

УДК 535.8:556.5

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА

О. Б. Акулова, В. И. Букатый, К. В. Марусин

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

Представлены результаты исследований пространственного распределения первичных гидрооптических характеристик – показателя ослабления света ε озерной водой при длине волны 550 нм, показателя поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}$ при длине волны 450 нм, относительной прозрачности Z , измеренной с помощью диска Секки, полученных летом 2018 г. в ходе экспедиций лаборатории гидрологии и геоинформатики ИВЭП СО РАН на Телецком озере (Горный Алтай). Значения ε за исследуемый период находились в диапазоне $0,4\text{--}2,3\text{ м}^{-1}$, $\kappa_{\text{жв}} - 0,5\text{--}3,0\text{ м}^{-1}$ (рассчитаны при натуральном основании логарифма), $Z - 1,0\text{--}11,7\text{ м}$. Концентрация желтого вещества, рассчитанная по измеренному коэффициенту пропускания желтым веществом, варьировала в пределах $2,6\text{--}14,1\text{ г/м}^3$, концентрация хлорофилла – $0,4\text{--}1,8\text{ мг/м}^3$. По данным химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН, среднее значение концентрации общего фосфора в поверхностном слое озера за исследуемый период составило $10,8\text{ мг/м}^3$, общего азота – $731,3\text{ мг/м}^3$, общего углерода – $3,35 \cdot 10^3\text{ мг/м}^3$. Также рассчитан относительный спектральный вклад основных оптически активных компонентов озерной воды (чистой воды, желтого вещества, взвеси, хлорофилла) в показатель ослабления света по акватории исследуемого водоема. Выявлено, что во всех точках (всего 22 точки отбора проб) озера максимальный вклад в ε вносит желтое вещество. Показано, что оптическая структура исследуемого водоема и пространственная изменчивость гидрооптических характеристик тесно связаны с гидрологическим режимом Телецкого озера, с метеорологическими условиями региона и с различными оптически активными компонентами воды, концентрации которых изменяются как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоемных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором. Анализ пространственного распределения показателей ослабления и поглощения света желтым веществом озерной воды показал, что озеро Телецкое существенно отличается не только своими гидрооптическими характеристиками, но также и гидробиологическими, гидрохимическими характеристиками, следовательно, общее ослабление света озерной водой может служить объективным маркером гидрофизической структуры водоема и его экологического состояния.

Ключевые слова: показатели ослабления и поглощения света; прозрачность по диску Секки; растворенное органическое вещество; желтое вещество; хлорофилл; взвесь.

O. B. Akulova, V. I. Bukatyi, K. V. Marusin. SPATIAL VARIABILITY OF HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS OF LAKE TELETSKOYE

The paper presents the results of studies of the spatial distribution of primary hydro-optical characteristics, in particular, light attenuation ε by lake water at a wavelength of 550 nm, light absorption by yellow substance κ_{ys} at a wavelength of 450 nm, and rela-

tive transparency Z measured with Secchi disk. The data were obtained in summer 2018 during field surveys of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics of IWEF SB RAS on Lake Teletskoye (Altai Mountains). The values of ε for the study period were within $0.4\text{--}2.3\text{ m}^{-1}$, $\kappa_{ys} - 0.5\text{--}3.0\text{ m}^{-1}$ (calculated at natural logarithm base), $Z - 1.0\text{--}11.7\text{ m}$. The yellow substance concentration calculated by the measured transmittance of yellow substance, varied within $2.6\text{--}14.1\text{ g/m}^3$, the chlorophyll concentration – $0.4\text{--}1.8\text{ mg/m}^3$. According to the data from the chemical analytical center of IWEF, the average concentration of total phosphorus in the surface layer of the lake during the study period was 10.8 mg/m^3 , total nitrogen – 731.3 mg/m^3 , total carbon – $3.35 \cdot 10^3\text{ mg/m}^3$. Besides, the relative spectral contribution of major optically active components of lake water (pure water, yellow substance, suspended matter and chlorophyll) to light attenuation across the lake water area was estimated. It was found that yellow substance makes the largest contribution to ε at all sampling points (22) of the lake. It is shown that the optical structure of the lake and the spatial variability of hydro-optical characteristics are closely related to the hydrological regime of the lake, meteorological conditions in the region and various optically active water components, whose concentration changes both in time and space under the influence of processes inside the lake in association with the catchment. The analysis of the spatial distribution of the indices of light attenuation and absorption by yellow substance in the lake water showed that Lake Teletskoye stands out not only for its hydro-optical characteristics, but also its hydrobiological and hydrochemical characteristics. Hence, the total light attenuation by lake water can serve as an objective marker of the hydrophysical structure of the lake and its ecological state.

Key words: coefficients of light attenuation and absorption; Secchi disk transparency; dissolved organic matter; yellow substance; chlorophyll; suspended matter.

Введение

Водные экосистемы (от океанских и морских до небольших континентальных водоемов и водотоков) с чрезвычайно разнообразными условиями существования, определяющими их естественное функционирование, представляют интерес как с научной теоретической точки зрения для понимания принципов и механизмов их функционирования, так и с практической, связанной прежде всего с проблемами качества питьевой воды, а также проблемами эффективности рыболовства, использования для рекреационных целей и т. д. Например, всестороннее изучение озер невозможно без регулярных систематических исследований гидрооптических показателей, характеризующих состояние водных объектов и процессы их изменчивости на основе широкого использования измерительных приборов и методов. Известно [Оптика..., 1983; Шифрин, 1983; Маньковский, 1996; Апонасенко, 2001; Левин, 2014], что гидрооптические характеристики, используемые для количественной оценки условий распространения света в воде, разделяются на первичные, характеризующие оптические свойства природных вод (показатели ослабления, поглощения и рассеяния света, индикаторы и матрицы рассеяния света, коэффициент пропускания слоя водной среды, относительная прозрачность) и вторичные, описывающие состояние светового поля в природных водах

и в атмосфере над ними (яркость, облученность и др.).

