

УДК 535.8 +556.5

Изменчивость показателя поглощения света желтым веществом в поверхностном слое Телецкого озера

О.Б. Акулова, В.И. Букатый, К.П. Попов*

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

Поступила в редакцию 22.02.2018 г.

Приведены экспериментальные данные по изменению показателя поглощения света желтым веществом в поверхностном слое оз. Телецкого (Горный Алтай), полученные летом 2017 г. в ходе экспедиционных гидрофизических исследований. Рассчитанные значения показателя поглощения света желтым веществом (при натуральном основании логарифма) в спектральном диапазоне 400–800 нм за исследуемый период находились в диапазоне 0,1–2,1 м⁻¹. Концентрация желтого вещества в оз. Телецком, определяемая оптическим методом по измеренному показателю поглощения света желтым веществом, варьировала в пределах 2,9–5,1 г/м³. Для оценки влияния поглощения света желтым веществом на суммарное ослабление рассчитан относительный спектральный вклад основных оптически активных компонент озерной воды (желтого вещества, взвеси, хлорофилла, чистой воды) в спектральный показатель ослабления по акватории исследуемого водоема. Выявлено, что во всех точках (всего 21 точка отбора проб) озера максимальный вклад вносит именно желтое вещество.

Ключевые слова: показатели поглощения и ослабления света, спектральная прозрачность воды, растворенное органическое вещество, желтое вещество, хлорофилл, взвесь, физическая модель, корреляция; light absorption and attenuation indices, spectral transparency of water, dissolved organic matter, yellow substance, chlorophyll, suspended matter, physical model, correlation.

Введение

Современное и будущее состояние многих уникальных природных водных объектов Сибири, к числу которых относится оз. Телецкое, определяется рядом различных факторов (природных, антропогенных). В последние годы возрастает научно-практический интерес к состоянию этих объектов, их охране и рациональному использованию. Научная значимость изучения таких крупных водоемов определяется требованиями повышения современного уровня знаний по основным вопросам лимнологии, что позволило бы найти новые и усовершенствовать существующие методы исследований и подходы к решению комплексных задач в области гидрооптики и экологии глубоководных озер. Это актуально и для развития экономики Сибири.

Изучению спектральных показателей ослабления $\epsilon(\lambda)$ и поглощения $\kappa(\lambda)$ света в поверхностных водах оз. Телецкого посвящено мало работ; в большинстве из них рассматривается только показатель ослабления света. В [1] приведены результаты измерений десятичного показателя ослабления света (в 10 спектральных участках), которые получены авторами в 2000 г. в ходе двух летних экспедиций.

В результате анализа пространственного распределения $\epsilon(\lambda)$ для десяти фиксированных длин волн авторами не было установлено какой-либо систематической зависимости показателей ослабления света от координат места отбора проб (всего 9 пунктов). Определены среднегеометрические величины $\epsilon(\lambda)$ по материалам обеих экспедиций во всех исследуемых пунктах, которые варьировали в пределах от 0,67 до 2,46 м⁻¹. Новые количественные данные по динамике показателя ослабления света в поверхностном слое оз. Телецкого получены в работе [2] в период с 22 по 27 июля 2013 г. Измерения проводились в спектральном диапазоне 400–800 нм на 14 пунктах отбора проб. Значения $\epsilon(\lambda)$ находились в диапазоне 0,1–5,3 м⁻¹ (указаны при натуральном основании логарифма). В [3] по данным измерений показателя ослабления света в видимом диапазоне определен трофический статус озера. Величины $\epsilon(\lambda)$ находились в пределах 1,5–5,2 м⁻¹. Слабая изученность гидрооптических характеристик и их зависимостей от основных оптически активных компонент оз. Телецкого обуславливает необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Влияние многочисленных растворенных органических веществ (РОВ) в озерной воде на ее оптические свойства постепенно становится все более понятным. Особый интерес с точки зрения оптики представляет та часть РОВ, которую К. Kalle назвал Gelbstoff – желтое вещество (ЖВ). Названием

* Ольга Борисовна Акулова (akulova8282@mail.ru); Владимир Иванович Букатый (v.bukaty@mail.ru); Кирилл Павлович Попов (k237p@mail.ru).

