

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

УДК 551.463.5

© Е. Н. Корчёмкина^{1*}, В. В. Суслин¹, О. Б. Кудинов¹, И. А. Суторихин^{2,3}, В. В. Кириллов², 2025

¹Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, ул. Капитанская д. 2

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, д. 1

³Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 6

*korchemkina@mhi-ras.ru

КОЭФФИЦИЕНТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ВОД ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В АВГУСТЕ 2023 г. И ЕГО СВЯЗЬ С БИООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Статья поступила в редакцию 16.10.2024, после доработки 24.01.2025, принята в печать 27.01.2025

Аннотация

Согласно наблюдениям последних 20-ти лет, олиготрофное Телецкое озеро (Республика Алтай) подвергается постепенной эвтрофикации, вследствие чего требуется регулярный контроль его экологического состояния. В августе 2023 г. на Телецком озере были проведены комплексные гидрооптические исследования, включавшие в себя измерения спектров коэффициента яркости водной толщи и подводной облученности, а также отбор проб для лабораторного определения концентрации хлорофилла *a*. В основной части участков акватории максимальные значения спектрального коэффициента яркости составляли 0,7–1 %. В областях впадения рек Чулышман, Кокши, Кыга, где присутствует заметный вклад взвешенного вещества, наблюдались увеличения значений спектрального коэффициента яркости до 2,8 %. Была проверена работоспособность полуаналитического биооптического алгоритма расчета концентрации хлорофилла *a* по спектрам коэффициента яркости, адаптированного к условиям внутренних водоемов. Показано завышение результатов расчета по сравнению с измеренными концентрациями хлорофилла *a*, однако при этом между ними наблюдалась значимая корреляция. Кроме того, по спектрам коэффициента яркости и подводной облученности были рассчитаны спектры показателя вертикального ослабления света, хорошо согласующиеся между собой. Основным оптически значимым компонентом воды Телецкого озера является неживая органика, что согласуется с данными непосредственных лабораторных определений. Использованный полуаналитический алгоритм показывает возможности оптических измерений для описания экологического состояния внутренних водоемов и представляет собой первый шаг на пути к спутниковому мониторингу биооптического состояния Телецкого озера.

Ключевые слова: Телецкое озеро, коэффициент яркости водной толщи, хлорофилл *a*, показатель вертикального ослабления облученности, биооптический алгоритм

© Е. Н. Korchemkina^{1*}, V. V. Suslin¹, O. B. Kudinov¹, I. A. Sutorikhin^{2,3}, V. V. Kirillov², 2025

¹Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol 299011, Russia

²Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, 1 Molodezhnaya Str., Barnaul 656038, Russia

³Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6 Academician M.A. Lavrentiev Ave.,
Novosibirsk 630090, Russia

*korchemkina@mhi-ras.ru

SPECTRAL REFLECTANCE COEFFICIENT OF LAKE TELETSKOYE IN AUGUST 2023 AND ITS RELATIONSHIP WITH BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS

Received 16.10.2024, Revised 24.01.2025, Accepted 27.01.2025

Abstract

According to observations over the past 20 years, the oligotrophic Lake Teletskoye (Altai Republic) is undergoing gradual eutrophication, showing the necessity of regular monitoring of its ecological state. In August 2023, multiparametric hydrooptical studies were carried out on Lake Teletskoye, including measurements of the spectral water upwelling radiance reflectance and

Ссылка для цитирования: Корчёмкина Е.Н., Суслин В.В., Кудинов О.Б., Суторихин И.А., Кириллов В.В. Коэффициент спектральной яркости вод Телецкого озера в августе 2023 г. и его связь с биооптическими характеристиками // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 18, № 1. С. 66–77. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

For citation: Korchemkina E.N., Suslin V.V., Kudinov O.B., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V. Spectral Reflectance Coefficient of Lake Teletskoye in August 2023 and its Relationship with Bio-Optical Characteristics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):66–77. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-6

underwater irradiance, as well as sampling for laboratory determination of chlorophyll *a* concentration. In the main part of the lake, spectral maxima of reflectance coefficient were observed to be 0.7–1 %, while in estuary areas of Chulyshman, Kokshi, Kyga rivers where the influence of suspended matter is significant the reflectance reached 2.8 %. The performance of the semi-analytical biooptical algorithm for calculating the chlorophyll *a* concentration from the reflectance spectra, adapted to the conditions of inland waters, was tested. An overestimation of the calculation results compared to the measured chlorophyll *a* concentration was shown, however, a significant correlation was observed between them. In addition, the spectra of the light diffuse attenuation coefficient were calculated from both the reflectance spectra and underwater irradiance, showing good agreement. The main optically significant component of Lake Teletskoye water is nonliving organic matter, which is consistent with the data of direct laboratory determinations. The semi-analytical algorithm shows the possibilities of optical measurements for describing the ecological state of inland water bodies and can be the first step towards bio-optical satellite monitoring of Lake Teletskoye.

Keywords: Lake Teletskoye, spectral reflectance, chlorophyll *a*, diffuse attenuation coefficient, bio-optical algorithm

1. Введение

Телецкое озеро расположено в северо-восточной части Республики Алтай. Протяженность озера 77,8 км, средняя ширина 2,9 км, максимальная ширина составляет 5,2 км. Северная часть водоема вытянута в широтном направлении, южная — в меридиональном. Максимальная глубина озера составляет 323 м, средняя — 181 м. Телецкое озеро — проточное, в него впадают более 70 рек, среди которых крупнейшей является р. Чулышман, обеспечивающая до 70 % от общего притока воды [1]. По гидротермическим характеристикам Телецкое озеро относится к динамическим с двумя периодами полного конвективного перемешивания до максимальных глубин за счет термического бара (май—июль и октябрь—декабрь) [1]. Прозрачность воды в Телецком озере в основном определяется сезонным ходом речного стока, кроме северной кутовой части у пос. Артыбаш, где имеются признаки антропогенного воздействия [2]. Результаты экспедиционных наблюдений с августа 2013 по 2023 гг. за относительной прозрачностью по белому диску на 10 участках акватории Телецкого озера в период летнего прогрева и устойчивой температурной стратификации приведены в [3], где показано, что за отмеченный период произошло снижение средней относительной прозрачности по белому диску с 8,2 до 5,3 м. В работе [4] представлены масштабные исследования, показавшие значительную пространственную изменчивость спектрального показателя ослабления света в различных зонах поверхностного слоя Телецкого озера, в основном определяемую выносом рек Чулышман, Кокши и Кыга (рис. 1). При этом, как было установлено, наибольший вклад в ослабление света в поверхностных водах вносит неживое органическое вещество (растворенная органика, детрит).