Значения первичных гидрооптических характеристик, а именно величины спектрального показателя ослабления света зависят от количественного и качественного составов взвешенных частиц, хлорофилла, растворенного в воде органического вещества, а также от их спектрального вклада в этот показатель [Ерлов, 1980; Копелевич, Шифрин, 1981; Матюшенко и др., 2001; Маньковский, Маньковская, 2008; Маньковский, 2011; Kirk, 2011; Thrane et al., 2014; Slade, Boss, 2015; Shi et al., 2017; Betancur-Turizo et al., 2018]. В работах [Маньковский, Земляная, 1989; Апонасенко, 2001; Левин и др., 2011] проводились попытки выявить зависимость между показателем ослабления света ε и относительной прозрачностью по диску Секки Z , но однозначной зависимости не получено. На основании проделанных работ ряд исследователей приходят к выводу, что приближенно $\varepsilon = \frac{\alpha}{Z}$, где α – постоянная величина, которая применительно к разным водным объектам изменяется от 0,8 до 10. Уже этот факт показывает, что глубина исчезновения белого диска Z не связана однозначным образом с показателем ослабления света.

Анализ пространственного распределения значений ε показал, что оно зависит от физико-химико-биологических и динамических процессов, интенсивность, изменчивость, пе-

риодичность и масштабы которых в пространстве водоемов неодинаковы [Матюшенко и др., 1995; Кукушкин и др., 2004, 2010; Матюшенко, 2005; Маньковский, 2012].

Цель работы – изучить особенности пространственного распределения гидрооптических характеристик Телецкого озера, а также оценить спектральный вклад показателей поглощения и рассеяния света основными оптически активными компонентами озерной воды в показатель ослабления света в поверхностном слое водоема летом 2018 г.

Материалы и методы

Объект исследования. Исследования проводили летом 2018 г., в период с 19 по 23 июня, на Телецком озере (51°21'46"–51°48'36" с. ш., 87°14'40"–87°50'54" в. д.), расположенном в северо-восточной части Горного Алтая. Озеро Телецкое – самое глубокое в Западной Сибири, оно занимает 39 место среди глубочайших озер мира. Восточный берег и часть акватории входят в состав Алтайского государственного природного биосферного заповедника «Алтайский». В 1998 г. озеро включено ЮНЕСКО в Список объектов мирового наследия в составе комплексного объекта «Золотые горы Алтая». Основные морфометрические и батиметрические характеристики исследуемого водоема [Селегей и др., 2001]: площадь зеркальной поверхности – 227,3 км²; площадь водосборного бассейна – 20 400 км²; длина по медиане – 78,6 км; длина береговой линии – 192,8 км; максимальная ширина – 5,2 км; средняя ширина – 2,9 км; максимальная глубина – 323,0 м; средняя глубина – 181,0 м; объем – 41,0 км³; средняя высота зеркала озера над уровнем моря, рассчитанная за многолетний период 1931–1999 гг., – 434,0 м. Бассейн озера представляет собой горную страну со средней высотой гор 1940 м, отдельные вершины на юго-востоке достигают высоты 3000–3350 м, на крайнем северо-западе – 700–1300 м. Телецкое озеро имеет вытянутую руслообразную форму и состоит из двух частей: меридиональной, южной, протяженностью 50 км, с глубинами 100–323 м, и широтной, северо-западной, протяженностью 28 км, с глубинами 10–40 м. Южную часть озера, в свою очередь, можно условно разделить на подзоны: пелагиаль, сублитораль и литораль. Литоральная и сублиторальная зоны по площади незначительны, но различны по морфометрическим характеристикам, строению дна и берегов, климатическим, ледово-термическим и другим особенностям режима [Селегей, Селегей, 1978]. По сравнению с пе-

лагиальной (глубоководной) литоральная зона в Телецком озере имеет ряд особенностей, одна из которых – значительное гидродинамическое воздействие, связанное с интенсивными ветроволновыми процессами (максимальная высота волны до 3,5 м) и со значительными (до 6 м) ежегодными колебаниями уровня воды. Суточные колебания в июне достигают 50–60 см. Подъем уровня наблюдается в период талых вод (апрель–июнь), затем происходит плавный спад, нарушаемый дождевыми паводками в июле–октябре. Наивысший уровень приходится на июнь – период снеготаяния в горах, минимальный уровень наблюдается в марте. На озере круглогодично отмечаются сейши высотой 0,5–6 см. Полный водообмен в озере происходит за 5–7 лет. Особенности волнового режима на водоеме обусловлены наличием здесь ветровых потоков двух господствующих направлений: с юга на север дует «верховка», в противоположном направлении – «низовка». При «верховке» стоит ясная солнечная погода, а «низовка» сопровождается понижением температуры, осадками и сильным волнением – высота волн может достигать 3,0–3,5 м. Телецкое озеро – единственный из сибирских пресноводных водоемов, на котором полный ледостав периодически отсутствует. В районе северо-западного мелководья оно замерзает в конце ноября, в области нарастания глубин у мыса Ажи – в конце января, в южной части озера – в начале февраля. Вскрытие водоема происходит в конце апреля – начале мая. По данным космоснимков, вскрытие озера в 2018 г. началось 12 апреля, к 22 апреля площадь водной поверхности, освобожденной от льда, составила свыше 70 %. В середине мая озеро освободилось от льда полностью. По классификациям Иосимур и Фореля Телецкое озеро относится к водоемам умеренного типа, для которых характерна смена прямой и обратной стратификации, разделенных периодами осенней и весенней гомотермии [Селегей и др., 2001]. Озеро димиктичное с двумя периодами конвективного перемешивания до максимальных глубин – май–июль и октябрь–декабрь. Впадает в озеро около 70 рек и 150 временных водотоков, причем 70 % всей воды дает река Чулышман, впадающая с юга. Отдавая свои воды реке Бие (98 % водостока), озеро в значительной мере обеспечивает питание реки Оби. Изрезанность береговой линии озера выражена слабо, бухт и заливов мало, самые большие – Камгинский и Кыгинский с площадью 6,5 и 3,1 км² соответственно. Камгинский залив – самый мелководный, защищенный от волнений и наиболее благоприятный для

высшей водной растительности (которая в озере развита слабо) по термическому режиму и характеру грунтов из всех заливов Телецкого озера. В связи с тем, что зарастание озера наблюдается только в этих заливах, приустьевых участках крупных рек и в районе северо-западного мелководного плеса, по интенсивности зарастания водоем можно считать слабо зарастающим. По гидрохимическому режиму это слабоминерализованный, богатый кислородом горный водоем с низкими температурами, с незначительным содержанием органических и биогенных веществ в воде.