желтое вещество обязано своим светопоглощающим свойствам — его поглощение резко возрастает в сторону коротких волн, что и обуславливает желтоватую окраску. Напомним, что цвет вещества, полоса поглощения которого лежит в видимой области, дополнителен к цвету поглощаемого света. Если поглощается голубой (480–435 нм) или фиолетовый (435–400 нм) свет, то вещество желтое (595–580 нм) или желто-зеленое (580–560 нм) [4].

Образуется ЖВ из углеводов в результате реакции Мейера [5]. Реакция ускоряется при повышенной температуре, в щелочной среде и в присутствии аминокислот и приводит к образованию в конечном счете желтых или коричневых меланоидов. Желтому веществу свойственен быстрый рост поглощения с уменьшением длины волны, обусловленный электронными переходами. Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ прямо пропорционален его концентрации, что позволяет оценивать содержание ЖВ по оптическим свойствам.

Цель работы — изучить особенности пространственного распределения показателя поглощения света желтым веществом, а также оценить оптическим методом концентрацию желтого вещества в пробах воды, взятых в поверхностном слое оз. Телецкого летом 2017 г.

Материалы и методы

В период с 7 по 11 июля 2017 г. в ходе летних экспедиционных работ проведен отбор проб воды в поверхностном слое оз. Телецкого (51°21'46"–51°48'36" с.ш., 87°14'40"–87°50'54" в.д.). Обработана и проанализирована 21 проба. Точки отбора проб показаны на рисунке и соответствуют трансектам при гидрологических исследованиях.

Лимнологические характеристики водоема представлены в табл. 1. Морфометрические и батиметрические данные взяты из [6].

Таблица 1

Лимнологические характеристики оз. Телецкого

Характеристика	Значение
Площадь зеркальной поверхности, км ²	227,3
Объем, км ³	41,0
Максимальная глубина, м	323,0
Средняя глубина, м	181,0
Средняя высота зеркала озера над уровнем моря (рассчитана за многолетний период 1931–1999 гг.), м	434,0
Длина по медиане, км	78,6
Длина береговой линии, км	192,8
Максимальная прозрачность по диску Секки, м	15,5
Диапазон значений показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$, м ⁻¹	0,2–2,3
Диапазон значений показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ (при натуральном основании логарифма), м ⁻¹	0,1–2,1

В лабораторных условиях с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ в режиме измерений спек-

тральной прозрачности воды (коэффициента пропускания T , %) определяли показатель ослабления света $\epsilon(\lambda)$ в спектральном диапазоне 400–800 нм. Максимальная абсолютная погрешность показателя ослабления света составила $\sim 0,1$ м⁻¹. Проведено 504 измерения спектральной прозрачности воды на приборе до и после фильтрации проб с использованием фильтров с диаметром пор 0,22 мкм. Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определяли после измерения $\epsilon(\lambda)$ в отфильтрованной озерной воде. Спектральная зависимость $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ аппроксимируется экспоненциальным законом

$$\kappa_{\text{жв}}(\lambda) \sim e^{-\mu\lambda}, \quad (1)$$

где λ — длина волны света; μ — коэффициент, характеризующий наклон спектральной кривой показателя поглощения. Значение коэффициента μ в водоемах непостоянно и может применяться для оценки соотношений гуминовых и фульвокислот, а также органического вещества аллохтонного (от *allochthönes* — привнесенного извне) и автохтонного (*autychthönes* — местного, коренного) происхождения.

Мы использовали два оптических показателя для характеристики РОВ: показатель поглощения на длине волны 450 нм $\kappa_{\text{жв}}(450)$ в качестве количественной характеристики и коэффициент экспоненциального наклона μ в спектральном диапазоне 400–800 нм как качественную характеристику. Согласно закону Бугера в пределах его применимости показатель поглощения желтым веществом прямо пропорционален его концентрации. Тогда, измерив $\kappa_{\text{жв}}(450)$, можно определить концентрацию ЖВ в озерной воде по формуле [7]:

$$C_{\text{жв}} = \kappa_{\text{жв}}(450) / \kappa_{\text{уд.жв}}(450). \quad (2)$$

Здесь $C_{\text{жв}}$ — концентрация желтого вещества, г/м³; $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$ — удельный показатель поглощения света ЖВ, м²/г. В работе [8] рассчитаны значения $\kappa_{\text{уд.жв}}(\lambda)$ на длине волны 450 нм. Другие данные нам неизвестны. До сих пор не ясно, насколько величина $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$, приводимая в [8], является универсальной. Тем не менее мы рассчитали значения $C_{\text{жв}}$ с помощью подхода [7], взяв $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$ из [8].