Как было показано в работе [4], содержание биогенных элементов изменяется в основном во времени и в горизонтальной плоскости, и в значительно меньшей степени — по вертикали, поэтому развитие фотосинтезирующих организмов определяется только глубиной проникновения солнечного излучения. Анализ данных по вертикальному распределению фитопланктона в пелагиали озера на глубоководных станциях показал, что в любой сезон основная масса фитопланктона сосредоточена в верхней части фотической зоны (0–10 м), различаются только значения его численности и биомассы. Кроме того, выявлена высокая корреляционная зависимость температуры воды и количественных показателей фитопланктона. [5]. Вертикальная изменчивость профилей концентрации хлорофилла *a* наиболее выражена в августе. Характерны 2 типа профилей — с максимумом у поверхности или на глубинах около 1–3 глубины видимости белого диска, причем для августа более характерен последний [6]. Трофический уровень Телецкого озера с оценкой трофности по первичной продукции, прозрачности и содержанию биогенных элементов соответствует ультраолиготрофно-олиготрофному [5, 6]. Однако в настоящее время фиксируется его постепенная эвтрофикация. Очевидно, наблюдаемые изменения трофности озера Телецкое вызваны долговременным увеличением уровня антропогенного загрязнения водной среды, береговых экосистем и биогеоценозов всего бассейна [7]. По исследованиям, проводившимся до 2006 г., среднее значение концентрации хлорофилла *a* для августа составляло в среднем 1,24 мг/м³ [6], согласно данным исследования августа 2022 г. она составляет в поверхностном слое 1,69 мг/м³ [8], согласно измерениям августа 2023 г. — 1,62 мг/м³ (настоящая работа). Таким образом, действительно можно отметить постепенную эвтрофикацию водоема и заключить, что необходим регулярный мониторинг его экологического состояния.

Оптические методы контроля экологического состояния представляются наиболее оперативными и предоставляют широкий охват акватории. Особенно в этом смысле полезны методы дистанционного (спутникового) наблюдения. Существуют модели, позволяющие связать гидрооптические характеристики с биологическими, например, с концентрацией хлорофилла *a*, которая напрямую связана с продуктивностью

водоема [9]. Кроме того, общемировой практикой является создание региональных эмпирических моделей для отдельных внутренних водоемов, морей, районов океана, связывающих биооптические параметры с оптическими характеристиками, измеряемыми контактно или дистанционно [10–12].

Гидрооптические измерения на Телецком озере в основном включали такие параметры как: спектральная подводная облученность, показатель спектрального ослабления света в диапазоне 400–800 нм и относительная прозрачность по белому диску [3, 4, 13, 14]. В данной работе к ним добавлен коэффициент спектральной яркости водной толщи, который представляет собой восходящую яркость водной толщи, нормированную на яркость белого Ламбертовского отражателя. Коэффициент яркости в нескольких спектральных каналах является стандартным продуктом, предоставляемым спутниками оптического дистанционного зондирования Земли [15]. Измеренный спектр коэффициента яркости в видимом диапазоне позволяет рассчитывать содержание хлорофилла *a* в верхней части фотического слоя, оценивать показатель вертикального ослабления света и другие биооптические характеристики [9].

В данной статье анализируются результаты измерений гидрооптических параметров Телецкого озера, выполненных в ходе экспедиционных работ в августе 2023 г. Целью является проверка существующего полуаналитического адаптируемого алгоритма для расчета концентрации хлорофилла *a* по данным контактных измерений коэффициента яркости [16, 17].

2. Данные и методы

В августе 2023 г. на Телецком озере были проведены комплексные гидрооптические исследования с борта теплохода-лаборатории ИВЭП СО РАН, впервые включавшие в себя гиперспектральные измерения коэффициента яркости водной толщи [18]. Кроме того, выполнялся отбор и анализ проб воды для определения концентрации хлорофилла *a*.

2.1. Измерения коэффициента яркости

Для измерений использовался палубный спектрофотометр, разработанный в отделе оптики моря МГИ РАН [19]. С его помощью измерялся спектр восходящей яркости водоема под углом около 30°, нормированной на падающую облученность. Для учета отражения от водной поверхности применялась оригинальная методика: коэффициент яркости 5-сантиметрового слоя воды измерялся в кювете из черного поглощающего стекла и затем вычитался из спектра водной толщи. Методика измерений согласуется с протоколами NASA для подспутниковых измерений [20]. Измерения проводились с борта судна на станциях при различных условиях волнения и облачности, вне тени от берегов, и так, чтобы отражение берегов (гор) не находилось в точке измерения. Время измерения одного спектра составляло 10–15 мин, в течение которых предполагается, что изменения освещенности обусловлены только облачностью, но не суточным ходом. В результате было получено 16 спектров коэффициента яркости в диапазоне длин волн 390–750 нм с разрешением 1 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3 %. Вследствие неудовлетворительных погодных условий не удалось получить спектры для всех станций. Станции, где измерялся коэффициент яркости, показаны на карте (рис. 1).