Методы измерений. Измерения гидрооптических характеристик в пробах воды, взятых с поверхностного слоя озера (это глубина, т. е. расстояние от границы воздух – водная поверхность, 10–15 см), проводили с помощью спектрофотометра ПЭ-5400УФ в режиме измерений коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды, затем рассчитывали показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$. В данном исследовании гидрооптические характеристики определяли только в поверхностном слое водоема, распределение их по глубинам в озере нами рассматривалось, но в эту работу материал не был включен. Точки отбора проб и их координаты представлены в табл. 1. Показатель поглощения света желтым веществом $\kappa_{жв}(\lambda)$ определяли после измерения спектральной прозрачности озерной воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. В общей сложности за период экспедиций было обработано и проанализировано 22 пробы, проведено 528 отдельных измерений коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды на приборе. Для всех проб выполнялось по два измерения (до и после фильтрации проб) для каждой из длин волн в диапазоне от 400 до 800 нм (12 спектральных участков). Расчеты проводили по формуле $\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T(\lambda))$, вытекающей из закона Бугера, где L – длина кюветы, $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ – прозрачность в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ – интенсивности прошедшего и падающего света соответственно, λ – длина волны света. Погрешность определения величины $\varepsilon(\lambda)$ обусловлена систематической относительной погрешностью измерения коэффициента пропускания $(\Delta T(\lambda)/T(\lambda)) \cdot 100\%$ с помощью спектрофотометра (по паспорту прибора), систематической погрешностью определения длины кюветы $(\Delta L/L) \cdot 100\%$ и случайной погрешностью измерений коэффициента пропускания. Максимальная абсолютная погрешность показателя ослабления света и по-

казателя поглощения света желтым веществом составила около $0,1 \text{ м}^{-1}$. В работе также проводили измерения относительной прозрачности Z с использованием диска Секки.

Для обработки гидрооптических данных использовали пакет программ Microsoft Excel как наиболее известный и доступный [Макарова, Трофимец, 2002]. Дополнительно определяли стандартным спектрофотометрическим методом согласно [ГОСТ..., 2003] концентрацию хлорофилла Chl_a в ацетоновых экстрактах водорослей фитопланктона, концентрацию общего фосфора $P_{общ}$ [РД..., 2006], общего азота $N_{общ}$ [ГОСТ..., 2016] и общего углерода $C_{общ}$ [ГОСТ..., 2013].

По методике из статьи [Маньковский, 2015], измерив $\kappa_{жв}(450)$ при $\lambda = 450 \text{ нм}$, определяли концентрацию желтого вещества в озерной воде по формуле $C_{жв} = \kappa_{жв}(450)/\kappa_{уд.жв}(450)$, где $C_{жв}$ – концентрация желтого вещества, в г/м^3 , $\kappa_{уд.жв}(450)$ – удельный показатель поглощения света желтым веществом, в $\text{м}^2/\text{г}$. В работе [Nyquist, 1979] рассчитаны значения $\kappa_{уд.жв}(\lambda)$ при длине волны 450 нм. Поэтому вопрос, насколько величина $\kappa_{уд.жв}(450)$, приводимая в ней, является универсальной, т. е. пригодной для различных крупных водных объектов, до сих пор считается неясным. С учетом предложенного в [Маньковский, 2015] подхода рассчитаны значения $C_{жв}$ с использованием величины $\kappa_{уд.жв}(450)$, взятой из работы [Nyquist, 1979]. В настоящее время в научной литературе отсутствуют данные, которые бы свидетельствовали о неприемлемости данного подхода, рассмотренного в [Nyquist, 1979] и использованного известным ученым В. И. Маньковским [2015]. Это характеризуется также и тем, что процессы образования желтого вещества (оно появляется двумя путями: непосредственно в самом водоеме – при распаде отмершего планктона, живых организмов и продуктов их жизнедеятельности и извне – путем смыва с водосбора гумусовых веществ) в различных крупных водных объектах являются близкими.

Относительный спектральный вклад компонентов озерной воды (чистой воды, желтого вещества, взвеси, хлорофилла) в ε в поверхностном слое исследуемого озера рассчитан с использованием спектральной физической модели ослабления света, предложенной О. В. Копелевичем в работе [Оптика..., 1983]. Модифицированная модель ослабления света описана более подробно в [Суторихин и др., 2016].

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований были получены первичные гидрооптические ха-

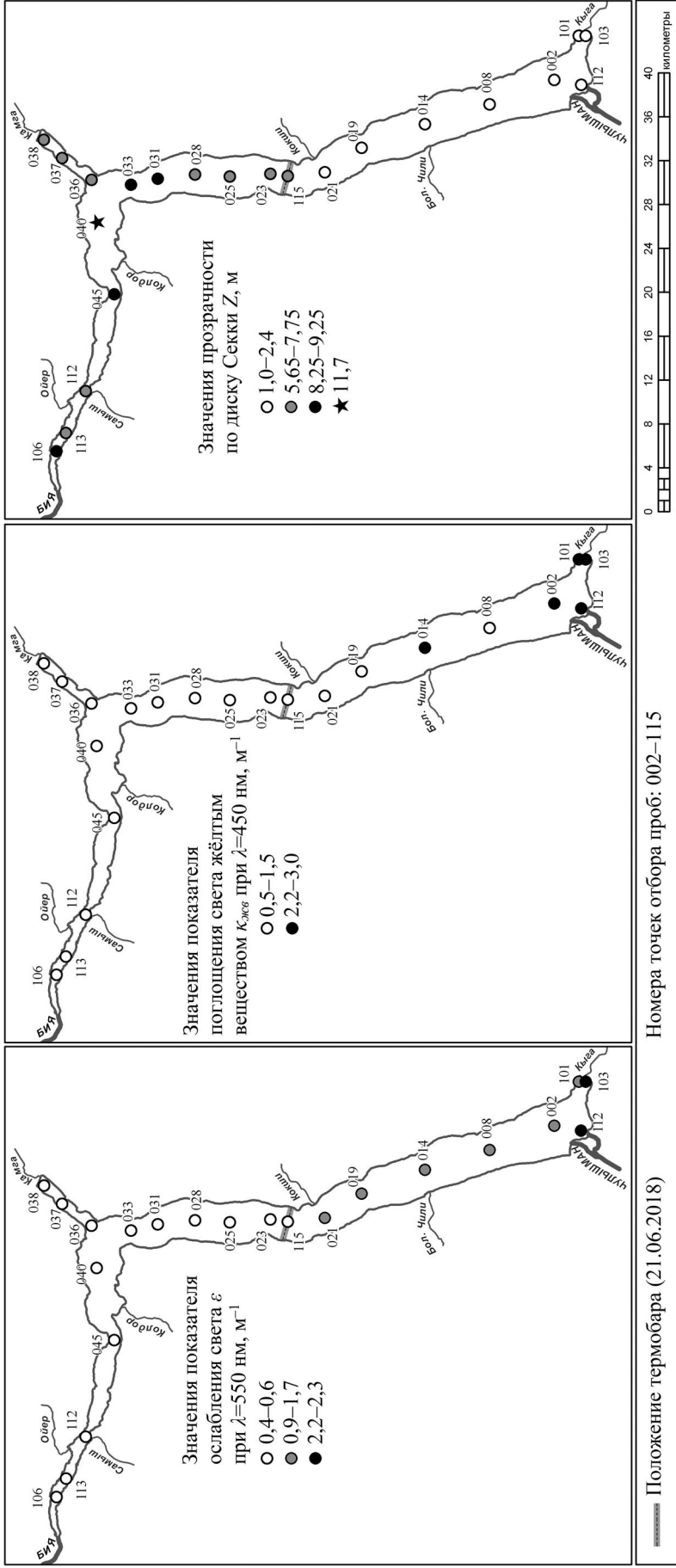
Таблица 1. Точки отбора проб и их координаты

