

## Спектральный вклад компонентов озерной воды в показатель ослабления света в разнотипных водоемах юга Западной Сибири\*

*И.А. Суторихин<sup>1,2</sup>, В.И. Букатый<sup>2</sup>, О.Б. Акулова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (Барнаул, Россия)

## Spectral Contribution of Lake Water Components to Light Attenuation Coefficient in Diverse Water Bodies of the South of Western Siberia

*I.A. Sutorikhin<sup>1,2</sup>, V.I. Bukaty<sup>2</sup>, O.B. Akulova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Barnaul, Russia)

Рассматривается влияние основных компонентов озерной воды, включая чистую воду, хлорофилл, желтое вещество, органоминеральную взвесь, на спектральное ослабление света (на длинах волн 430, 550 и 670 нм) в поверхностном слое трех водоемов юга Западной Сибири — озера Лапа, Красиловское и Бол. Островное (Алтайский край) в различные сезоны 2014 г. Используемые длины волн 430 и 670 нм характеризуются максимальным поглощением хлорофиллом в данном спектральном диапазоне, а длина волны 550 нм соответствует области высокой прозрачности исследуемой озерной воды. Во всех водоемах основной максимальный вклад в показатель ослабления света ( $\epsilon$ ,  $\text{м}^{-1}$ ) вносит взвесь. Наибольший вклад взвеси в общее ослабление при  $\lambda = 430$  нм (зимой) приходится на оз. Красиловское, где он составляет более 70%, и на оз. Бол. Островное (весной) — 79%. Желтое вещество дает максимальный вклад в  $\epsilon$  (зимой) на озерах Лапа, Бол. Островное и составляет 36,5 и 35,3% соответственно. Весной вклад желтого вещества (оз. Лапа) возрастает до 59% при  $\lambda = 430$  нм. 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 (16% — оз. Лапа, 11,5% — оз. Красиловское при  $\lambda = 670$  нм). Вклад хлорофилла в  $\epsilon$  максимален зимой только для озера Бол. Островного (10,2%) и на порядок выше, чем на оз. Лапа (0,9%), а весной и летом — для оз. Красиловского — 17,4 и 35,1%

The paper considers the influence of lake water components, including clean water, chlorophyll, yellow substance, organo-mineral suspension, on spectral light attenuation at wavelength of 430, 550 and 670 nm in a surface layer of three water bodies in the south of Western Siberia, namely Lakes Lapa, Krasilovskoye and Bol'shoje Ostrovnoye (Altai Krai) in different seasons of 2014. The wavelengths of 430 and 670 nm are well-known by their maximum chlorophyll absorption in the spectral range, and the wavelength of 550 nm corresponds to the high spectral transparency area of the lake water studied in the paper. In each water body, the major maximum contribution to light attenuation ( $\epsilon$ ,  $\text{m}^{-1}$ ) is provided by a suspension. The largest contribution of a suspension to the total attenuation at  $\lambda = 430$  nm (in winter) is estimated in Lake Krasilovskoye (more than 70%) and Lake Bol'shoje Ostrovnoye (79% in spring). Yellow substance provides the maximum contribution to  $\epsilon$  (winter) in Lakes Lapa and Bol'shoje Ostrovnoye; it is 36.5 and 35.3% respectively. In spring, the contribution of yellow substance (Lake Lapa) increases up to 59% at  $\lambda = 430$  nm. Clean water provides a minor contribution to the light attenuation (at  $\lambda = 430$  nm) in all water bodies and does not exceed 0.1%; however, it increases sharply in the long-wavelength range (16% in Lake Lapa, and 11.5% in Lake Krasilovskoye at  $\lambda = 670$  nm). The highest possible chlorophyll contribution to  $\epsilon$  is in winter in Lake Bol'shoje Ostrovnoye (10.2%) only; it is much higher than in Lake Lapa (0.9%). In spring and summer, it makes up to 17.4

\* Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 131 «Математическое и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга окружающей среды и поддержки принятия решений на основе данных стационарного, мобильного и дистанционного наблюдения» и программы Президиума РАН 4.2 «Комплексный мониторинг современных климатических и экосистемных изменений в Сибири».

