

ФИЗИКА

Научная статья

УДК 535.8:556.5:574.5

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-01](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-01)

Физическая модель ослабления света для оценки качества озерной воды

Ольга Борисовна Акулова¹, Владимир Иванович Букатый²,
Александр Владимирович Дьяченко³

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия,
akulova8282@mail.ru

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия,
v.bukaty@mail.ru

³Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия,
dychenko@iwep.ru

PHYSICS

Original article

Physical Model of Light Attenuation to Assess Lake Water Quality

Olga B. Akulova¹, Vladimir I. Bukaty², Aleksandr V. Dyachenko³

¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia,
akulova8282@mail.ru

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia,
v.bukaty@mail.ru

³Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia,
dychenko@iwep.ru

Аннотация. Представлена модифицированная полуэмпирическая модель ослабления света для Телецкого озера, которая заключается в определении спектрального вклада значимых в своем оптическом проявлении компонентов воды в суммарный показатель ослабления света. На основании экспериментальных данных получено, что рассчитанные значения показателя ослабления света на четырех длинах волн — 430, 450, 550 и 670 нм — за исследуемый период на озере (выезд 23–28 июля 2024 г.) находились в диапазоне от 0,2 до 2,4 м⁻¹, показателя поглощения света желтым веществом — от 0,1 до 1,9 м⁻¹. Концентрации желтого вещества за время наблюдений на озере варьировали в пределах 0,9–7,5 г/м³, хлорофилла-а — 0,2–1,5 мг/м³. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки, находились в пределах 3,4–5,9 м со средним значением 4,9 м. В результате расчетов спектрального

Abstract. The paper presents a modified semi-empirical model of light attenuation for Lake Teletskoye. The model identifies the spectral contributions of water components with significant optical influence on the total light attenuation. Values of the light attenuation coefficient at the wavelengths of 430, 450, 550, and 670 nm are calculated for the studied period of July 23–28, 2024, using the experimental data. The calculated values range from 0.2 to 2.4 m⁻¹, and the values of the yellow substance light absorption coefficient vary from 0.1 to 1.9 m⁻¹. The yellow substance and chlorophyll-*a* concentrations vary from 0.9 to 7.5 g/m³ and 0.2–1.5 mg/m³, respectively, for the studied period. The relative transparency values measured using the Secchi disk are within the 3.4–5.9 m range, with an average value of 4.9 m. As a result of model calculations of the spectral contributions of optically active water components of Lake Teletskoye, it is found that yellow substance and suspension

вклада основных оптически активных компонентов воды для Телецкого озера получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление света оказывают желтое вещество и взвесь. Таким образом, трофический статус Телецкого озера в различных точках отбора проб (всего 21 точка) за время исследования можно охарактеризовать в основном как олиготрофный; по унифицированной экологической классификации поверхностных вод суши можно отнести к 1 классу качества воды — «предельно чистая».

Ключевые слова: физическая модель ослабления света, первичные гидрооптические характеристики, показатели ослабления, поглощения, рассеяния, хлорофилл, взвесь, желтое вещество

Для цитирования: Акулова О.Б., Букатый В.И., Дьяченко А.В. Физическая модель ослабления света для оценки качества озерной воды // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 13–21. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-01](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-01).

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ гос. регистрации проекта АААА-А17-117041210241-4) при содействии Программы поддержки флота.

Благодарность: благодарим ведущего научного сотрудника лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН, канд. биол. наук Е.Ю. Митрофанову за отобранные пробы озерной воды и за предоставленные результаты измерений относительной прозрачности по диску Секки, а также сотрудников ЦКП МРС за возможность работы на оборудовании и лично мл. науч. сотр. лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования ИВЭП СО РАН, канд. геогр. наук Н.А. Курятникову за предоставленные микрофотографии частиц водной взвеси, сотрудников ХАЦ ИВЭП СО РАН под руководством д-ра хим. наук Т.С. Папиной за предоставленные данные измерений концентраций общего фосфора, студента магистратуры АлтГУ Института цифровых технологий, электроники и физики К.В. Лаптева за обработку частиц водной взвеси.