Table 1. Sampling sites and their coordinates

Точки Points	Топонимическое название Toponymic name	Координаты Coordinates
002	р. Чулышман (пелагиаль) riv. Chulyshman (pelagial)	N51.377979°, E87.785950°
008	п. Беле (пелагиаль) sett. Bele (pelagial)	N51.431219°, E87.754759°
014	р. Чулюш (пелагиаль) riv. Chulyush (pelagial)	N51.484329°, E87.729600°
019	м. Сыракту (пелагиаль) cape Syraktu (pelagial)	N51.536389°, E87.699309°
021	р. Кокши (пелагиаль) riv. Kokshi (pelagial)	N51.566719°, E87.667690°
023	м. Вакты (пелагиаль) cape Vaktu (pelagial)	N51.611369°, E87.666289°
025	р. Адамыш (пелагиаль) riv. Adamysh (pelagial)	N51.644630°, E87.663039°
028	р. Талду-Коол (пелагиаль) riv. Taldu-Kool (pelagial)	N51.673009, E87.666040°
031	р. Б. Корбу (пелагиаль) riv. B. Korbu (pelagial)	N51.703650°, E87.661079°
033	м. Отык-Таш (пелагиаль) m. Otyk-Tash (pelagial)	N51.725529°, E87.653270°
036	р. Камга (пелагиаль) riv. Kamga (pelagial)	N51.757910°, E87.660340°
037	р. Камга (пелагиаль) riv. Kamga (pelagial)	N51.781840°, E87.689480°
038	р. Камга (литораль) riv. Kamga (littoral)	N51.796559°, E87.713940°
040	п. Яйлю (пелагиаль) sett. Yaiyu (pelagial)	N51.753989°, E87.604159°
045	м. Ажу (пелагиаль) cape Azhu (pelagial)	N51.740009°, E87.508769°
101	р. Кыга (пелагиаль) riv. Kuga (pelagial)	N51.357529°, E87.823099°
103	р. Кыга (литораль) riv. Kuga (littoral)	N51.351900°, E87.843240°
106	с. Артыбаш (пелагиаль) sett. Artybash (pelagial)	N51.787989°, E87.301630°
111	р. Чулышман (литораль) riv. Chulyshman (littoral)	N51.356019°, E87.779039°
112	р. Самыш (пелагиаль) riv. Samysh (pelagial)	N51.763839°, E87.381160°
113	Каменный залив (пелагиаль) Kamennyi Bay (pelagial)	N51.780219°, E87.325799°
115	Граница Термобара (21.06.18) Termobar's border (21.06.18)	N51.597008°, E87.663134°

рактические – показатели ослабления света ε и поглощения света желтым веществом $\kappa_{\text{жв}}$, а также относительная прозрачность Z , пространственное распределение которых представлено на рисунке. Так, вблизи устьев рек Чулышман и Кыга (в литоральной зоне) величины показателя ослабления света при длине волны 550 нм имели максимальные значения – 2,2 и 2,3 м⁻¹ соответственно. Очевидно, что это связано с интенсивным выносом взвесей (преимущественно терригенного происхождения) речными водами и процессами разрушения берегов. В этой зоне прибрежного мелководья ветроволновые течения поднимают донные осадки и перемешивают их по всей водной толще. Соответственно, здесь будут минимальные

значения прозрачности Z , определяемой по глубине исчезновения диска Секки, – 1,0–2,4 м, на которую заметно влияют взвешенные в воде вещества. По мере проникновения в Телецкое озеро (в пелагиальную зону) на север до границы термобара (в области двух температурных зон в точке 115 температура воды в поверхностном слое южнее этой точки (теплый слой) составила +10...+12 °С, севернее (холодный слой) – +3,6...+4,0 °С) значения ε понижаются до 0,9–1,7 м⁻¹. Термобар влияет на экосистему озера, так как он разделяет две зоны с разными характеристиками воды, что определяет пространственные различия не только гидрооптических характеристик, но и гидробиологических. А вот по величинам $\kappa_{\text{жв}}$ при длине вол-



Картограмма распределения гидрооптических характеристик Телецкого озера
 Schematic map of hydrooptical characteristics distribution of Lake Teletskoye

ны 450 нм видно, что в основном оптическая структура поверхностного слоя в южной части озера (до м. Сыракту) практически однородна (исключение – район поселка Беле, в точке 008 – $1,5 \text{ м}^{-1}$), где значения варьировали в пределах $2,2\text{--}3,0 \text{ м}^{-1}$, с уменьшением их в северо-западной части водоема до $0,5\text{--}1,5 \text{ м}^{-1}$. На картосхеме отчетливо прослеживается повышение прозрачности вод в глубоководной части озера, где зафиксирована максимальная относительная прозрачность – 11,7 м, дополнительным подтверждением этому служит и распределение величин ε с пониженными значениями ($0,4\text{--}0,6 \text{ м}^{-1}$), которые наблюдались в широтной северо-западной части исследуемого водоема. Конечно, гидрооптическая структура Телецкого озера тесно связана с его гидрологическим режимом и метеорологическими условиями региона, а также с оптически активными компонентами воды, концентрации которых изменяются как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоемных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором. А так как водосбор – это территория суши, с которой вода с осадочным и растворенным в ней материалом стекает в водоем, то количественный и качественный состав оптически активных компонентов воды и их соотношение будут разными по акватории озера.