Результаты и обсуждение

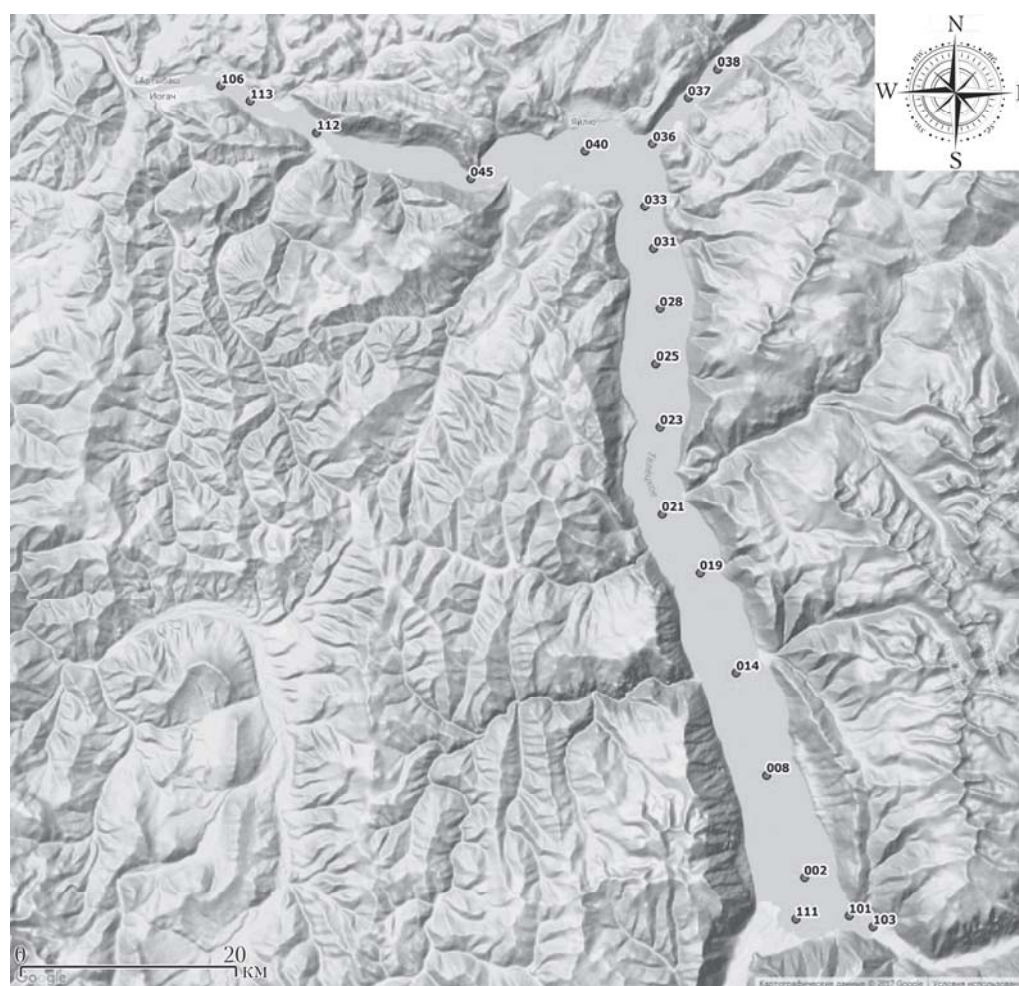
Значения спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$ в поверхностном слое оз. Телецкого (пробы взяты 7–11 июля 2017 г.) находились в диапазоне 1,0–1,6 м⁻¹ ($\lambda = 430$ нм, $\epsilon(\lambda)$ рассчитан при натуральном основании логарифма) [9]. Концентрации общего фосфора варьировали в пределах 5,0–18 мг/м³ [10], а хлорофилла a — в пределах 0,1–1,6 мг/м³ [11].

В табл. 2 представлены результаты расчетов $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ по измеренным коэффициентам пропускания и $C_{\text{жв}}$, вычисленным по формуле (2), для различных точек, отобранных по акватории оз. Телецкого (см. рисунок).