Введение

Изучение первичных гидрооптических характеристик от англ. *water inherent optical properties (IOP)* как индикаторов экологического состояния водных экосистем является важной задачей гидрооптики. Основные IOP, используемые в оптике природных вод, — это показатели поглощения κ , рассеяния σ и производный от них — показатель ослабления $\varepsilon = \kappa + \sigma$, они измеряются в обратных

метрах (сантиметрах); их величина для каждой длины волны λ зависит только от содержащихся в воде взвешенных и растворенных веществ и не зависит от условий освещения [1–5]. Вышеперечисленные первичные гидрооптические характеристики (а также вероятность выживания фотона $\omega_0 = \sigma/\varepsilon$, индикатриса рассеяния $(\gamma)x$ и ее интегральные параметры) входят в теорию светового поля, теорию видения и дистанционного зондиро-

Keywords: physical model of light attenuation, inherent optical properties, attenuation coefficients, absorption, scattering, chlorophyll, suspension, yellow substance

For citation: Akulova O.B., Bukaty V.I., Dyachenko A.V. Physical Model of Light Attenuation to Assess Lake Water Quality. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 1 (147). P. 13–21. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-01](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-01).

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number of the project АААА-А17-117041210241-4) with the assistance of the Fleet Support Program.

Acknowledgement: we would like to thank our colleagues — E.Yu. Mitrofanova, leading researcher of the Laboratory of Hydrobiology IWEP SB RAS, candidate of biological sciences, for the taken samples of lake water and for the provided results of measurements of relative transparency on the Secchi disk, our colleagues from the IWEP SB RAS Collective Center of Microscopy and X-ray Microscopy for their contribution to the study. We are also immensely grateful to junior researcher of the Laboratory of landscape and water ecological research and nature management, candidate of science in geography N.A. Kuryatnikova, for the provided microphotographs of water suspension particles. Thanks to the staff of the Chemical Analytical Center IWEP SB RAS under the leadership of Dr. Chem. T.S. Papina for the provided data on measurements of concentrations of total phosphorus. We thank the graduate student of Altai State University of the Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics K.V. Laptev for the processing of particles of water suspension.

метрах (сантиметрах); их величина для каждой длины волны λ зависит только от содержащихся в воде взвешенных и растворенных веществ и не зависит от условий освещения [1–5]. Вышеперечисленные первичные гидрооптические характеристики (а также вероятность выживания фотона $\omega_0 = \sigma/\varepsilon$, индикатриса рассеяния $(\gamma)x$ и ее интегральные параметры) входят в теорию светового поля, теорию видения и дистанционного зондиро-

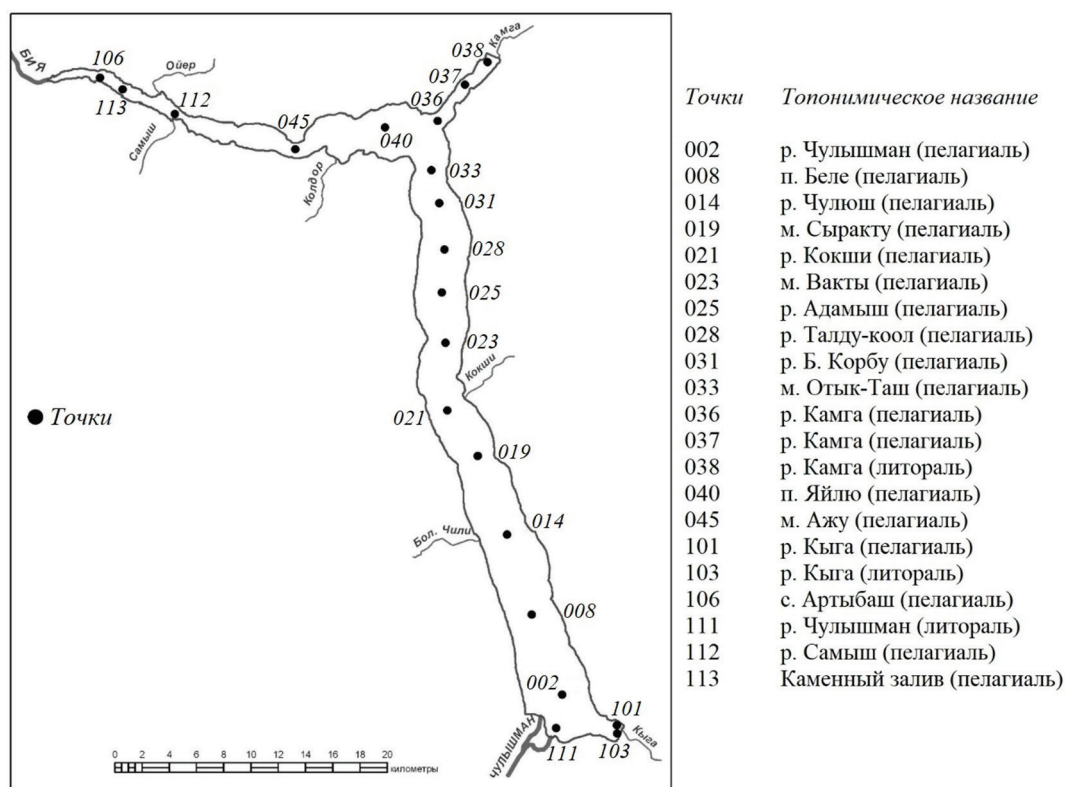
вания, и без их знания невозможно решение основных гидрооптических задач. Физические модели IOP можно условно разделить на корреляционные и структурные. Корреляционные модели основаны на больших сериях измерений первичных гидрооптических характеристик в естественных условиях, которые позволяют установить связи между значениями данной характеристики в различных точках спектра или в фиксированной точке спектра (так называемые спектральные модели). Структурные модели обычно выражают IOP через концентрации оптически активных компонентов, взвешенных и растворенных в природной воде [1, с. 5].