В соответствии с метеоданными, полученными с помощью метеостанций научно-исследовательского судна, дневная температура воздуха в период исследования (19–23 июня) изменялась от $+9,2$ до $+30,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость ветра варьировала в пределах $0,0\text{--}8,9 \text{ м/с}$, атмосферное давление – $716,1\text{--}722,6 \text{ мм. рт. ст.}$, влажность – $41\text{--}88 \%$. Температура поверхностного слоя воды в различных точках отбора проб была в пределах $+3,6\text{...}+15,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Говоря о климате, следует сказать, что в целом климат долины озера континентальный: в горах суровый с очень холодной зимой, а внизу, в прибрежной полосе, мягкий. Здесь ярко выражена так называемая вертикальная зональность. В противоположных концах озера в любое время года температура воздуха также неодинакова. Среднегодовая температура воздуха в южной части озера положительная (около $+4 \text{ }^\circ\text{C}$), тогда как в северной (село Артыбаш) она едва превышает один градус. Особенностью климата является то обстоятельство, что в любое время года в горах бывают отрицательные температуры, а у озера в течение всей зимы положительные. В горах и в летнее время наблюдаются значительные суточные колебания температуры. Наиболее увлажненный район бассейна озера северный. Здесь выпадает до

1000 мм осадков в год, тогда как в южной части вдвое меньше. Наибольшее количество осадков приходится на летние месяцы, поэтому в целом лето дождливое, но с частыми прояснениями [Селегей, Селегей, 1978].

Рассчитанные значения концентрации желтого вещества $C_{\text{жв}}$ в поверхностном слое озера Телецкое за исследуемый период находились в диапазоне $2,6\text{--}14,1 \text{ г/м}^3$ (табл. 2) со средним значением $6,5 \text{ г/м}^3$. По данным [Coble, 2007] считается, что желтое вещество составляет до 70 % растворенного органического вещества, которое в значительной степени определяет оптические свойства природных вод, влияя на глубину фотического слоя и играя важную роль в ряде биохимических и фотохимических процессов. В результате расчетов спектрального вклада компонентов озерной воды в спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что максимальный вклад в $\varepsilon(\lambda)$ вносит именно желтое вещество. Наибольший вклад желтого вещества при $\lambda = 430 \text{ нм}$ приходится на пелагиаль рек Камга (точка 036) и Чулышман (точка 002), где он составляет 94,1 и 90,9 % соответственно. При длине волны 550 нм вклад желтого вещества варьирует в пределах от 40,0 % (точка 025 – пелагиаль р. Адамыш) до 91,3 % (точка 103 – литораль р. Кыга). Взвесь дает максимальный вклад в показатель ослабления при $\lambda = 430 \text{ нм}$ в точке 119 (пелагиаль м. Сыракту) и составляет 33,4 %. Вклад взвеси возрастает до 47,8 % (точка 025) при $\lambda = 550 \text{ нм}$. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430 \text{ нм}$ на всех точках и составляет не более 0,4 %, но этот вклад резко увеличивается в длинноволновой области – до 14,1 % при $\lambda = 550 \text{ нм}$. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430 \text{ нм}$ находился в диапазоне от 1,8 % (точка 021 – пелагиаль р. Кокши) до 5,0 % (точка 115 – граница термобара, 21.06.2018), при $\lambda = 550 \text{ нм}$ – от 0,3 % (точка 021) до 1,2 % (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю). Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимого вклада и составляет около 0,1 %.

Дополнительно для определения трофического статуса озера рассчитывали концентрации хлорофилла a Chl_a , которые за исследуемый период (19–23 июня 2018 г.) находились в диапазоне $0,4\text{--}1,8 \text{ мг/м}^3$, средняя величина составила $0,8 \text{ мг/м}^3$. Максимальные значения Chl_a выявлены для мелководных, защищенных от волноприбойных процессов хорошо прогреваемых участков зарастающей макрофитами литорали. Минимальные значения Chl_a в по-

Таблица 2. Лимнологические характеристики Телецкого озера

Table 2. Limnological characteristics of Lake Teletskoye

Точки Points	Z, м Z, m	$\varepsilon(550)$, м ⁻¹ $\varepsilon(550)$, m ⁻¹	$\kappa_{жв}(450)$, м ⁻¹ $\kappa_{ys}(450)$, m ⁻¹	$C_{жв}$, г/м ³ C_{ys} , g/m ³	Chl_a , мг/м ³ Chl_a , mg/m ³	$P_{общ}$, мг/м ³ P_{tot} , mg/m ³	$N_{общ}$, мг/м ³ N_{tot} , mg/m ³	$C_{общ}$, мг/м ³ C_{tot} , mg/m ³
002	1,25	1,6	2,6	12,4	1,4	13,0	523,0	1700
008	1,7	0,9	1,5	7,0	0,8	<10,0	812,0	4200
014	1,4	1,6	2,2	10,6	1,0	14,0	764,0	6700
019	1,25	1,2	1,3	6,3	1,2	12,0	742,0	3200
021	2,4	1,0	1,4	6,4	0,5	<10,0	653,0	5700
023	5,65	0,6	1,0	5,0	0,6	<10,0	822,0	2000
025	5,75	0,5	0,5	2,6	0,7	<10,0	692,0	4600
028	6,25	0,6	1,1	5,2	0,5	<10,0	752,0	2800
031	8,5	0,4	0,7	3,4	0,4	<10,0	782,0	<1500
033	8,3	0,4	0,7	3,4	0,5	<10,0	802,0	<1500
036	7,3	0,6	1,3	6,1	0,7	<10,0	932,0	<1500
037	7,3	0,6	1,3	6,1	0,7	<10,0	562,0	<1500
038	6,5	0,6	1,0	4,4	0,4	<10,0	802,0	1700
040	11,7	0,5	1,0	4,4	0,9	<10,0	472,0	9100
045	9,25	0,4	0,7	3,4	0,6	<10,0	842,0	<1500
101	1,2	1,7	2,4	11,5	1,3	13,0	504,0	3400
103	1,25	2,3	3,0	14,1	1,8	12,0	526,0	1900
106	8,25	0,4	1,0	4,5	0,5	<10,0	992,0	2500
111	1,0	2,2	2,5	12,0	1,5	14,0	445,0	3500
112	7,5	0,6	1,3	6,1	0,5	<10,0	812,0	5300
113	7,75	0,4	0,7	3,5	0,6	<10,0	1032,0	2100
115	5,75	0,6	1,2	5,8	1,0	<10,0	824,0	5600

Примечание. Z – относительная прозрачность, измеренная с помощью диска Секки, $\varepsilon(550)$ – спектральный показатель ослабления света при $\lambda = 550$ нм, $\kappa_{жв}(450)$ – спектральный показатель поглощения света желтым веществом при $\lambda = 450$ нм, $C_{жв}$ – концентрация желтого вещества, Chl_a – концентрация хлорофилла а, $P_{общ}$ – концентрация общего фосфора, $N_{общ}$ – концентрация общего азота, $C_{общ}$ – концентрация общего углерода.