Таблица 2

**Показатель поглощения света желтым веществом и концентрация желтого вещества
в поверхностном слое оз. Телецкого**

Точка	Топонимическое название	Координаты, °с.ш.; °в.д.	$K_{ЖВ}(450), M^{-1}$	$C_{ЖВ}, г/м^3$
002	р. Чолушман (пелагиаль)	51,37797997; 87,78595003	0,7	3,1
008	п. Беле (пелагиаль)	51,43121998; 87,75475997	0,8	3,9
014	р. Чулюш (пелагиаль)	51,48432998; 87,72960001	0,9	4,4
019	м. Сыракту (пелагиаль)	51,53638998; 87,69930999	0,7	3,3
021	р. Кокши (пелагиаль)	51,56671998; 87,66769001	0,7	3,4
023	м. Вакты (пелагиаль)	51,61136996; 87,66628998	0,7	3,6
025	р. Адамыш (пелагиаль)	51,64463002; 87,66303998	0,6	2,9
028	р. Талду-коол (пелагиаль)	51,67300997; 87,66604003	0,7	3,2
031	р. Б. Корбу (пелагиаль)	51,70365002; 87,66107996	0,6	3,1
033	м. Отык-Таш (пелагиаль)	51,72552997; 87,65327004	0,8	3,6
036	р. Камга (пелагиаль)	51,75791002; 87,66034001	0,7	3,3
037	р. Камга (пелагиаль)	51,78184002; 87,68948003	0,8	4,0
038	р. Камга (литораль)	51,79655998; 87,71394001	1,1	5,1
040	п. Яйлю (пелагиаль)	51,75398997; 87,60415996	0,8	4,0
045	м. Ажу (пелагиаль)	51,74000996; 87,50876997	0,6	3,1
101	р. Кыга (пелагиаль)	51,35752996; 87,82309997	0,9	4,2
103	р. Кыга (литораль)	51,35190002; 87,84324001	0,7	3,6
106	с. Артыбаш (пелагиаль)	51,78798999; 87,30163001	0,6	3,0
111	р. Чолушман (литораль)	51,35601997; 87,77903999	0,8	4,0
112	р. Саймыш (пелагиаль)	51,76383996; 87,38116002	0,8	3,7
113	Каменный залив (пелагиаль)	51,78021996; 87,32579998	0,6	3,0



Карта-схема оз. Телецкого с указанием точек отбора проб

Концентрация ЖВ в поверхностном слое озера находилась в диапазоне 2,9–5,1 г/м³. Считается [12], что желтое вещество составляет до 70% РОВ, которое в значительной степени определяет оптические свойства природных вод, влияя на глубину фотического слоя и играя важную роль в ряде биохимических и фотохимических процессов. По данным [13], концентрация растворенного органического вещества $C_{РОВ}$ в озерах варьирует от 1 до 25 мгС/л. Так, в Ладожском озере $C_{РОВ}$ в среднем составляет 8 мгС/л [14]. Для вод оз. Онтарио в [15] приведено значение $C_{РОВ} = 2,16$ мгС/л.

Для сравнения с данными для оз. Телецкого в табл. 3 приведены значения $\kappa_{ЖВ}(550)$ и $C_{ЖВ}$ в поверхностном слое других природных водоемов.

Таблица 3
Показатель поглощения света желтым веществом и его концентрация в разных водоемах

Водоем	$\kappa_{ЖВ}(550), \text{м}^{-1}$	$C_{ЖВ}, \text{г/м}^3$
Данные исследований летом 2016 г. [16]		
оз. Телецкое:		
г. 111	0,4	1,9
г. 014	1,1	5,2
г. 031	2,0	9,5
г. 106	2,1	10,0
оз. Лапа	3,0	13,9
оз. Красилковское	2,7	12,9
оз. Большое Островное	4,0	17,8
Данные [17]		
Средиземное море	0,0042	0,19
океанические воды	0,0086	0,38
оз. Байкал	0,0096	0,43
Балтийское море	0,0105	0,47
Черное море	0,0106	0,48

Построены эмпирические аппроксимационные зависимости между значениями логарифма спектрального показателя поглощения света желтым веществом $\ln \kappa_{ЖВ}$ и λ . Для всех исследуемых точек озера коэффициент детерминации R^2 находился в диапазоне 0,89–0,98; коэффициент экспоненциального наклона μ варьировал в пределах 0,005–0,010 нм⁻¹. По данным исследований [5, 18–20], для океанов коэффициент μ варьирует от 0,014 до 0,019 нм⁻¹, увеличиваясь с глубиной; при этом отмечено отклонение экспериментальной зависимости $\kappa_{ЖВ}(\lambda)$ от экспоненты в длинноволновой области спектра, которое авторы объясняют рассеянием и поглощением света частицами взвеси, остающимися в пробе после фильтрации.