Актуальность исследования продиктована необходимостью расширять и углублять представления об оптических свойствах воды Телецкого озера, поскольку она существенно зависит от периодических изменений ее основных оптически активных компонентов — желтого вещества, взвеси, хлорофилла и чистой воды. Кроме того, в настоящее время во всем мире уделяется особое внимание исследованию спектрального вклада оптически активных компонентов природной воды (каждой по отдельности) в суммарное ослабление света, а также динамике их концентрации как во времени, так и в пространстве.

Целью работы являются экспериментальные исследования по оценке класса качества воды и трофического уровня Телецкого озера в летний период с помощью модифицированной полуэмпирической модели ослабления света.

Материалы и методы исследования

Исследования основных первичных гидрооптических характеристик (показателя ослабления света водой $\epsilon(\lambda)$, показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ и относительной прозрачности Z , измеренной с помощью белого диска Секки) по акватории Телецкого озера выполнили летом в период 23–28 июля 2024 г., организованы Институтом водных и экологических проблем СО РАН. Отбор проб воды с поверхностного слоя Телецкого озера в различных точках (всего 21 точка) брали с помощью батометра с борта научно-исследовательского судна. Картограмма отбора водных проб по акватории озера представлена на рисунке. Уникальность Телецкого озера как объекта исследования заключается в том, что это самый глубокий пресноводный водоем Западной Сибири. Озеро расположено в истоке одной из крупнейших рек мира — Оби. Телецкое озеро — пресноводный, слабоминерализованный, богатый кислородом, холодноводный, проточный горный водоем со снеговым, дождевым и подземным питанием. Это озеро самое глубокое в Западной Сибири, оно занимает 39 место среди 50 глубочайших озер мира. Восточный берег озера и часть акватории входят в состав Государственного природного заповедника «Алтайский» и включено ЮНЕСКО в список объектов мирового наследия в составе комплексного объекта «Золотые горы Алтая».



Картограмма точек отбора проб на Телецком озере

В лаборатории провели 168 отдельных измерений спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды на четырех длинах волн (430, 450, 550 и 670 нм) на стационарном спектрофотометре ПЭ-5400УФ до и после фильтрации проб через мембраны с диаметром пор 0,22 мкм. Затем рассчитали (при натуральном основании логарифма) спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ по формуле

$$\varepsilon(\lambda) = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right), \quad (1)$$

вытекающей из закона Бугера, где L — длина кюветы (в эксперименте использовали кварцевые кюветы длиной 50 мм), $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ — спектральная прозрачность (коэффициент пропускания) в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ — интенсивности прошедшего и падающего на кювету света соответственно, λ — длина волны света. Максимальная абсолютная погрешность измерений $\varepsilon(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ составила 0,1 м⁻¹.