Note. Z – Secchi disk transparency, $\varepsilon(550)$ – spectral coefficients of light attenuation at $\lambda = 550$ nm, $\kappa_{жв}(450)$ – spectral coefficients of light absorption by yellow substance at $\lambda = 450$ nm, $C_{жв}$ – concentration of yellow substance, Chl_a – concentration of chlorophyll a, P_{tot} – concentration of the total phosphorus, N_{tot} – concentration of the total nitrogen, C_{tot} – concentration of the total carbon.

верхностном слое отмечены на участках открытой пелагиали. Активный волноприбойный процесс и изменение уровня воды в озере создают нестабильные условия для вегетации водорослей фитопланктона. Наличие фосфора в воде Телецкого озера отмечено во всех точках отбора проб. Его содержание в поверхностном слое колебалось в интервале <10,0–14,0 мг/м³ (табл. 2) со средним значением за период исследования, равным 10,8 мг/м³. Средняя величина концентрации общего азота составила 731,3 мг/м³, общего углерода – 3,35·10³ мг/м³. Согласно классификации [Оксиюк и др., 1993] по содержанию биогенных элементов качество воды озера Телецкое соответствует разряду «очень чистых» и «вполне чистых» вод.

Для определения трофности исследуемого водоема наряду с трофическим индексом Карлсона (Trophic State Index) [Carlson, 1977] использовали рассчитанные нами значения спектрального показателя ослабления света [Суторихин и др., 2016]. В результате экспериментов установлено, что трофический статус оз. Телецкое в различных точках отбора проб можно охарактеризовать как олиготрофный водоем с элементами мезотрофии на литорали, на участках впадения крупных притоков и расположения населенных пунктов.

Заключение

На примере пресноводного слабоминерализованного холодноводного проточного горного водоема (Телецкое озеро, Горный Алтай) в работе проанализировано пространственное распределение первичных гидрооптических характеристик – спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света желтым веществом по измерениям коэффициента пропускания (спектральной прозрачности) воды в пробах, отобранных в поверхностном слое и профильтрованных через мембраны с диаметром пор 0,22 мкм, а также относительной прозрачности воды, измеренной с помощью диска Секки. В условиях особенного гидрологического, а также сложного гидротермического режимов Телецкого озера, которые обусловлены большой глубиной, господством постоянных горных ветров в горной долине, значительным внешним водообменом (5–7 лет) и значительным влиянием водосборного бассейна (отношение площади водного зеркала к площади водосбора равно 1:90; для сравнения: у озера Байкал – 1:17) формируются зоны с различными гидрооптическими характеристиками (ε и $\kappa_{жв}$), значения которых в литоральной (прибрежной

мелководной) части водоема в местах впадения рек Чулышман и Кыга выше, чем в глубоководной (пелагиальной) части. Рассчитаны концентрации хлорофилла, желтого вещества и биогенных элементов, в распределении которых по акватории озера наблюдается неоднородность. Определен спектральный вклад оптически активных компонентов (чистой воды, желтого вещества, взвеси и хлорофилла) в показатель ослабления света для поверхностного слоя озера в различных точках отбора проб. Отмечен максимальный вклад желтого вещества в суммарное ослабление света. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических характеристик при исследовании крупных озер для наблюдения за распространением уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворенных веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния вод.

Выражаем благодарность сотрудникам химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН под руководством д. х. н. Т. С. Папиной за предоставленные данные измерений концентраций общего фосфора, азота и углерода, А. В. Дьяченко – за метеоданные.

Работа выполнена в рамках госбюджетного проекта ИВЭП СО РАН № 0383-2016-0002 «Изучение гидрологических и гидрофизических процессов в водных объектах и на водосборах Сибири и их математическое моделирование для стратегии водопользования и охраны водных ресурсов».

Литература

Апонасенко А. Д. Количественные закономерности функциональной организации водных экосистем в связи с их дисперсной структурой: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Красноярск, 2001. 316 с.

ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М.: Изд-во стандартов, 2003. С. 587–600.

ГОСТ 31958–2012. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода. М.: Стандартинформ, 2013. 12 с.

ГОСТ 33045–2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ (с поправкой). М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

Ерлов Н. Г. Оптика моря / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 248 с.

Копелевич О. В., Шифрин К. С. Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 4–55.

Кукушкин А. С., Агафонов Е. А., Бурлакова З. П., Еремеева Л. В. Изменчивость прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном

слое северо-западной части Черного моря // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 870–881.

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. Т. 23, № 8. С. 730–736.

Левин И. М. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 3. С. 3–22.

Левин И. М., Родионов М. А., Французов О. Н. Погружаемый измеритель показателя ослабления света морской водой // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 5. С. 59–63.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Маньковский В. И. Желтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 3. С. 53–61.

Маньковский В. И. Основы оптики океана (методическое пособие). Севастополь: Изд-во МГИНАНУ, 1996. 119 с.

Маньковский В. И. Оптические характеристики вод восточной части северо-западного шельфа Черного моря в весенний период // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 61–68.

Маньковский В. И. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 5. С. 14–29.

Маньковский В. И., Земляная Л. А. Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. С. 82–85.

Маньковский В. И., Маньковская Е. В. Использование биооптических связей для определения характеристик состояния морской среды при проведении оптического мониторинга в Черном море с применением прозрачномеров // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 2. С. 37–45.

Матюшенко В. А. Пространственно-временная изменчивость гидрооптических характеристик Белого моря // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: Материалы IX Междунар. конф. (Петрозаводск, 11–14 октября 2004 г.). Петрозаводск, 2005. С. 215–223.

Матюшенко В. А., Лукин Л. Р., Хоменко Г. Д., Галеркин Л. И. Показатель ослабления света и его связи с гидрологическими характеристиками и содержанием взвешенного вещества в водах Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А. Л. Лисицына, М. Е. Виноградова, Е. А. Романкевича. М.: Научный мир, 2001. С. 432–442.