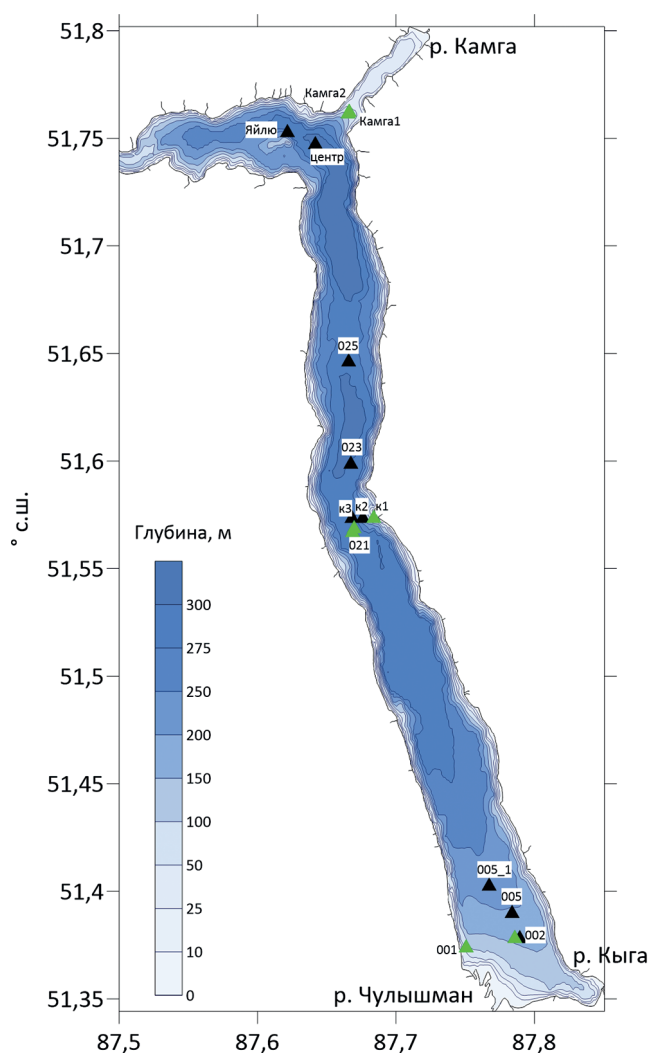


Рис. 1. Станции, где выполнялись оптические измерения. Станции, где одновременно выполнялся отбор проб на хлорофилл *a*, выделены зеленым

Fig. 1. Stations of optical measurements. Stations where simultaneous Chlorophyll *a* samples were taken are highlighted in green

2.2. Определение концентрации хлорофилла *a* в пробах

С целью контроля трофического состояния озера отбирали пробы воды батометром Рутнера с борта теплохода и с резиновой лодки с глубин 0, 5 и 10 м. Концентрацию хлорофилла *a* определяли спектрофотометрированием ацетонового экстракта клеток водорослей фитопланктона, осевших на мембранные фильтры «Владипор» с размером пор 0,8 мкм. Измерения проводили на спектрофотометре ПЭ-5400УФ, концентрацию хлорофилла рассчитывали по общепринятой методике в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90 [21]. В результате получены измерения на 19-ти станциях. В данной работе использованы только значения для глубины 0 м.

2.3. Полуаналитический алгоритм расчета биооптических характеристик по спектру коэффициента яркости

Спектр коэффициента яркости моделируется выражением [16]:

$$\rho(\lambda) = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550)(550/\lambda)^v}{a_w(\lambda) + Chl \cdot a_{ph}^*(\lambda) + a_{CDM}(440)e^{-S(\lambda-440)}}, \quad (1)$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ — показатель рассеяния назад чистой водой [22]; $a_w(\lambda)$ — показатель поглощения чистой водой [23]; $a_{ph}^*(\lambda)$ — спектр удельного поглощения пигментов фитопланктона (нормированный на концентрацию хлорофилла *a*); $v = 1$ — спектральный наклон рассеяния назад, зависящий от размера частиц, в данном случае предполагается, что взвесь оптически крупная [24]; S — спектральный наклон показателя поглощения света неживой органикой, составлял 0,001–0,017 в зависимости от соотношения детрита и растворенного органического вещества [8]; $b_{bp}(550)$ — показатель рассеяния назад частицами взвеси на длине волны 550 нм; Chl — концентрация пигментов фитопланктона и $a_{CDM}(440)$ — показатель поглощения неживого органического вещества (растворенного и детрита) на длине волны 440 нм.

Спектр удельного поглощения хлорофилла *a* и его зависимость от концентрации хлорофилла *a* может меняться от водоема к водоему, поэтому для применения алгоритма к новому водному объекту требуется эту зависимость параметризовать на основе натурных измерений концентраций хлорофилла *a* и его поглощения. Поскольку для Телецкого озера такой параметризации пока не существует, в данной работе был использован спектр удельного поглощения из работы [25], полученный для океанических вод с концентрациями хлорофилла *a* от 0,02 до 25 мг/м³. Существуют исследования различных озер [26, 27], среди которых были и олиготрофные, где получена параметризация удельного поглощения хлорофилла *a*, близкая к [25], с отклонениями в пределах 20 % в различных участках спектра. Поэтому в данном исследовании была использована параметризация из работы [25].

Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что неизвестные параметры ($b_{bp}(550)$, Chl и $a_{CDM}(440)$) определяются путем одномерной оптимизации в отдельных участках видимого спектра, а не многомерной во всем диапазоне длин волн. За счет подбора участков, где данный параметр оказывает максимальное влияние на коэффициент яркости, алгоритм может быть адаптирован для вод различной трофности. Для определения спектральных участков проводился численный эксперимент, подробно описанный в работе [28]. В нем моделировался спектр коэффициента яркости при различных соотношениях биооптических характеристик, в него добавлялось около 10 % шума, а затем применялся алгоритм для восстановления исходных характеристик в различных участках спектра. В результате были найдены участки спектра, где восстановление происходит наиболее точно. Например, в исходном алгоритме для Черного моря концентрация хлорофилла *a* рассчитывалась в синем максимуме (420–460 нм), а в приложении к Телецкому озеру — в области красного максимума (660–700 нм). В результате неизвестные параметры определяются в итерационной процедуре.

Также нужно отметить, что определяемые параметры являются средневзвешенными по слою первой оптической глубины (глубины видимости белого диска) [27] и не содержат информации о вертикальном распределении реальных примесей в воде.

3. Результаты и обсуждение

Полученные спектры коэффициента яркости приведены на рис. 2, *a*. Многие спектры содержат «шум», обусловленный измерениями при неудовлетворительных погодных условиях (переменная облачность, волнение). В табл. 1 приведены значения спектрального коэффициента яркости в максимуме ($\rho_{\max}$) и длины

волн, где они наблюдаются ($\lambda_{\max}$). Эти величины дают представление об основных компонентах, обуславливающих форму спектра коэффициента яркости. Пространственно все выполненные измерения можно разделить на три группы, для которых характерные спектры приведены на рис. 2, б. Спектры на станции 002, измеренные в зоне выноса реки Чулышман, имеют самые высокие значения, что вызвано большим содержанием в воде взвеси минерального происхождения по сравнению со станцией 021. Станция 021 располагалась в центральной части озера, однако аналогичные по форме спектры были получены на всех станциях меридиональной части озера, за исключением выноса р. Чулышман и Камгинского залива. Спектры на станциях 002 и 021 приблизительно пропорциональны друг другу, что говорит о различии только в содержании взвеси. В Камгинском заливе, находящемся на территории Алтайского государственного биосферного заповедника, на акваторию которого вход водно-моторного транспорта и туристов воспрещен, спектр отличается не только величинами, но и формой (максимум смещен к 590 нм), что может быть обусловлено большим содержанием неживой органики естественного происхождения в небольшой полузамкнутой акватории по сравнению со станциями 002 и 021.