В то же время относительный спектральный вклад оптически активных компонентов воды (взвеси, желтого вещества, хлорофилла-а и чистой воды) в $\varepsilon(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемого водного объекта определили с использованием модифицированной полуэмпирической спектральной модели показателя ослабления света, учитывающей поглощение света терригенными и биогенными частицами [6, с. 133], которая впервые предложена О.В. Копелевичем в работе [2, с. 229] и имеет вид

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

где $\kappa_{\text{хл}}(\lambda)$ и $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ — спектральные показатели поглощения хлорофиллом-а 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. Как видно из данного выражения, спектральное ослабление света описано с помощью трехпараметрической модели. В отличие от ранее выполненных работ, где параметр $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ определяется экспериментально, а $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ находится как разность между измеренным $\varepsilon(\lambda)$ и суммой остальных параметров, нами рекомендован другой подход. Так как в эксперименте определяли параметр $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $\sigma_{\text{вз}}(\lambda)$ можно найти по формуле

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

Нами предложена модифицированная полуэмпирическая модель процесса ослабления света применительно к разнотипным водоемам и водотокам. Она базируется на физической модели, разработанной

и впервые предложенной О.В. Копелевичем, которая заключается в определении спектрального вклада значимых в своем оптическом проявлении компонентов воды в суммарный показатель ослабления света. В научной литературе, посвященной данной проблеме, обычно не учитывается спектральный вклад за счет истинного поглощения света минеральной (терригенной) фракцией водной взвеси ввиду малости мнимой части комплексного показателя преломления частиц. Отчасти это оправданно также вследствие малой концентрации (численности) частиц в морях и океанах, однако во внутренних водоемах суши количество гидрозолей зачастую бывает высоким и требует учета их показателя поглощения в физической модели ослабления света. Показатель поглощения частицами применительно к модифицированной модели нами определяется с использованием экспериментальных данных по их концентрации и средним размерам, а фактор эффективности поглощения — из таблиц по светорассеянию [7]. Таким образом, предложенная нами модифицированная полуэмпирическая модель для описания спектрального вклада основных компонентов воды в $\varepsilon(\lambda)$ во внутренних водоемах и водотоках, учитывающая поглощение света терригенными частицами, является адекватной.

Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}(\lambda)$ определили после измерения спектральной прозрачности воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. Спектральная зависимость показателя поглощения света желтым веществом аппроксимируется экспоненциальным законом

$$\kappa_{\text{жв}}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент спектральной изменчивости, характеризующий качественный состав растворенного органического вещества (РОВ). Следуя работе [8], измерив $\kappa_{\text{жв}}(450)$ (при $\lambda = 450$ нм), определили концентрацию желтого вещества в пробах воды по формуле

$$C_{\text{жв}} = \kappa_{\text{жв}}(450) / \kappa_{\text{уд.жв}}(450). \quad (5)$$

Здесь $C_{\text{жв}}$ — концентрация желтого вещества, в г/м³, $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$ — удельный показатель поглощения света желтым веществом, в м²/г. С учетом предложенного в [8] подхода рассчитаны значения $C_{\text{жв}}$ с использованием величины $\kappa_{\text{уд.жв}}(450)$, взятой из работы [9].

Дополнительно определили стандартным спектрофотометрическим методом согласно [10] концентрации хлорофиллов $C_{\text{хл}}$ а, b, c и каротиноидов, концентрацию общего фосфора $P_{\text{общ}}$ — [11], провели также измерения относительной прозрачности Z с помощью диска Секки. Количество и размеры частиц водной взвеси определили с помощью счетной камеры

Горяева (глубиной 0,1 мм) с использованием светового микроскопа *Axio Lab 1.0* (Carl Zeiss, Германия) при помощи цифровой фотокамеры *Axioscam 208* (Carl Zeiss) с программным обеспечением ZEN 3.0.

Для определения трофического статуса (наряду с концентрациями C_{chl} и $P_{общ}$) использовали значения спектрального показателя ослабления света, где олиготрофному типу водоемов будет соответствовать диапазон значений $\epsilon(\lambda)$ от 0 до 2 м^{-1} , мезотрофному — от 2 до 3 м^{-1} , эвтрофному — от 3 до 23 м^{-1} , гиперэвтрофному — от 23 м^{-1} и более.