Матюшенко В. А., Попов И. К., Мисюченко И. Л. Пространственное распределение показателя ослабления света в водах Карского моря // ДАН РФ. 1995. Т. 342, № 3. С. 403–406.

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

Оптика океана / Под ред. А. С. Моница. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 372 с.

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.

Селегей В. В. Телецкое озеро: очерки истории. Кн. 3. Барнаул: Пять плюс, 2011. 244 с.

Селегей В. В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я., Высоцкий Е. М., Перепелова Т. И. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера // Тр. Департамента геологии и минералогии. Королевский Музей Центральной Африки, Тервюрен, Бельгия. 2001. Т. 105. 310 с.

Селегей В. В., Селегей Т. С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.

Суторихин И. А., Букатый В. И., Харламова Н. Ф., Акулова О. Б. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края / Отв. ред. В. Н. Седалищев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т вод. и экол. проблем; М-во образования и науки РФ, Алт. гос. ун-т. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 162 с.

Шифрин К. С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.

Betancur-Turizo S. P., González-Silvera A. G., Santamaría-Del-Ángel E., Millán-Núñez R., Millán-Núñez E., García-Nava H., Godínez V. M., Sánchez-Velasco L. Va-

riability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California // Open Journal of Marine Science. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 20–37. doi: 10.4236/ojms.2018.81002

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369.

Coble P. G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of Ocean color // Chemical Rev. 2007. Vol. 107. P. 402–418.

Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 649 p. doi: 10.1017/CBO9781139168212

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances: PhD Thesis, Dept. Analytical and Marine Chemistry, Göteborg University, Göteborg, Sweden, 1979. 200 p.

Shi L., Mao Z., Wu J., Liu M., Zhang Y., Wang Z. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu // Water. 2017. Vol. 9, iss. 5. 352 p. doi: 10.3390/w9050352

Slade W. H., Boss E. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size // Applied Optics. 2015. Vol. 54, no. 24. P. 7264–7277. doi: 10.1364/AO.54.007264

Thrane J. E., Hessen D. O., Anderson T. The absorption of light in lakes: negative impact of organic carbon on primary productivity // Ecosystems. 2014. Vol. 17, iss. 6. P. 1040–1052. doi: 10.1007/s10021-014-9776-2

Поступила в редакцию 29.11.2018

References

Aponasenko A. D. Kolichestvennyye zakonomernosti funktsional'noi organizatsii vodnykh ekosistem v svyazi s ikh dispersnoi strukturoi [Quantitative regularities of the functional organization of water ecosystems in connection with their disperse structure]: DSc. (Dr. of Fiz.-Mat.). Krasnoyarsk, 2001. 316 p.

GOST 17.1.4.02–90. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a [Spectrophotometric determination of chlorophyll a]. Moscow: Izd-vo standartov, 2003. P. 587–600.

GOST 31958–2012. Voda. Metody opredeleniya sodержaniya obshchego i rastvorenogo organicheskogo ugleroda [Water. Methods for determination of total and dissolved organic carbon]. Moscow: Standartinform, 2013. 12 p.

GOST 33045–2014. Voda. Metody opredeleniya azotsoderzhashchikh veshchestv (s popravkoi) [Water. Methods for determination of nitrogen-containing matters (corrected)]. Moscow: Standartinform, 2016. 20 p.

Erlöv N. G. Optika morya [Sea optics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 248 p.

Kopelevich O. B., Shifrin K. S. Sovremennyye predstavleniya ob opticheskikh svoistvakh morskoi vody [Modern ideas of optical properties of sea water]. Optika okeana i atmosfery [Optics of ocean and atmosphere]. Moscow: Nauka, 1981. P. 4–55.

Kukushkin A. S., Agafonov E. A., Burlakova Z. P., Ereemeeva L. V. Izmenchivost' prozrachnosti i sodержaniya vzveshennogo veshchestva v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo morya [Variability of transparency and content of suspended substance in surface layer of the north-western part of the Black Sea]. Okeanologiya [Oceanology]. 2004. Vol. 44, no. 6. P. 870–881.

Kukushkin A. S., Voskresenskaya E. N., Maslova V. N. Osobennosti formirovaniya polya prozrachnosti v poverkhnostnom sloe severo-zapadnoi chasti Chernogo morya v zimne-vesennii period [The features of transparency field generation in the surface layer of the north-western part of the Black Sea in winter-spring period]. Optika atmosfery i okeana [Optics of ocean and atmosphere]. 2010. Vol. 23, no. 8. P. 730–736.

Levin I. M. Maloparametricheskie modeli pervichnykh opticheskikh kharakteristik morskoi vody [Few-parameter optical models of primary optical properties of sea water]. Fund. i priklad. gidrofizika [Fund. Appl. Hydrophysics]. 2014. Vol. 7, no. 3. P. 3–22.

Levin I. M., Rodionov M. A., Frantsuzov O. N. Pogruzaemyi izmeritel' pokazatelya oslableniya sveta morskoi vodoi [The immersed measuring instrument of an indicator of light attenuation by sea water]. Opticheskii zhurnal [J. Optical Tech.]. 2011. Vol. 78, no. 5. P. 59–63.

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

Man'kovskii V. I. Zheltoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh vostochnoi chasti Tropicheckoi Atlantiki [Yellow substance in surface waters of the eastern part of the Tropical Atlantic]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2015. No. 3. P. 53–61.

Man'kovskii V. I. Osnovy optiki okeana (metodicheskoe posobie) [Fundamentals of optics of the ocean: a study guide]. Sevastopol': Izd-vo MGINANU, 1996. 119 p.

Man'kovskii V. I. Opticheskie kharakteristiki vod vostochnoi chasti severo-zapadnogo shel'fa Chernogo morya v vesennii period [Optical characteristics of waters in the eastern part of the north-western shelf of Black Sea during the spring period]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2012. No. 4. P. 61–68.

Man'kovskii V. I. Spektral'nyi vklad komponentov morskoi vody v pokazatel' oslableniya napravlennoogo sveta v poverkhnostnykh vodakh Sredizemnogo morya [Spectral contribution of sea water components in the indicator of directional light attenuation in surface waters of the Mediterranean Sea]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2011. No. 5. P. 14–29.