соответственно, при  $\lambda = 430$  нм. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимого вклада и составляет менее 0,1%.

Исследования оптических свойств поверхностного слоя озер показали, что наибольшие значения показателя ослабления света наблюдаются на оз. Бол. Островном 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(2015)1.1-10

Природные водоемы представляют собой сложную физико-химико-биологическую систему, которая содержит в себе множество разнообразных компонентов — чистую воду, растворенные органические и неорганические соединения, органоминеральную взвесь, от присутствия которых вода (океаническая, морская и озерная) сильно рассеивает и поглощает свет [1–6]. В результате этого происходит влияние основных компонентов природной воды на спектральный показатель ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$ , который можно представить в виде

$$\varepsilon(\lambda) = \sigma(\lambda) + \kappa(\lambda). \quad (1)$$

Однако данных одновременных измерений спектральных показателей рассеяния  $\sigma(\lambda)$  и поглощения  $\kappa(\lambda)$  света в пробах озерной воды крайне мало, в отличие от результатов исследований в океанах и морях. Поэтому наши знания о количественном вкладе этих составляющих в спектральное ослабление озерной воды в видимой и ИК-области пока явно недостаточны.

*Цель работы* — изучение спектрального вклада компонентов озерной воды в показатель ослабления света в разнотипных водоемах юга Западной Сибири.

*Основными объектами* исследования были выбраны три разнотипных озера — Лапа, Красиловское и Бол. Островное (Алтайский край).

Для целей комплексного экологического мониторинга озер важным представляется определение в них различных веществ и их вклада в спектральный показатель ослабления света  $\varepsilon(\lambda)$ . Таким образом, измерив  $\varepsilon(\lambda)$ , можно с использованием спектральной физической модели ослабления света [2; 7] получить информацию о наличии содержащихся в воде веществ и их спектральном вкладе в этот интегральный показатель.

В гидрооптике задачи, в которых по физическим характеристикам веществ определяют их оптические

and up to 35.1% respectively, for Lake Krasilovskoye at  $\lambda = 430$  nm. Molecular scattering of light by clean water in the spectral range under study does not make a significant contribution and is less than 0.1%.

The study of the surface layer optical properties of three lakes demonstrates that the highest attenuation of light was observed in Lake Bol'shoje Ostrovnoye as compared to the other two lakes. This is due, mainly, to a high content of suspended matter and yellow substance as well as fluctuations in water temperature and, as a consequence, the change in chlorophyll concentration in lake phytoplankton.

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

свойства, принято называть прямыми. Обратными задачами являются те, в соответствии с которыми по результатам измерений оптических характеристик среды определяются состав веществ или их спектральный вклад в  $\varepsilon(\lambda)$ . В нашем случае применяется обратная задача, которая эффективно решается методом спектрального физического моделирования [2]. На основании этого с учетом основных компонентов озерной воды, влияющих на  $\varepsilon(\lambda)$ , его можно будет записать в модифицированном виде, используя спектральную физическую модель ослабления света, следующим образом:

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

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;  $\lambda$  — длина волны света.

В формуле (2) показатель поглощения взвесью не учитывается, так как он значительно меньше, чем  $\sigma_{\text{вз}}$ .

Для расчетов  $\kappa_{\text{чв}}(\lambda)$  используются табличные данные [2; 8], а для  $\sigma_{\text{мол}}(\lambda)$  — взятые в работе [4].

*Чистая вода* как природное химическое соединение состоит из атомов различных изотопических разновидностей водорода  $H$  и кислорода  $O$ . На практике в гидрооптических исследованиях для очистки воды от посторонних примесей обычно используется многократная дистилляция [2, с. 151]. В наших исследованиях в качестве эталонного образца для определения спектральной прозрачности воды с использованием спектрофотометрического метода была взята дистиллированная вода высокой очистки.

Показатель поглощения хлорофиллом определяется по формуле

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

Здесь  $\kappa_{\text{уд. хл}}(\lambda)$  — удельный показатель поглощения хлорофиллом, его значения приведены в работе [2]. Они мало отличаются для различных видов водорослей фитопланктона и носят универсальный характер,  $C_{\text{хл}}$  — концентрация хлорофилла «а» ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), которая экспериментально определялась по ГОСТ 17.1.4.02–90.