Относительный спектральный вклад компонентов озерной воды в $\epsilon(\lambda)$ в поверхностном слое оз. Телецкого рассчитывали с использованием спектральной физической модели ослабления света, предложенной О.В. Копелевичем [21]:

$$\epsilon(\lambda) = \kappa_{ХЛ}(\lambda) + \kappa_{ЖВ}(\lambda) + \sigma_{МОЛ}(\lambda) + \sigma_{ВЗ}(\lambda) + \kappa_{ЧВ}(\lambda), \quad (3)$$

где $\kappa_{ХЛ}(\lambda)$ – показатели поглощения света хлорофиллом; $\sigma_{МОЛ}(\lambda)$ – показатель молекулярного рас-

сеяния чистой водой; $\sigma_{ВЗ}(\lambda)$ – показатель рассеяния органо-минеральной взвесью; $\kappa_{ЧВ}(\lambda)$ – показатель поглощения света чистой водой. Показатель поглощения хлорофиллом рассчитывали по формуле

$$\kappa_{ХЛ}(\lambda) = \kappa_{УД.ХЛ}(\lambda)C_{ХЛ}. \quad (4)$$

Здесь $C_{ХЛ}$ – концентрация хлорофилла a , мг/м³; $\kappa_{УД.ХЛ}(\lambda)$ – удельный показатель поглощения хлорофиллом, м²/мг, его значения приведены в [21]. Для расчетов $\kappa_{ЧВ}(\lambda)$ использовали табличные данные [22, 23], для $\sigma_{МОЛ}(\lambda)$ – [21]. Спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{ВЗ}(\lambda)$ определяли по формуле, вытекающей из выражения (3):

$$\sigma_{ВЗ}(\lambda) = \epsilon(\lambda) - [\kappa_{ХЛ}(\lambda) + \kappa_{ЖВ}(\lambda) + \sigma_{МОЛ}(\lambda) + \kappa_{ЧВ}(\lambda)]. \quad (5)$$

В табл. 4 приведены результаты расчетов спектрального вклада компонентов озерной воды в $\epsilon(\lambda)$ для поверхностного слоя (10–15 см) оз. Телецкого в различных точках отбора проб (значения $\epsilon(\lambda)$ и $\kappa_{ЖВ}(\lambda)$ указаны при натуральном основании логарифма).

Таблица 4
Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света в поверхностном слое оз. Телецкого (7–11 июля 2017 г.)

$\lambda, \text{нм}$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления $\epsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$
	$\frac{\kappa_{ЧВ}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{ЖВ}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{ХЛ}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{ВЗ}(\lambda) + \sigma_{МОЛ}(\lambda)}{\epsilon(\lambda)}$	
1	2	3	4	5	6
<i>m. 002</i> ($C_{ХЛ} = 1,4 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	81,7	9,7	8,2	1,1
550	16,6	70,6	2,6	10,2	0,3
<i>m. 008</i> ($C_{ХЛ} = 1,2 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	79,0	7,5	13,1	1,2
550	14,1	75,0	1,7	9,2	0,4
<i>m. 014</i> ($C_{ХЛ} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,3	86,7	6,4	6,6	1,3
550	11,3	80,0	1,4	7,3	0,5
<i>m. 019</i> ($C_{ХЛ} = 1,3 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,2	83,4	9,0	7,4	1,1
550	14,1	75,0	2,0	8,9	0,4
<i>m. 021</i> ($C_{ХЛ} = 1,2 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	81,7	8,0	9,9	1,1
550	14,1	75,0	1,7	8,9	0,4
<i>m. 023</i> ($C_{ХЛ} = 1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	78,6	6,3	14,7	1,2
550	14,1	75,0	1,5	9,4	0,4
<i>m. 025</i> ($C_{ХЛ} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	77,7	8,5	13,4	1,0
550	18,8	66,6	2,3	12,3	0,3
<i>m. 028</i> ($C_{ХЛ} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	78,9	8,3	12,4	1,1
550	14,1	75,0	1,7	9,2	0,4