В результате определения концентрации хлорофилла *a* в пробах получены значения $TChl\ a = 1,62 \pm \pm 0,86\ \text{мг/м}^3$ для поверхностного слоя (0 м). Из всех отборов проб только 7 выполнены одновременно с измерениями коэффициента яркости, эти станции выделены цветом в табл. 1.

Спектры коэффициента яркости были обработаны при помощи полуаналитического алгоритма с целью получения биооптических характеристик. В результате рассчитаны концентрация хлорофилла *a* (*Chl*), поглощение неживой органикой на длине волны 440 нм ($a_{CDM}(440)$), рассеяние назад на взвеси $b_{bp}(550)$ и показатель вертикального ослабления света на длине волны 490 нм $K_d(490)$, которые приведены в табл. 1.

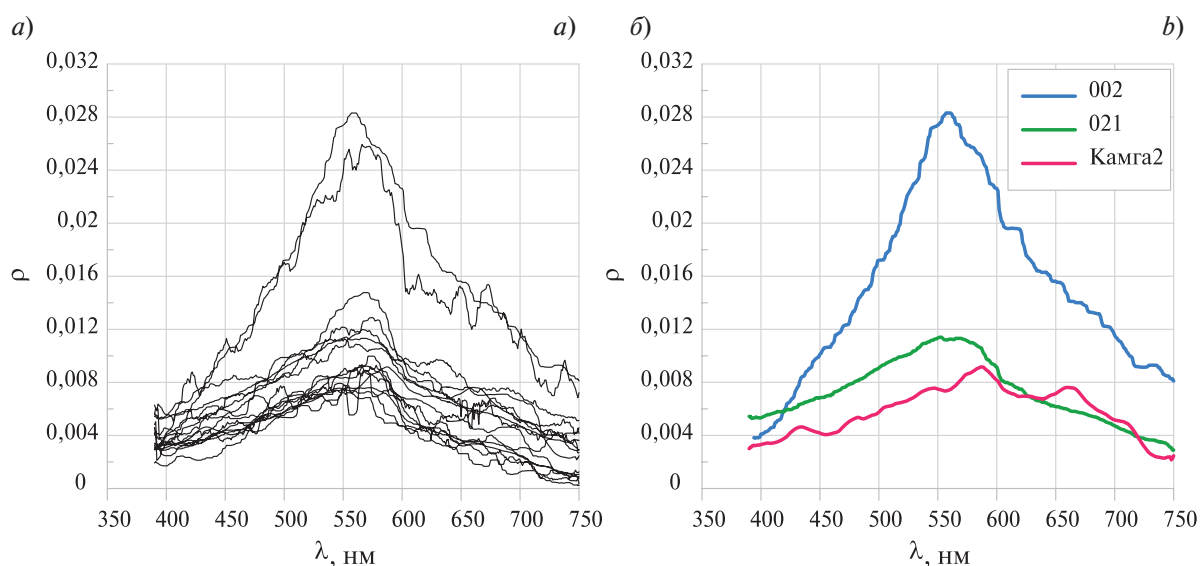


Рис. 2. Спектры коэффициента яркости: а — для всех станций; б — характерные для отдельных районов

Fig. 2. Reflectance spectra obtained for all stations (a); spectra characteristic of individual regions (b)

Таблица 1

Table 1

Результаты проведенных измерений и расчетов
 Measurements and calculations performed

Дата	Время	Станция	$\rho_{\max}$	$\lambda_{\max}$, нм	<i>Chl</i> , мг/м ³	a_{CDM} , м ⁻¹	b_{bp} , м ⁻¹	K_d , м ⁻¹
12.08.2023 Чулышман	9:09	002	0,025	569	1,45	1,03	0,062	0,93
	10:22	002	0,028	559	3,12	1,06	0,058	0,73
13.08.2023 Кыгинский залив	10:03	001	0,011	574	1,24	0,85	0,026	0,95
	12:14	005	0,009	569	2,26	0,64	0,013	0,41
	14:23	005_1	0,015	569	0,11	1,01	0,028	0,56

Окончание табл. 1

Fin table 1

Дата	Время	Станция	$\rho_{\max}$	$\lambda_{\max}$, нм	Chl, мг/м ³	a_{CDM} , м ⁻¹	b_{bp} , м ⁻¹	K_d , м ⁻¹
14.08.2023 Кокши	9:13	021	0,008	576	1,31	1,28	0,031	0,86
	11:27	k1	0,009	569	1,00	0,65	0,021	0,97
	11:50	k2	0,010	573	2,31	1,07	0,019	0,62
	15:59	k3	0,008	552	1,33	0,76	0,017	0,60
15.08.2023 Корбу	9:29	021	0,009	552	2,39	0,68	0,025	0,98
	14:47	023	0,009	566	2,36	0,53	0,012	0,32
	15:58	025	0,009	569	0,12	0,32	0,008	0,27
16.08.2023 Камгинский залив и центр	8:55	центр	0,007	586	0,78	0,45	0,011	0,35
	12:05	Яйлю	0,008	553	3,99	0,61	0,013	0,46
	16:37	Камга1	0,009	562	2,98	1,21	0,038	0,92
	18:52	Камга2	0,009	590	1,56	1,82	0,041	0,96

Примечание. Жирным шрифтом выделены данные для спектров, показанных на рис. 2, б. Цветом выделены станции, для которых имеются одновременные измерения коэффициента яркости и концентрации хлорофилла *a*. Длины волн для параметров: a_{CDM} на 440 нм, b_{bp} на 550 нм, K_d на 490 нм.

Note. The data for the spectra in Fig. 2b are shown in bold. The stations for which there are simultaneous measurements of the reflectance and Chlorophyll *a* concentrations are shown in color. Wavelengths: a_{CDM} at 440 nm, b_{bp} at 550 nm, K_d at 490 nm.