Man'kovskii V. I., Zemlyanaya L. A. Svyaz' glubiny vidimosti belogo diska s pokazatelem oslableniya sveta dlya vod Chernogo morya [Connection of visibility depth of a white disk with the indicator of light attenuation for waters in the Black Sea]. *Kompleksnye okeanograficheskie issled. Chernogo morya* [Complex oceanographic research of Black Sea]. Sevastopol': MGI AN USSR, 1989. P. 82–85.

Man'kovskii V. I., Man'kovskaya E. V. Ispol'zovanie bioopticheskikh svyazei dlya opredeleniya kharakteristik sostoyaniya morskoi srede pri provedenii opticheskogo monitoringa v Chernom more s primeneniem prozrachnomerov [Use of biooptical communications for determining the characteristics of marine environment condition when carrying out optical monitoring in the Black Sea with the use of transparency meter]. *Morskoi gidrofizich. zhurn.* [Physical Oceanography]. 2008. No. 2. P. 37–45.

Matyushenko V. A. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' gidroopticheskikh kharakteristik Belogo morya [Space-time variability of hydrooptical characteristics of the White Sea]. *Probl. izucheniya, ratsional'nogo ispol'z. i okhr. resursov Belogo morya: Mat. IX mezhd. konf. (Petrozavodsk, 11–14 okt. 2004 g.)* [Issues of study, rational use, and protection of the White Sea resources: Proceed. IX int. conf. (Petrozavodsk, Oct. 11–14, 2004)]. Petrozavodsk, 2005. P. 215–223.

Matyushenko V. A., Lukin L. R., Khomenko G. D., Galerkin L. I. Pokazatel' oslableniya sveta i ego svyazi s gidrologicheskimi kharakteristikami i sodержaniem vzveshennogo veshchestva v vodakh Barentseva morya [An indicator of light attenuation and its connection with hydrological characteristics and suspended substance content in waters of the Barents Sea]. *Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issled. v Arktike* [System oceanologic studies in the Arctic]. Moscow: Nauchnyy mir, 2001. P. 432–442.

Matyushenko V. A., Popov I. K., Misyuchenko I. L. Prostranstvennoe raspredelenie pokazatelya oslableniya sveta v vodakh Karskogo morya [Spatial distribution of an indicator of light attenuation in waters of the Kara Sea]. *DAN* [Proceed. Acad. Sci.]. 1995. Vol. 342, no. 3. P. 403–406.

Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. G. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushi [Complex ecological classification of surface waters quality]. *Gidrobiol. zhurn.* [Hydrobiol. J.]. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 62–76.

Optika okeana. T. 1. Fizicheskaya optika okeana [Ocean optics. Vol. I. Physical ocean optics]. Moscow: Nauka, 1983. 372 p.

RD 52.24.387–2006. Massovaya kontsentratsiya fosfora obshchego v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii fotometricheskim metodom posle okisleniya persul'fatom kaliya [Mass concentration of total phosphorus in waters. Methodology of measurement by photometric method after oxidation with potassium persulfate]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2006. 31 p.

Selegei V. V. Teletskoe ozero: ocherki istorii [Lake Teletskoye: essays of history]. Barnaul, 2011. Vol. 3. 244 p.

Selegei V. V., Dekhanskhyutter B., Klerks Ya., Vysotskii E. M., Perepelova T. I. Fiziko-geograficheskaya i geologicheskaya kharakteristika Teletskogo ozera [Physical and geological environment of Lake Teletskoye]. *Tr. Dep. geol. i mineral. Korolevskii Muzei Tsentral'noi Afriki, Tervyuren, Bel'giya* [Proceed. Dept. Geol. Mineral. Royal Museum for Central Africa, Tervuren, Belgium]. 2001. Vol. 105. 310 p.

Selegei V. V., Selegei T. S. Teletskoe ozero [Lake Teletskoye]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 142 p.

Shifrin K. S. Vvedenie v optiku okeana [Introduction to ocean optics]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 278 p.

Sutorikhin I. A., Bukatyi V. I., Kharlamova N. F., Akulova O. B. Klimaticheskie usloviya i gidroopticheskie kharakteristiki presnovodnykh ozer Altayskogo kraja [Climatic conditions and hydrooptical characteristics of freshwater lakes of Altai Krai]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016. 162 p.

Betancur-Turizo S. P., González-Silvera A. G., Santamaría-Del-Ángel E., Millán-Núñez R., Millán-Núñez E., García-Nava H., Godínez V. M., Sánchez-Velasco L. Variability in the light absorption coefficient by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Northern Gulf of California. *Open Journal of Marine Science*. 2018. Vol. 8, no. 1. P. 20–37. doi: 10.4236/ojms.2018.81002

Carlson R. E. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, no. 2. P. 361–369.

Coble P. G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of Ocean color. *Chemical Rev.* 2007. Vol. 107. P. 402–418.

Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. 649 p. doi: 10.1017/CBO9781139168212

Nyquist G. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances. *PhD Thesis, Dept. Analytical*

and Marine Chemistry, Göteborg University, Göteborg, Sweden. 1979. 200 p.

Shi L., Mao Z., Wu J., Liu M., Zhang Y., Wang Z. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu. *Water*. 2017. Vol. 9, iss. 5. 352 p. doi: 10.3390/w9050352

Slade W. H., Boss E. Spectral attenuation and back-scattering as indicators of average particle size. *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, no. 24. P. 7264–7277. doi: 10.1364/AO.54.007264

Thrane J. E., Hessen D. O., Anderson T. The absorption of light in lakes: negative impact of organic carbon on primary productivity. *Ecosystems*. 2014. Vol. 17, iss. 6. P. 1040–1052. doi: 10.1007/s10021-014-9776-2

Received November 29, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Акулова Ольга Борисовна

научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, к. т. н.
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038
эл. почта: Akulova8282@mail.ru
тел.: (3852) 666501

Букатый Владимир Иванович

главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, д. ф.-м. н., проф.
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038
эл. почта: v.bukaty@mail.ru
тел.: (3852) 666501

Марусин Константин Валерьевич

научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики
Институт водных и экологических проблем СО РАН
ул. Молодежная, 1, Барнаул, Россия, 656038
эл. почта: kat@iwep.ru
тел.: (3852) 666011

CONTRIBUTORS:

Akulova, Olga

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia
e-mail: Akulova8282@mail.ru
tel.: (3852) 666501

Bukaty, Vladimir

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia
e-mail: v.bukaty@mail.ru
tel.: (3852) 666501

Marusin, Konstantin

Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
1 Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia
e-mail: kat@iwep.ru
tel.: (3852) 666011