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6
<i>m. 031</i> ($C_{\text{хл}} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	80,0	8,3	11,3	1,0
550	18,8	66,6	2,3	12,3	0,3
<i>m. 033</i> ($C_{\text{хл}} = 1,3 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,3	81,6	8,8	9,3	1,2
550	14,1	75,0	2,0	8,6	0,4
<i>m. 036</i> ($C_{\text{хл}} = 1,6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	79,6	11,3	8,7	1,1
550	14,1	75,0	2,5	8,1	0,4
<i>m. 037</i> ($C_{\text{хл}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,3	82,5	0,6	16,6	1,3
550	14,1	75,0	0,1	10,8	0,4
<i>m. 038</i> ($C_{\text{хл}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,2	89,2	2,5	8,1	1,6
550	9,4	83,3	0,5	6,8	0,6
<i>m. 040</i> ($C_{\text{хл}} = 1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	84,4	6,5	8,7	1,2
550	14,1	75,0	1,5	9,4	0,4
<i>m. 045</i> ($C_{\text{хл}} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	82,0	8,4	9,2	1,0
550	18,8	66,6	2,3	12,3	0,3
<i>m. 101</i> ($C_{\text{хл}} = 0,6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,3	86,7	3,5	9,5	1,3
550	11,3	80,0	0,6	8,1	0,5
<i>m. 103</i> ($C_{\text{хл}} = 0,6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	79,0	3,5	17,1	1,2
550	14,1	75,0	0,7	10,2	0,4
<i>m. 106</i> ($C_{\text{хл}} = 1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	78,8	8,0	12,8	1,1
550	18,8	66,6	2,3	12,3	0,3
<i>m. 111</i> ($C_{\text{хл}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,3	82,5	3,0	14,2	1,3
550	11,3	60,0	0,6	28,1	0,5
<i>m. 112</i> ($C_{\text{хл}} = 1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	86,7	7,1	5,8	1,1
550	14,1	75,0	1,5	9,4	0,4
<i>m. 113</i> ($C_{\text{хл}} = 1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,4	82,0	7,6	10,0	1,1
550	18,8	66,6	2,0	12,6	0,3

Максимальный вклад в показатель ослабления света вносит ЖВ. Наибольший вклад ЖВ на $\lambda = 430 \text{ нм}$ приходится на литораль р. Камга (т. 038), где он равен 89,2%. На длине волны 550 нм вклад желтого вещества варьировал от 60,0% (т. 111 – литораль р. Чолушман) до 83,3% (т. 038). Взвесь дает максимальный вклад в показатель ослабления, равный 17,1%, на $\lambda = 430 \text{ нм}$ в т. 103 (литораль р. Кыга); он возрастает до 28,1% (т. 111) на $\lambda = 550 \text{ нм}$. Вклад чистой воды в ослабление света незначительный (не более 0,4%) на $\lambda = 430 \text{ нм}$ во всех точках, но резко увеличивается в длинноволновой области – до 18,8% на $\lambda = 550 \text{ нм}$. Вклад хлорофилла на $\lambda = 430 \text{ нм}$ составляет от 0,6% (т. 037 – пелагиаль р. Камга) до 11,3% (т. 036 – пелагиаль р. Камга), на $\lambda = 550 \text{ нм}$ – от 0,1% (т. 037) до 2,6% (т. 002 – пелагиаль

р. Чолушман). Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад, он равен ~0,1%.

Заключение

В работе по измерениям коэффициента пропускания в диапазоне 400–800 нм в пробах воды оз. Телецкого, пропущенных через фильтр с диаметром пор 0,22 мкм, определен спектральный показатель поглощения света желтым веществом в озерной воде, и рассчитана концентрация желтого вещества. Проанализирована пространственная изменчивость концентрации желтого вещества, определяемой оптическим методом, в поверхностном слое Телецкого оз. Вычислен коэффициент экспоненциального наклона кривой спектрального показателя поглощения желтым веществом в озерной воде. Оценен спектральный вклад компонентов воды в показатель ослабления света для поверхностного слоя озера в различных точках отбора проб.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН А.В. Дьяченко за космический снимок озера, научному сотруднику лаборатории водной экологии ИВЭП СО РАН А.В. Котовщикову, а также И.М. Фроленкову и О.М. Фроленкову за предоставленные данные измерений концентрации хлорофилла *a* и сотрудникам ХАЦ ИВЭП СО РАН под руководством д-ра хим. наук Т.С. Папиной за данные измерений концентрации общего фосфора.