Результаты исследования

В результате проведенного экспедиционного выезда в период 23–28 июля 2024 г. по акватории Телецкого озера были получены значения первичных гидрооптических характеристик — показателей ослабления света $\epsilon(\lambda)$, показателей поглощения света желтым веществом $\kappa_{жв}(\lambda)$, относительной прозрачности по белому диску Секки, пространственное распределение которых было неоднородным. В результате экспериментальных данных получено, что рассчитанные значения показателя ослабления света за исследуемый период на озере находились в диапазоне от $0,2$ до $2,4\text{ м}^{-1}$, показателя поглощения света желтым веществом — от $0,1$ до $1,9\text{ м}^{-1}$. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью диска Секки, находились в пределах 3,4–5,9 м со средним значением 4,9 м. Максимальная прозрачность (5,9 м) наблюдалась в пелагиале р. Б. Корбу (в точке 031), минимальная

величина Z (3,4 м) зарегистрирована в литоральной части р. Чулышман (в точке 111).

Известно, что на динамику спектрального показателя ослабления света в воде существенно влияет содержание концентраций взвешенных веществ (минеральных и органических), поэтому для объяснения пространственно-временных изменений характерных значений $\epsilon(\lambda)$ необходимо использовать сведения о концентрации хлорофилла-*a*, которая за время наблюдений варьировала в пределах от $0,2$ до $1,5\text{ мг/м}^3$, средняя величина составила $1,0\text{ мг/м}^3$ (см. табл. 1), что характерно для олиготрофных водоемов [12]. Значение концентрации хлорофилла-*b* в поверхностном слое Телецкого озера за период наблюдений изменялось в пределах от $0,2$ до $0,5\text{ мг/м}^3$, хлорофилла-*c* — от $0,1$ до $0,5\text{ мг/м}^3$, каротиноидов — от $0,8$ до $2,0\text{ мкг/дм}^3$. В целом развитие водорослей фитопланктона озера невысокое, на что влияют низкие концентрации биогенных элементов, а также нестабильность водного столба на протяжении большей части года. Сотрудниками ХАЦ ИВЭП СО РАН установлено, что содержание биогенных элементов — общего фосфора в водах Телецкого озера незначительно и находится на уровне менее 20 мкг/дм^3 , что также является типичным для олиготрофных озер. По комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши [13] по концентрациям общего фосфора $P_{общ}$ озеро Телецкое можно отнести ко 2 классу качества воды — «очень чистая».

Таблица 1

Концентрации хлорофиллов и каротиноидов фитопланктона в поверхностном слое Телецкого озера

Точки	C_{chl-a} , мг/м ³	C_{chl-b} , мг/м ³	C_{chl-c} , мг/м ³	$K_{рo}$, мкг/дм ³	Пигментный индекс
002	1,0	0,4	0,5	1,9	3,9
008	0,6	0,3	0,1	1,0	3,6
014	0,8	0,2	0,3	1,2	3,5
019	1,1	0,4	0,4	1,6	3,4
021	0,9	0,4	0,3	1,4	3,5
023	1,0	0,2	0,2	1,2	3,1
025	1,1	0,4	0,4	1,7	3,5
028	1,2	0,3	0,3	1,6	3,4
031	1,5	0,4	0,4	2,0	3,3
033	0,9	0,3	0,2	1,3	3,4
036	1,1	0,3	0,4	1,6	3,5
037	1,3	0,5	0,5	1,9	3,4
038	1,1	0,2	0,2	1,4	3,3
040	1,3	0,3	0,3	1,7	3,1
045	0,6	0,3	0,3	1,1	3,8
101	0,8	0,3	0,2	1,1	3,2
103	1,3	0,5	0,5	1,6	3,3
106	0,6	0,2	0,3	1,0	3,9
111	0,3	0,2	0,3	0,8	4,8
112	1,1	0,3	0,5	1,7	3,4
113	1,1	0,3	0,4	1,5	3,3

Значения концентрации желтого вещества $C_{жв}$ в поверхностном слое озера изменялись в пределах от $0,9$ до $7,5\text{ г/м}^3$. Величины показателя поглощения

