. наук. — Барнаул, 2015.
7. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. — Л., 1983.
8. Оптика океана. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. — М., 1983. — Т. 1.
9. Pope R.M., Fry E.S. Absorption Spectrum (380–700 nm) of Pure Water. II Integration Cavity Measurements // *Appl. Optics*. — 1997. — V. 36, №33.