Рассчитанные концентрации хлорофилла *a* были сопоставлены с определенными в пробах (рис. 3). Видно, что, несмотря на заметную корреляцию ($R^2 = 0,72$, $p < 0,05$), расчетные концентрации завышены по сравнению с натурными в среднем на 30 %. Это говорит о неверном выборе входных параметров полуаналитического алгоритма (спектр удельного поглощения хлорофилла, S и ν), для уточнения которых потребуются дополнительные исследования, однако даже в текущем состоянии алгоритм дает возможность качественно оценивать содержание хлорофилла *a*.

Полученные значения поглощения неживой органикой на длине волны 440 нм составляют $0,87 \pm \pm 0,37 \text{ м}^{-1}$, для сравнения в августе 2022 г. были получены значения около $0,65 \text{ м}^{-1}$, хотя в 2023 г. не повторялись измерения на всех станциях 2022 г. [8]. К сожалению, отсутствуют результаты непосредственных измерений рассеяния назад на взвеси, с которыми можно сделать сопоставление. Можно только заключить, что, как и предполагалось, в районе выноса р. Чулышман и в Камгинском заливе значения рассеяния назад значительно выше, чем на остальной исследованной акватории.

Спектры $K_d(\lambda)$ рассчитывались по найденным первичным гидрооптическим характеристикам:

$$K_d(\lambda) = (a(\lambda) + b_b(\lambda)) / \cos \theta_s, \quad (2)$$

где $a(\lambda)$ — суммарное поглощение, $b_b(\lambda)$ — суммарное рассеяние назад, θ_s — высота солнца, средний косинус тела диффузной облученности считался равным $\cos \theta_s$. Считается, что изменения K_d , обусловленные изменением соотношения прямого и диффузного света, не превышают 10–15 % [29]. Полученные спектры сравнивались с результатами расчетов по натурным измерениям профилей подводной спектральной облученности сверху [18]. Получены близкие значения в диапазоне длин волн 450–600 нм (рис. 4). На длинах волн менее 450 наблюдается, во-первых, больший разброс значений K_d , соответствующий изменчивости коэффициента яркости, во-вторых, в некоторых случаях K_d , рассчитанные по профилям облученности, существенно завышены. Это можно в некоторой степени объяснить погрешностями измерений вследствие волнения и неравномерной освещенности.

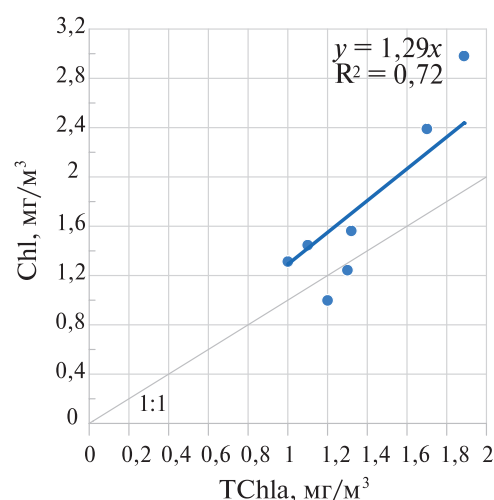


Рис. 3. Сравнение расчетных и натурных концентраций хлорофилла *a*

Fig. 3. Comparison of calculated and *in situ* chlorophyll *a* concentrations

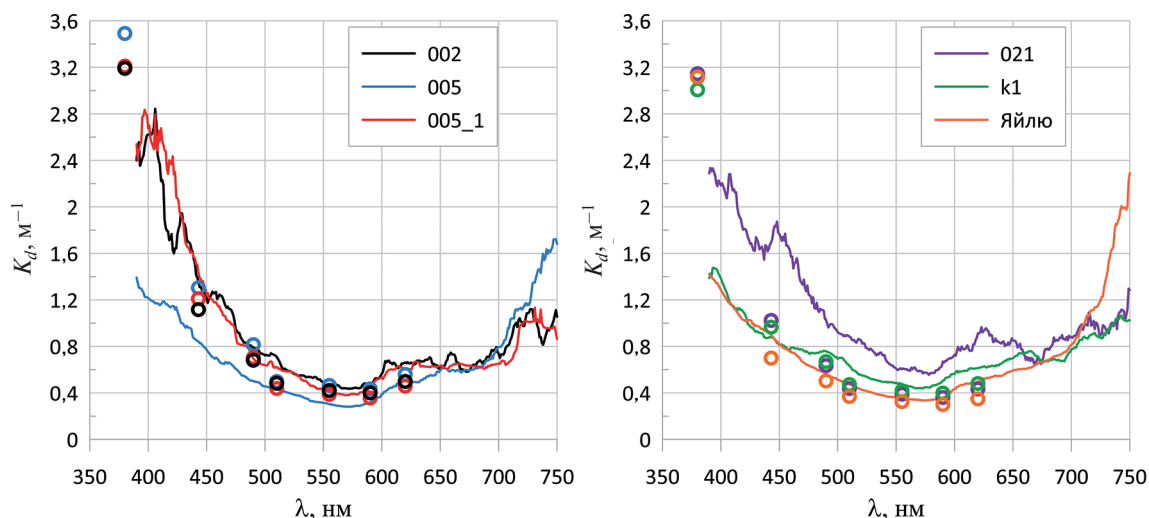


Рис. 4. Спектры K_d , рассчитанные по измерениям коэффициента яркости (сплошная линия) и по измерениям профилей спектральной облученности (кружки)

Fig. 4. K_d spectra calculated from reflectance measurements (solid line) and spectral irradiance profile measurements (circles)

Поскольку показатель вертикального ослабления зависит от суммы поглощения и рассеяния назад, то рассчитанные значения $b_{bp}(550)$, Chl и $a_{CDM}(440)$ позволяют оценить спектральный вклад этих оптически активных компонентов в K_d . В табл. 2 представлены процентные значения этих вкладов, осредненные по всем измерениям. Кроме того, на рис. 5 показаны полные спектральные вклады всех компонентов для отдельных станций. Неживая органика доминирует среди всех оптически активных компонентов во всем спектральном диапазоне. Вклад поглощения пигментов фитопланктона имеет два максимума, причем если максимум на 490 нм составляет приблизительно 7 % от общего поглощения примесями (пигменты и неживая органика), то максимум на 680 нм — уже 25 %. Именно на этом различии вкладов поглощения хлорофилла-а основана модификация биооптического алгоритма для внутренних водоемов. Вклад рассеяния назад на взвеси минимален и меняется только вследствие спектрального изменения K_d .