света желтым веществом $\kappa_{жв}(\lambda)$ при $\lambda = 450\text{ нм}$ находились в диапазоне $0,2$ – $1,6\text{ м}^{-1}$. Основные расчетные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}$ при $\lambda=450$ нм и концентрации желтого вещества $C_{\text{жв}}$ в поверхностном слое Телецкого озера

Точки	$\kappa_{\text{жв}}(450), \text{м}^{-1}$	$C_{\text{жв}}, \text{г/м}^3$
002	1,0	4,7
008	0,6	2,8
014	0,6	2,8
019	1,6	7,5
021	1,2	5,7
023	0,2	0,9
025	0,9	4,2
028	0,2	0,9
031	1,2	5,7
033	0,5	2,4
036	0,3	1,4
037	1,5	7,1
038	1,4	6,6
040	1,4	6,6
045	0,4	1,9
101	0,2	0,9
103	1,2	5,7
106	0,6	2,8
111	0,5	2,4
112	1,6	7,5
113	0,5	2,4

Для определения гранулометрического состава и счетной концентрации частиц взвеси использован метод оптической микроскопии. По данным измерений, средневзвешенные радиусы частиц в пробах

воды с поверхностного слоя Телецкого озера находились в интервале $0,7 \div 1,2$ мкм, концентрации — от $3,9 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ до $18,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Таблица 3

Спектральный вклад компонентов озерной воды (%) в показатель ослабления света в поверхностном слое озера Телецкое

$\lambda, \text{нм}$	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления $\varepsilon(\lambda), \text{м}^{-1}$
	$\frac{\kappa_{\text{чв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{жв}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{\text{хл}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{\text{вз}}(\lambda) + \sigma_{\text{моп}}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
002 (при $C_{\text{жв}}-a=1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	83,3	6,6	10,0	1,2
550	9,4	16,7	1,0	72,9	0,6
008 (при $C_{\text{жв}}-a=0,6 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	72,7	4,3	22,9	1,1
550	18,8	33,3	1,0	46,9	0,3
014 (при $C_{\text{жв}}-a=0,8 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	61,5	4,9	33,5	1,3
550	14,1	50,0	1,2	34,7	0,4
019 (при $C_{\text{жв}}-a=1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	79,1	3,6	17,2	2,4
550	5,6	80,0	0,7	13,7	1,0
021 (при $C_{\text{жв}}-a=0,9 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	77,7	4,0	18,2	1,8
550	7,1	75,0	0,6	17,3	0,8
023 (при $C_{\text{жв}}-a=1,0 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	45,4	7,2	47,3	1,1
550	18,8	66,6	2,0	12,6	0,3
025 (при $C_{\text{жв}}-a=1,1 \text{ мг/м}^3$)					
430	0,1	68,7	5,5	25,7	1,6
550	7,1	75,0	0,8	17,1	0,8
028 (при $C_{\text{жв}}-a=1,2 \text{ мг/м}^3$)					

λ , нм	Показатели поглощения			Показатели рассеяния	Показатель ослабления $\varepsilon(\lambda)$, m^{-1}
	$\frac{\kappa_{чв}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{жв}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\kappa_{хл}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	$\frac{\sigma_{вз}(\lambda) + \sigma_{моп}(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$	
031 (при $C_{хл} - a = 1,5$ мг/м ³)					
430	0,1	80,9	5,7	13,3	2,1
550	6,2	88,9	1,0	3,9	0,9
033 (при $C_{хл} - a = 0,9$ мг/м ³)					
430	0,1	63,6	6,5	29,8	1,1
550	28,2	50,0	2,5	19,3	0,2
036 (при $C_{хл} - a = 1,1$ мг/м ³)					
430	0,1	62,5	11,0	26,4	0,8
550	28,2	50,0	3,5	18,3	0,2
037 (при $C_{хл} - a = 1,3$ мг/м ³)					
430	0,1	90,0	5,2	4,7	2,0
550	5,6	70,0	0,8	23,6	1,0
038 (при $C_{хл} - a = 1,1$ мг/м ³)					
430	0,1	89,4	4,6	5,9	1,9
550	7,0	87,5	0,8	4,7	0,8
040 (при $C_{хл} - a = 1,3$ мг/м ³)					
430	0,1	85,0	5,2	9,7	2,0
550	6,2	88,8	0,8	4,2	0,9
045 (при $C_{хл} - a = 0,6$ мг/м ³)					
430	0,1	77,7	5,3	16,9	0,9
550	18,8	66,6	1,0	13,6	0,3
101 (при $C_{хл} - a = 0,8$ мг/м ³)					
430	0,1	75,0	8,0	16,9	0,8
550	28,2	50,0	2,5	19,3	0,2
103 (при $C_{хл} - a = 1,3$ мг/м ³)					
430	0,1	87,5	6,5	5,9	1,6
550	5,6	80,0	0,8	13,6	1,0
106 (при $C_{хл} - a = 0,6$ мг/м ³)					
430	0,1	80,0	4,8	15,1	1,0
550	28,2	50,0	1,5	20,3	0,2
111 (при $C_{хл} - a = 0,3$ мг/м ³)					
430	0,1	77,7	2,7	19,5	0,9
550	28,2	50,0	0,5	21,3	0,2
112 (при $C_{хл} - a = 1,1$ мг/м ³)					
430	0,1	90,0	4,4	5,5	2,0
550	6,2	88,8	0,7	4,3	0,9
113 (при $C_{хл} - a = 1,1$ мг/м ³)					
430	0,1	80,0	8,8	11,1	1,0
550	14,1	25,0	1,7	59,2	0,4