1. Карбышев С.Ф., Кириллова Т.В., Ковальская Г.А., Павлов В.Е. Спектральная прозрачность поверхностного слоя воды в Телецком озере // Сб. тр. междунар. конф. «Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики». Томск: Междунар. исслед. центр по физике окружающей среды и экологии Томск. науч. центра СО РАН, 2001. С. 115–117.
2. Суторихин И.А., Залаева У.И. Изменение показателя ослабления поверхностного слоя Телецкого озера // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XX Междунар. симпоз. Новосибирск, 23–27 июня 2014 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. С. 176–179.
3. Суторихин И.А., Фроленков И.М. Оценка трофического статуса Телецкого озера по данным гидрооптических измерений в видимом диапазоне // Изв. АлтГУ. 2017. Т. 96, № 4. С. 67–71.
4. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 278 с.
5. Hojerslev N.K. On the origin of yellow substance in marine environment // Rap. Inst. Fysisk Oceanogr. 1980. N 42. P. 57–81.
6. Селегей В.В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я., Высоцкий Е.М., Перепелова Т.И. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. Бельгия: Королевский Музей Центральной Африки, 2001. Т. 105. 310 с.
7. Маньковский В.И. Желтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морск. гидрофиз. ж. 2015. № 3. С. 53–61.
8. Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances // PhD Thesis. Göteborg University,

- Göteborg, Sweden: Department of Analytical and Marine Chemistry, 1979. 200 p.
9. *ГОСТ 7601-78*. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин. М.: Изд-во стандартов, 1998. С. 6–9.
 10. *РД 52.24.387-2006* Массовая концентрация фосфора общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2006. 31 с.
 11. *ГОСТ 17.1.4.02-90*. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.
 12. *Coble P.G.* Marine optical biogeochemistry: The chemistry of Ocean color // *Chem. Rev.* 2007. V. 107. P. 402–418.
 13. *Кузнецов С.И.* Микрофлора озера и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
 14. *Антропогенное* эвтрофирование Ладожского озера. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 304 с.
 15. *Bukata R.P., Bruton J.E., Jerome J.H., Jain S.C., Zwick H.H.* Optical water quality model of lake Ontario: Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in lake Ontario // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. N 9. P. 1696–1703.
 16. *Акулова О.Б., Букатый В.И., Попов К.П.* Желтое вещество в поверхностном слое озера Телецкое // *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Тр. VI Всерос. симпоз. с междунар. участием. Барнаул, 28 августа – 1 сентября 2017 г. Барнаул: Пять плюс, 2017. С. 3–7.*
 17. *Маньковский В.И.* Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // *Морск. гидрофиз. ж.* 2011. № 5. С. 14–29.
 18. *Atkins W.R.G., Poole H.H.* An experimental study of the scattering of light by natural waters // *Proc. R. Soc. Lond. B., Biol. Sci.* 1952. V. 140. P. 321–338.
 19. *Пелевина М.А.* Методика и результаты измерений спектрального поглощения света растворенным органическим «желтым» веществом в водах Балтийского моря // *Световые поля в океане. М.: ИО АН СССР, 1979. С. 92–97.*
 20. *Копелевич О.В., Шифрин К.С.* Современные представления об оптических свойствах морской воды. Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 4–55.
 21. *Оптика океана* / под ред. А.С. Моница. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 372 с.
 22. *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.
 23. *Левин И.М.* Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундам. и приклад. гидрофиз.* 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.

О.Б. Akulova, V.I. Bukatyy, K.P. Popov. Variability of light absorption by yellow substance in surface water of Lake Teletskoye.

Experimental data on variability of light absorption by yellow substance in the surface layer of Lake Teletskoye (Gorny Altai) received during field hydrophysical studies carried out in the summer of 2017 are presented. The indices of light absorption by yellow substance calculated in the spectral range 400–800 nm (at natural logarithmic base) are within 0.1–2.1 m⁻¹. The yellow substance concentration in Lake Teletskoye determined by the optical method from the measured light absorption by yellow substance varies from 2.9 to 5.1 g/m³. To assess the effect of light absorption by yellow substance on the total attenuation, the relative spectral contribution of major optically active components of the lake water (yellow substance, suspended matter, chlorophyll, and pure water) to the spectral attenuation index for the water area under study is calculated. It is found that just the yellow substance makes the maximum contribution at all sampling points (21) of the lake.