Таблица 2

Table 2

**Вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления
(среднее значение $\pm$ среднеквадратичное отклонение)**

Contributions of optically significant components to the diffuse attenuation (mean value $\pm$ standard deviation)

Длина волны, нм	K_d , м ⁻¹	Вклады, %		
		Хлорофилл <i>a</i>	Взвесь	Неживая органика
400	1,89 $\pm$ 0,88	2,3 $\pm$ 1,6	1,9 $\pm$ 0,6	73 $\pm$ 12
440	1,18 $\pm$ 0,48	5,0 $\pm$ 3,0	2,8 $\pm$ 1,1	76 $\pm$ 10
490	0,71 $\pm$ 0,28	5,4 $\pm$ 3,5	4,1 $\pm$ 1,8	73 $\pm$ 8
550	0,44 $\pm$ 0,16	3,0 $\pm$ 2,3	5,9 $\pm$ 3,0	63 $\pm$ 14
680	0,66 $\pm$ 0,10	4,2 $\pm$ 2,9	3,3 $\pm$ 2,1	13 $\pm$ 9

На рис. 5 виден более заметный по сравнению с остальными станциями вклад рассеяния назад на взвеси на станции 002, которая находится в зоне выноса р. Чулышман, а также наибольшие по всем измерениям значения поглощения неживой органикой в Камгинском заливе. Кроме того, можно отметить сходство оптических свойств на станциях 021 и Яйлю, аналогичные им величины и распределения вкладов наблюдаются на всех станциях меридиональной части озера.

4. Заключение

В 2023 г. впервые проведены натурные измерения спектрального коэффициента яркости водной толщи на Телецком озере. Полученные значения позволяют наблюдать пространственную изменчивость оп-

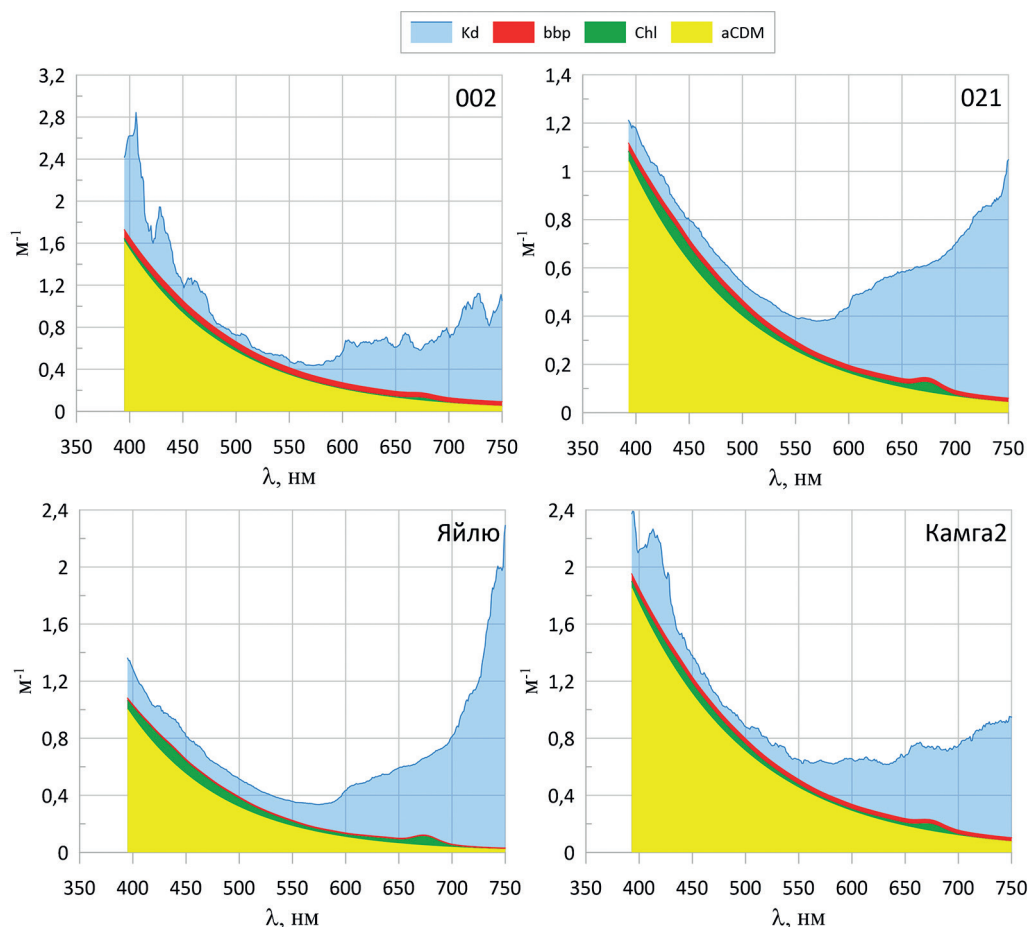


Рис. 5. Спектральные вклады оптически значимых компонентов в показатель вертикального ослабления для нескольких станций

Fig. 5. Spectral contributions of optically significant components into the diffuse attenuation for several stations

тических свойств воды: в областях, где присутствует заметный вклад взвешенного вещества в рассеяние, наблюдались значения коэффициента яркости до 2,8 %, тогда как на основной части акватории максимальные значения составляли 0,7–1 %. Применение полуаналитического алгоритма, адаптированного для внутренних вод, показало удовлетворительную оценку содержания хлорофилла *a* в воде. Для более точной настройки алгоритма требуются дальнейшие натурные исследования. Кроме того, были оценены поглощение неживой органикой и показатель вертикального ослабления света, которые также отражают изменчивость оптических свойств исследуемого водоема.

Предварительный анализ показывает, что основным оптически значимым компонентом воды Телецкого озера является неживая органика, что согласуется с данными непосредственных лабораторных определений [3, 8]. Поглощение неживой органикой испытывает значительную изменчивость, около 50 %, однако вклад ее в показатель вертикального ослабления, напротив, варьирует слабо, особенно в коротковолновой части спектра. Вынос реки Чулышман содержит дополнительно большое количество взвешенного вещества, которое обуславливает рост величин коэффициента яркости. В Камгинском заливе вклад неживой органики выше, чем в остальной части исследованной акватории, что показывает отличающаяся форма спектров коэффициента яркости. Основная часть Телецкого озера, с учетом довольно редкой сетки станций, достаточно однородна по своим оптическим свойствам.

Таким образом, в работе показаны возможности оптических измерений для описания экологического состояния озера. Использованный полуаналитический алгоритм является первым шагом на пути к спутниковому мониторингу биооптического состояния Телецкого озера (комплекса концентраций и поглощения пигментов и неживой органики, оптических характеристик и размерного состава взвеси и т. д.).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0012, ФГБУН ИВЭП СО РАН № 0306-2021-0001, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» и договоров с администрацией ФГБУ «Алтайский государственный природный биосферный заповедник». В экспедиционных работах использовалось научное оборудование ЦКП «Научно-исследовательские суда ИВЭП СО РАН».

Funding

The work was carried out under the state assignments of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation of the FSBSI FRC MHI No. FNNN-2024-0012, the FSBSI IWEP SB RAS No. 0306-2021-0001, the FSBSI «Federal Research Center for Information and Computational Technologies» and agreements with the administration of the Federal State Budgetary Institution “Altai State Nature Reserve”. The scientific equipment of the Collective Use Center “Research Vessels of the IWEP SB RAS” was used in the expedition work.

Литература

1. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л., 1978. 143 с.
2. Робертус Ю.В., Кивацкая А.В., Любимов Р.В. Экологическое состояние воды Телецкого озера в XXI веке // Полевые исследования в Алтайском государственном биосферном заповеднике. 2021. № 3. С. 182–189. doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182
3. Суторихин И.А., Кириллов В.В., Коломейцев А.А., Литвиненко С.А. Относительная прозрачность участков акватории Телецкого озера с 2014 по 2023 годы // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2024. № 6. С. 168–172.
4. Суторихин И.А., Коломейцев А.А., Литвиненко С.А. Гидрооптические параметры воды Телецкого озера в период устойчивой летней и зимней температурной стратификации // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 35–42. doi:10.7868/S2073667320020045
5. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера (Алтай, Россия): особенности развития и многолетней динамики // Экология. 2018. № 2. С. 146–151. doi:10.7868/S0367059718020087
6. Кирилова Т.В. Пигментные характеристики фитопланктона Телецкого озера: специальность 03.00.16: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Красноярск, 2006. 24 с.
7. Кудерина Т.М., Суслова С.Б., Грабенко Е.А. и др. Экологическое состояние Телецкого озера при современных изменениях окружающей среды // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2019. № 1. С. 86–91.
8. Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Skorokhod E. Yu. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer // Proc. SPIE12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 17 Oct 2023, 1278049. doi:10.1117/12.2690958
9. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters / Ed. By Sathyendranath S. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.
10. Скороход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Суслин В.В. Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS и VIIRS // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 233–246. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-233-246
11. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 10. 1215. doi:10.3390/rs11101215
12. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, N 1. 64. doi:10.3390/rs11010064
13. Суторихин И.А., Фроленков И.М., Литвиненко С.А., Соловьев В.А. Спектральная подводная освещенность пресноводных водоемов на разных глубинах // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 10, С. 861–865. doi:10.15372/AOO20231011
14. Суторихин И.А., Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А., Каменев А.Р. Способ и устройство измерения распределения спектральной солнечной освещенности в фотическом слое водоемов. Патент РФ на изобретение № 2817043. Дата государственной регистрации 09 апреля 2024 г.
15. Gordon H.R. Physical Principles of Ocean Color Remote Sensing. University of Miami, 2019. 995 p. doi:10.33596/ppocrs-19

16. Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н., Мартынов О.В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
17. Korchemkina E., Deryagin D., Pavlova M. et al. Advantage of Regional Algorithms for the Chlorophyll-a Concentration Retrieval from In Situ Optical Measurements in the Kara Sea // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, N11. P. 1587. doi:10.3390/jmse10111587
18. Суслин В.В., Кудинов О.Б., Корчёмкина Е.Н., Латушкин А.А., Суторихин И.А., Кириллов В.В., Мартынов О.В. Спектральные свойства вертикального распределения горизонтальной облученности в Телецком озере: август 2023 года // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]: Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. URL: https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/30/ru/abstr_16211.pdf (дата обращения: ...)
19. Ли М.Е., Мартынов О.В. Измеритель коэффициента яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. № 1. С. 163–173.
20. Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry / Ed. by Zibordi G., Voss K.J., Johnson B.C., Mueller J.L. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 3.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2019. 67 p. doi:10.25607/OBP-691
21. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. ИПК. Издательство стандартов. Москва. 12 с.
22. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water // Optical Aspects of Oceanography / Ed. by N.G. Jerlov, E.S. Nielson. New York: Academic Press, 1974. P. 1–24.
23. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // Applied Optics. 1981. Vol. 20, № 2. P. 177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
24. Конелевич О.В. Светорассеивающие свойства морской воды / Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 167–179.
25. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100. P. 13,321–13,332. doi:10.1029/95JC00463
26. Ylöstalo P., Kallio K., Seppälä J. Absorption properties of in-water constituents and their variation among various lake types in the boreal region // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 148. P. 190–205. doi:10.1016/j.rse.2014.03.023
27. Фицек Д., Мелер Й., Западка Т., Стонь-Эгерт Й. Моделирование коэффициентов поглощения света фитопланктоном в озерах Померании (северная Польша) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 4. С. 54–63.
28. Корчёмкина Е.Н., Моляков А.А. Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 184–192. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192
29. Оптика океана / Под ред. Мониной А.С. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. 371 с.