В результате расчетов спектрального вклада оптически активных компонентов озерной воды в спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают желтое вещество и взвесь (табл. 3). Наибольший вклад желтого вещества при $\lambda=430$ нм приходится на пелагиальную часть рек Камга и Самыш, где он составляет 90,0%. При длине волны 550 нм вклад желтого вещества варьирует в пределах от 16,7% (пелагиальная часть р. Чулышман) до 88,9% (пелагиальная часть р. Б. Корбу). Взвесь дает максимальный вклад в показатель ослаб-

ления света при $\lambda=430$ нм в точке 023 (пелагиальная часть м. Вакты) и составляет 47,3%. Вклад взвеси возрастает до 72,9% (точка 002 — пелагиальная часть р. Чулышман) при $\lambda=550$ нм. Чистая вода вносит незначительный вклад в ослабление света при $\lambda=430$ нм на всех точках и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в зеленой области спектра — до 28,2% при $\lambda=550$ нм. Вклад хлорофилла-а при $\lambda=430$ нм находился в диапазоне от 2,7 до 12,0%, при $\lambda=550$ нм — от 0,5 до 3,5%. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимого вклада и составляет около 0,1%. Таким образом, для вод Телецкого озера желтое вещество

и взвесь оказались наиболее значимыми оптически активными компонентами, влияющими на суммарный показатель ослабления света.

Заключение

Таким образом, за время исследований на Телецком озере в 2024 г. были собраны новые летние натурные данные по пространственно-временной изменчивости спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света желтым веществом, относительной прозрачности, концентраций хлорофиллов *a*, *b*, *c*, каротиноидов, желтого вещества и общего фосфора. Применена модифицированная полуэмпирическая модель для описания спектрального вклада основных оптически активных компонентов природной воды в спектральный показатель ослабления света, учитывающая поглощение света терригенными и биогенными частицами. Получены средние счетные концентрации частиц водной взвеси и их средневзвешенный размер с помощью метода оптической микроскопии. Обработано 125 мик-

рофотографий с общим количеством частиц 7864 шт. Результаты многолетних экспериментальных данных по гидрооптическим и гидробиологическим характеристикам в поверхностном слое Телецкого озера, полученные летом в период 2017–2022 гг., подробно рассмотрены в работе [14].

Исследования Телецкого озера летом 2024 г. показали отсутствие значительных изменений в многолетней динамике (за период 2017–2024 гг.) гидрооптических и гидробиологических характеристик, что свидетельствует о сохранении олиготрофности экосистемы и высокого качества воды Телецкого озера в условиях увеличения хозяйственной деятельности на водоеме и его водосборном бассейне. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических и гидробиологических характеристик при исследовании крупных озер для наблюдения за неоднородностью уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворенных веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния вод различного типа.