К *желтому веществу* (ЖВ) относят все те растворенные в воде органические вещества, которые сильно поглощают ультрафиолетовые и голубые лучи, в связи с чем вода приобретает желто-бурый цвет. ЖВ состоит из двух основных групп соединений: а) фенол-гумусовые кислоты; в) углеводородо-гумусовые кислоты [3]. Желтое вещество образуется двумя путями: непосредственно в самом водоеме — при распаде отмершего планктона, живых организмов и продуктов их жизнедеятельности и извне — путем смыва с водосбора гумусовых веществ [2].

Как известно, желтое вещество является частью растворенного органического вещества (РОВ), к которому принято относить всю ту воду, которая проходит через фильтр с размерами пор 0,45–1 мкм [3]. Однако в последнее время выяснилось, что при фильтрах размером порядка 0,5 мкм примерно 40% того, что относится к РОВ, надо считать взвесью, таким образом, это приводит к завышению значения  $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ . С учетом этого мы использовали фильтр с диаметром пор 0,22 мкм. Спектральный показатель поглощения желтым веществом  $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$  определялся нами с помощью спектрофотометра СФ-46 в диапазоне 400–800 нм с погрешностью измерения коэффициента пропускания 0,5%.

*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), хемотропные частицы (продукты химических реакций), космогенные частицы (космическая пыль), газовые пузырьки [3].

Спектральный показатель рассеяния взвесью  $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$  можно найти из выражения (2) по формуле

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

В таблицах 1–3 приведены результаты расчетов спектрального вклада компонентов в процентах для поверхностного слоя (1–5 см) озер в различные сезоны 2014 г. 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.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований и данных, представленных в таблицах, можно сделать следующие выводы.

1. Во всех озерах основной максимальный вклад в показатель ослабления света вносит *взвесь*.

Таблица 1

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света в трех разнотипных озерах зимой 2014 г.

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$
	чистая вода	желтое вещество	хлорофилл	взвесь + молекулярное рассеяние	молекулярное рассеяние	
Озеро Лапа (при $C_{\text{хл}} = 0,60 \text{ мг}/\text{м}^3$ )						
430	0,1	36,5	0,9	62,4	0,1	4,82
Озеро Красиловское (при $C_{\text{хл}} = 3,62 \text{ мг}/\text{м}^3$ )						
430	0,1	25,3	3,3	71,2	0,1	8,65
550	0,9	32,7	0,4	65,9	0,1	5,87
670	7,9	30	2,6	59,4	0,1	5,52
Озеро Бол. Островное (при $C_{\text{хл}} = 16,30 \text{ мг}/\text{м}^3$ )						
430	0,1	35,3	10,2	54,3	0,1	12,64
550	0,6	27,5	1,2	70,6	0,1	8,81
670	5,8	27,7	8,8	57,6	0,1	7,40

Таблица 2

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света в разнотипных озерах весной 2014 г.

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon$ ( $\lambda$ ), м <sup>-1</sup>
	чистая вода	желтое вещество	хлорофилл	взвесь + молекулярное рассеяние	молекулярное рассеяние	
Озеро Лапа (при $C_{\text{хл}} = 5,94$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	59	12,8	28,0	0,1	3,71
550	2,0	27,0	1,3	69,6	0,1	2,88
670	16,0	18,8	8,7	56,4	0,1	2,71
Озеро Красиловское (при $C_{\text{хл}} = 31,26$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	32,6	17,4	49,8	0,1	14,32
550	0,5	26,4	2,0	71,0	0,1	10,41
670	5,0	24,6	14,5	55,8	0,1	8,59
Озеро Бол. Островное (при $C_{\text{хл}} = 35,19$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	11,5	9,0	79,3	0,1	31,06
550	0,2	6,7	1,0	92,0	0,1	23,28
670	2,3	6,1	7,6	83,9	0,1	18,44

Таблица 3

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света в разнотипных озерах летом 2014 г.

Длина волны, нм	Поглощение			Рассеяние		$\varepsilon$ ( $\lambda$ ), м <sup>-1</sup>
	чистая вода	желтое вещество	хлорофилл	взвесь + молекулярное рассеяние	молекулярное рассеяние	
Озеро Лапа (при $C_{\text{хл}} = 17,92$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	42,7	16,1	41,0	0,1	8,89
550	1,0	30,0	2,0	66,0	0,1	6,01
670	10,0	35,5	16,4	38,0	0,1	4,36
Озеро Красиловское (при $C_{\text{хл}} = 31,47$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	30,7	35,1	34,0	0,1	7,15
550	1,0	29,0	4,9	65,0	0,1	4,21
670	11,4	24,5	34,0	30,0	0,1	3,71
Озеро Бол. Островное (при $C_{\text{хл}} = 49,85$ мг/м <sup>3</sup> )						
430	0,1	12,4	15,1	72,3	0,1	26,19
550	0,3	7,6	1,6	90,4	0,1	19,99
670	2,7	5,8	12,3	79,1	0,1	16,18

Наибольший вклад взвеси в общее ослабление при  $\lambda = 430$  нм зимой приходится на озеро Красиловское, где он составляет более 70%, а весной и летом — на оз. Бол. Островное — 79,3 и 72,3% соответственно. При  $\lambda = 550$  нм вклад взвеси летом на оз. Бол. Островном 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 приходится на оз. Бол. Островное — 83,9 и 79,1% соответственно.

2. *Желтое вещество* дает максимальный вклад в показатель ослабления света (при  $\lambda = 430$  нм) зимой на озерах Лапа, Бол. Островном и составляет 36,5 и 35,3% соответственно. Весной этот вклад на оз. Лапа возрастает до 59%, но для оз. Бол. Островного он понижается до 11,5%. При  $\lambda = 550$  нм вклад желтого вещества на оз. Красиловском наблюдался в пределах от 29 до 32% за исследуемый период, на оз. Лапа — 27% (весной) и 30,9% (летом). Но для оз. Бол. Островного произошло резкое снижение значений, а именно с зимы (27,7%) к весенне-летнему периоду (6,7 и 7,6% соответственно). При  $\lambda = 670$  нм максимальные значения вклада желтого вещества во все сезоны года зафиксированы на оз. Красиловском.

3. *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 (16% — оз. Лапа; 11,4% — оз. Красиловское, 5,8% — Бол. Островное при  $\lambda = 670$  нм).

4. Вклад *хлорофилла* в ослабление света максимален зимой только для озера Бол. Островного (10,2%) и на порядок выше, чем на оз. Лапа (0,9%), а весной — для оз. Красиловского — 17,4% при  $\lambda = 430$  нм. Летом происходит значительное увеличение вклада хлорофилла для всех озер на всех длинах волн.

5. *Молекулярное рассеяние* света чистой водой не вносит ощутимого вклада и составляет менее 0,1%.

Исследования оптических свойств поверхностного слоя озер показали, что наибольшие значения показателя ослабления света наблюдаются в гиперэвтрофном озере Бол. Островном 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.

*Авторы выражают благодарность* заведующей лабораторией водной экологии ИВЭП СО РАН, к. б. н. В.В. Кириллову за сотрудничество и н. с., к. б. н. А.В. Котовщикову за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла.

## Библиографический список

1. Ерлов Н.Г. Оптика моря. — Л., 1980.
2. Оптика океана. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Мониной. — М., 1983. — Т. 1.
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. — Л., 1983.
4. Маньковский В.И. Основы оптики океана : метод. пособие. — Севастополь, 1996.
5. Маньковский В.И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. — 2011. — №5.
6. Апонасенко А.Д. Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Красноярск, 2001.
7. Маньковский В.И., Шерстянkin П.П. Спектральная модель показателя ослабления направленного света в водах озера Байкал в летний период // Морской гидрофизический журнал. — 2007. — №6.
8. Pope R.M., Fry E.S. Absorption Spectrum (380–700 nm) of Pure Water. II Integration Cavity Measurements // Appl. Optics. — 1997. — V. 36, №33.