References

1. Selegey V.V., Selegey T.S. *Lake Teletskoye*. L.; 1978. 143 p. (in Russian).
2. Robertus Yu.V., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V. Ecological status of Lake Teletskoye's water in the 21st century. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2021;3:182–189. doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182 (in Russian).
3. Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Kolomeichev A.A., Litvinenko S.A. Relative transparency of the Teletskoye Lake water over a period from 2014 to 2023. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2024;6:168–172 (in Russian).
4. Sutorikhin I.A., Kolomeitsev A.A., Litvinenko S.A. Hydro-optical parameters of water in Lake Teletskoye during stable summer and winter temperature stratification. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(2):35–42 (in Russian) <https://doi.org/10.7868/S2073667320020045>
5. Mitrofanova E.Y. Phytoplankton of Lake Teletskoye (Altai, Russia): features of development and long-term dynamics. *Russian Journal of Ecology*. 2018;49(2):180–185. doi:10.1134/S1067413618010101
6. Kirillova T.V. Pigment characteristics of phytoplankton of Lake Teletskoye: specialty 03.00.16: abstract of a dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Krasnoyarsk, 2006. 24 p. (in Russian).
7. Kuderina T.M., Suslova S.B., Grabenko E.A. et al. The ecological situation of Teletskoe Lake to environmental changes. *Field Studies in the Altai Biosphere Reserve*. 2019;1:86–91 (in Russian).
8. Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Skorokhod E. Yu. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer. *Proc. SPIE12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 17 Oct 2023, 1278049. doi:10.1117/12.2690958

9. Remote Sensing of Ocean Color in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters / Ed. by Sathyendranath S. *Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group*. Dartmouth, Canada, 2000. 140 p.
10. Skorokhod E. Yu., Churilova T. Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Suslin V.V. Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of MODIS and VIIRS Products Accuracy. *Physical Oceanography*. 2021;28(2):215–227. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-215-227
11. Molkov A.A., Fedorov S.V., Pelevin V.V., Korchemkina E.N. Regional Models for High-Resolution Retrieval of Chlorophyll a and TSM Concentrations in the Gorky Reservoir by Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1215. doi:10.3390/rs11101215
12. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sensing*. 2019;11(1):64. doi:10.3390/rs11010064
13. Sutorikhin I.A., Frolenkov I.M., Litvinenko S.A., Soloviev V.A. Underwater spectral irradiance of freshwater reservoirs. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023;36(10):861–865. doi:10.15372/AOO20231011 (in Russian).
14. Sutorikhin I.A., Krivobokov D.E., Soloviev V.A., Kamenev A.R. Method and device for measuring distribution of spectral solar illumination in photic layer of water bodies. *Russian Federation Patent for Invention No. 2817043*. State registration date April 09, 202415.
15. Gordon H.R. *Physical Principles of Ocean Color Remote Sensing*. University of Miami; 2019. 995 p. doi:10.33596/ppocrs-19
16. Lee M.E., Shybanov E.B., Korchemkina E.N., Martynov O.V., 2015. Determination of the Concentration of Seawater Components based on Upwelling Radiation Spectrum. *Physical Oceanography*. 2015;6:15–30. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-15-30
17. Korchemkina E., Deryagin D., Pavlova M. et al. Advantage of Regional Algorithms for the Chlorophyll-a Concentration Retrieval from In Situ Optical Measurements in the Kara Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10(11):1587. doi:10.3390/jmse10111587
18. Suslin V.V., Kudinov O.B., Korchemkina E.N., Latushkin A.A., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Spectral properties of the vertical distribution of horizontal irradiance in Lake Teletskoye: August 2023. *Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proceedings of the XXX International Symposium*. July 1–5, 2024, St. Petersburg. URL: https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/30/ru/abstr_16211.pdf (in Russian).
19. Lee M.E., Martynov O.V. Brightness coefficient sensor for subsatellite measurements of water bio-optical parameters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2000;1:163–173 (in Russian).
20. Protocols for Satellite Ocean Colour Data Validation: In Situ Optical Radiometry / Ed. by Zibordi G., Voss K.J., Johnson B.C., Mueller J.L. IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 3.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada. 2019. 67 p. doi:10.25607/OBP-691
21. GOST 17.1.4.02-90. Water. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll a. IPC. Publishing House of Standards. Moscow. 12 p. (in Russian).
22. Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water. In: Jerlov N.G., Nielson E.S. (eds.). *Optical Aspects of Oceanography*. New York: Academic Press; 1974. P. 1–24.
23. Smith R.C., Baker K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Applied Optics*. 1981;20(2):177–184. doi:10.1364/AO.20.000177
24. Kopelevich O.V. Light-scattering properties of sea water. In: *Ocean Optics*. Vol. 1. Physical optics of the ocean. Moscow: Nauka; 1983. P. 167–179 (in Russian).
25. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parametrization. *Journal of Geophysical Research*. 1995;100:13321–13332. doi:10.1029/95JC00463
26. Ylöstalo P., Kallio K., Seppälä J. Absorption properties of in-water constituents and their variation among various lake types in the boreal region. *Remote Sensing of Environment*. 2014;148:190–205. doi:10.1016/j.rse.2014.03.023
27. Ficek D., Meler J., Zapadka T., Ston-Egiert J. Modelling the light absorption coefficients of phytoplankton in Pomeranian lakes (northern Poland). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2012;5(4):54–63.
28. Korchemkina E.N., Molkov A.A. Regional bio-optical algorithm for Gorky Reservoir: first results. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(3):184–192. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192 (in Russian).
29. Ocean Optics / Ed. Monin A.S. M.: Nauka; 1983. 371 p. (in Russian).

Об авторах

КОРЧЁМКИНА Елена Николаевна, старший научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-0526-4083, Scopus AuthorID: 23004799100, WoS ResearcherID: I-1595-2015, SPIN-код (РИНЦ): 9973-4657

Коэффициент спектральной яркости вод Телецкого озера в августе 2023 г. и его связь с биооптическими характеристиками
Spectral reflectance coefficient of Lake Teletskoye in august 2023 and its relationship with bio-optical characteristics

СУСЛИН Вячеслав Владимирович, заведующий отделом динамики океана, ведущий научный сотрудник
ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8627-7603,
Scopus AuthorID: 6602501867, SPIN-код (РИНЦ): 1681-7926, e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

КУДИНОВ Олег Борисович, научный сотрудник ФГБУН ФИЦ МГИ, кандидат технических наук,
SPIN-код (РИНЦ): 2248-7034, e-mail: obk91@mail.ru

СУТОРИХИН Игорь Анатольевич, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: 0000-0002-7037-4812, Scopus AuthorID: 12789775100,
WoS ResearcherID: LKO 9395-3018, SPIN-код (РИНЦ): 2990-6901, e-mail: sia@iwep.ru

КИРИЛЛОВ Владимир Викторович, заведующий Лабораторией водной экологии ИВЭП СО РАН, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0001-9626-7153, Scopus AuthorID: 35233910500,
WoS ResearcherID: I-9333-2018, SPIN-код (РИНЦ): 7749-7710, e-mail: vkirillov@iwep.ru