Библиографический список

1. Левин И.М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7. № 3. С. 3–22.
2. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. *Оптика океана*. Т. 1. Физическая оптика океана / ред. А.С. Монин. М.: Наука, 1983. С. 208–234.
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 278 с.
4. Ерлов Н.Г. Оптика моря / пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 248 с.
5. Mobley C.D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press. San Diego, 1994. 592 p.
6. 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. 176 с.
7. Таблицы по светорассеянию / под общ. ред. К.С. Шифрина. Т. 3. Коэффициенты ослабления, рассеяния и лучевого давления. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 432 с.
8. Маньковский В.И. Желтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 3. С. 53–61.
9. Nyquist G. Investigation of Some Optical Properties of Sea Water with Special Reference to Lignin Sulfonates and Humic Substances: Ph.D. Thesis. Göteborg, 1979. 200 p.
10. ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: 2003. 14 с.
11. РД 52.24.387–2019. Массовая концентрация фосфора общего и фосфора валового в водах. Методика измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Ростов н/Д., 2019. 28 с.
12. Трифонова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла *a* в планктоне // *Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов*. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. С. 158–166.
13. Оксюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // *Гидробиологический журнал*. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–77.
14. Akulova O.B., Bukaty V.I. Long-term Dynamics of Spectral Water Transparency in the Surface Layer of Lake Teletskoye in Summer // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. No 5. P. 1228–1242. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-5-1228>

References

1. Levin I.M. Few-Parameter Optical Models of Seawater Inherent Optical Properties. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2014. Vol. 7. No 3. P. 3–22. (In Russ.).
2. Kopelevich O.V. Low-Parameter Models of Optical Properties of Seawater. *Ocean Optics*. Vol. 1. *Physical Optics of the Ocean*. Moscow: Nauka, 1983. 208–234. (In Russ.).

3. Shifrin K.S. *Introduction to Ocean Optics*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 278 p. (In Russ.).
4. Erlov N.G. *Sea Optics*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 248 p. (In Russ.).
5. Mobley C.D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press. San Diego, 1994. 592 p.
6. Akulova O.B. *Development of Methods and Measuring and Computing Complex for Assessing Environmentally Significant Hydrooptic Characteristics of Freshwater Reservoirs (on the Example of Lakes of the Altai Region)*: Dis. for the Degree of Candidate of Sciences in Technology. Barnaul, 2015. 176 p. (In Russ.).
7. Tables on Light Scattering. Vol. 3. *Attenuation, Scattering and Beam Pressure Coefficients*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 432 p.
8. Mankovskiy V.I. Yellow Substance in the Surface Waters of the Eastern Part of the Tropical Atlantic. *Physical Oceanography*. 2015. No 3. P. 53–61. (In Russ.).
9. Nyquist G. *Investigation of Some Optical Properties of Sea Water with Special Reference to Lignin Sulfonates and Humic Substances*: Ph.D Thesis. Göteborg, 1979. 200 p.
10. GOST 17.1.4.02–90. *Method for Spectrophotometric Determination of Chlorophyll a*. Moscow: Publishing House of Standards, 2003. 14 p. (In Russ.).
11. Guidance Document 52.24.387–2019. *Mass Concentration of Total Phosphorus and Gross Phosphorus in Waters. Measurement Procedure by Photometric Method After Oxidation with Potassium Persulfate*. Rostov-on-Don, 2019. 28 p. (In Russ.).
12. Trifonova I.S. *Assessment of the Water Bodies' Trophic Status According to the Chlorophyll "a" Content in Plankton. Methodical Issues of the Inland Water Bodies' Original Plankton Production Studies*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993. P. 158–166. (In Russ.).
13. Oksiyuk V.N., Zhukinsky L.P., Braginsky L.P., et al. Integrated Ecological Classification of the Inland Surface Waters Quality. *Hydrobiological Journal*. 1993. Vol. 29. No 4. P. 62–77. (In Russ.).
14. Akulova O.B., Bukaty V.I. Long-term Dynamics of Spectral Water Transparency in the Surface Layer of Lake Teletskoye in Summer. *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. No 5. P. 1228–1242. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-5-1228>

Информация об авторах

О.Б. Акулова, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

В.И. Букатый, доктор физико-математических наук, профессор, почетный профессор, Алтайский государственный университет; главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

А.В. Дьяченко, научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия.

Information about the authors

O.B. Akulova, Candidate of Sciences in Technology, Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

V.I. Bukaty, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia;

A.V. Dyachenko, Researcher at the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia.