Original Article

LIMNOLOGY FRESHWATER BIOLOGY

Euphotic zone depth according to measurements of the photosynthetically active radiation profile of Lake Teletskoye in August 2023: regional features

Suslin V.V.[1]*, Latushkin A.A.[1], Kudinov O.B.[1], Sutorikhin I.A.[2], Kirillov V.V.[2], Martynov O.V.[1]

[1] *FSBSI FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2, Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russia*
[2] *FSBSI Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of RAS, 1, Molodezhnaya str., Barnaul, 656038, Altai region, Russia*

ABSTRACT. The work analyzed measurements of the profile of photosynthetically active radiation (PAR) in Lake Teletskoye, obtained in August 2023. It was found that in the areas where rivers flow into the lake, the rate of vertical attenuation of photosynthetically active radiation is less than in the rest lake aquatorium. The maximum values of 0.577 m^{-1} were found in the northern part of the lake, the minimum - 0.247 m^{-1} in the central part of the lake, exposed to the river Chelyush runoff. All this indicates that the main source of dissolved organic matter is the degradation processes of organic matter in the lake itself, which are not associated with its supply due to river runoff. An estimate of the average PAR value attributable to the upper mixed layer was obtained. The range of its variability was from 0.13 to 0.62, which is also associated with river inflow.

Keywords: Lake Teletskoye, photosynthesis layer, *in situ* measurements, optical properties of inland water

For citation: Suslin V.V., Latushkin A.A., Kudinov O.B., Sutorikhin I.A., Kirillov V.V., Martynov O.V. Euphotic zone depth according to measurements of the photosynthetically active radiation profile of Lake Teletskoye in August 2023: regional features // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - P. 20-29. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-20

1. Introduction

The photosynthesis rate and primary production depend on the light conditions in the environment, which explains the relevance of studying the distribution of solar radiation in the lake (Sherstyankin, 1975; Sutorikhin et al., 2016; Churilova et al., 2018; Churilova et al., 2020a;b; Kovaleva and Suslin, 2022). The photosynthetic layer thickness (Z_{eu}) is one of the important characteristics of the aquatic ecosystem state, depending on the primary hydrooptical characteristics of the upper layer of water (Churilova, 2009). As part of the summer expedition of 2023, large-scale measurements of photosynthetically active radiation (PAR) profiles were carried out, including the entire water area of Lake Teletskoye.

Lake Teletskoye is a unique mountain lake with a special hydrodynamic regime and hydrochemical composition (Selegey and Selegey, 1978; Zinoviev et al., 2021) which determines the optical properties of its water.

The purpose of the work is to obtain an estimate of the thickness of the photosynthetic layer for various geographical areas of Lake Teletskoye, including areas adjacent to river mouths, using an array of PAR profile measurements, and to obtain estimates of some important characteristics of the light field, including the exponential attenuation of PAR and the proportion of the average PAR value in the upper mixed layer of the lake (UML).

The optical properties of the waters of Lake Teletskoye, in particular, the PAR and its attenuation coefficient, have been studied previously. However, the results presented in this paper have a wider spatial coverage of measurements than in (Akulova et al., 2022) and a more detailed regional analysis within the lake than in (Churilova et al., 2023; Churilova et al., 2024). In addition, the novelty lies in obtaining an estimate of the light in the upper mixed layer UML. Another important aspect is that all measurements were carried out using equipment developed and manufactured at the Marine Hydrophysical Institute of RAS.

2. Materials and methods

To solve the problem, we used measurements with the “CONDOR” instrument, which performed

*Corresponding author.
E-mail address: slava.suslin@mhi-ras.ru (V.V. Suslin)

Received: June 17, 2024; ***Accepted:*** January 09, 2025;
Available online: February 26, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

synchronous measurements of temperature (*T*), turbidity (*Turb*) and PAR profiles (Lee, 2012; Latushkin and Kudinov, 2019). All sensors of the "CONDOR" instrument are calibrated (Hydrobiophysical multiparametric submersible autonomous complex "CONDOR": URL: https://dent-s.narod.ru/kondor.html).

The analysis uses the results of measuring the PAR profiles at 56 stations obtained during the expedition to Lake Teletskoye in August 2023. A synchronous measurement of the temperature profile was also carried out to determine the thickness of the UML (Z_{UML}), which was defined as a temperature drop of 2°C from the surface to its lower boundary. The value of 2°C was chosen as a result of the analysis of temperature profiles for all stations performed (N = 56) in order to remove the influence of small rivers flowing into the lake on the UML. This analysis is not presented in this article. The criterion we introduced allows us to identify the main thermocline in the summer season, or more precisely, to clearly determine the position of the main thermocline, and thereby obtain an estimate of the thickness of the UML with sufficient accuracy (< 1 m).

A map of regions at which synchronous measurements of PAR and temperature profiles were carried out is presented in Fig. 1.

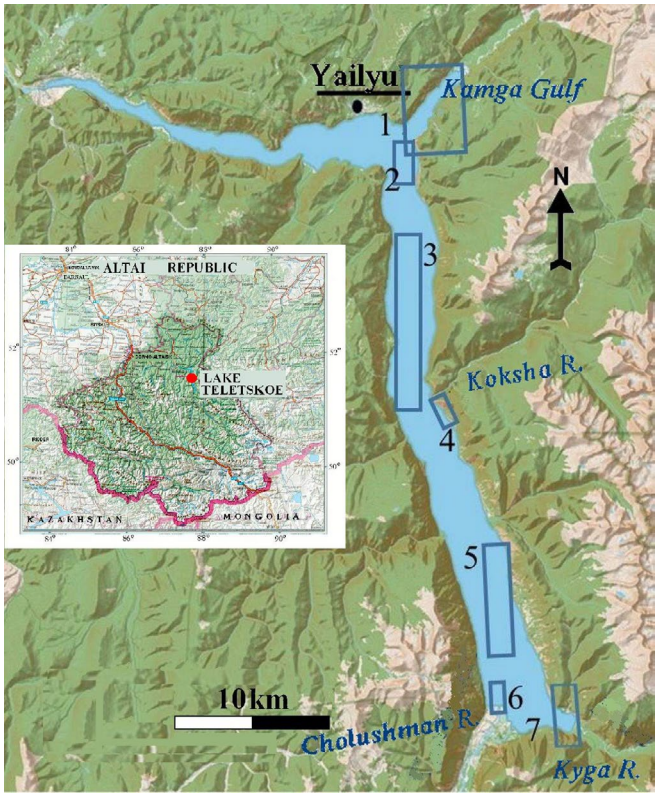


Fig.1. Map of the location of Lake Teletskoye and the regions where the research was conducted. The numbers on the maps indicate region numbers: 1 – Kamga Bay, 2 – opposite the Yailyu village, 3 – central deep-water part, 4 – mouth of the Koksha River, 5 – southern deep-water part, 6 – mouth of the Cholyshman River, 7 – mouth of the Kyga River.

An example of temperature and PAR profiles measured in Kamga Bay is shown in Fig. 2. The figure shows the position of the lower boundary of the UML and euphotic zone depth Z_{eu}, as well as the value of photosynthetically active radiation immediately below the water surface PAR(0⁻).

The entire lake was divided into 7 regions, including areas adjacent to the river mouths (see Table 1).

The procedure for processing data by the "CONDOR" instrument measured, including the calculation of the UML and Z_{eu} layer, is presented as an example in Fig. 2.

The value of the photosynthetic layer Z_{eu} was determined as the depth at which 1% of the level of photosynthetically active radiation incident on the water surface PAR(0⁺) was reached, where PAR(0⁺) = 1.06 • PAR(0⁻) (Mankovsky, 1996), PAR(0⁻) is photosynthetically active radiation immediately below the water surface. The PAR(0⁻) values were found by interpolating the measured PAR(z) profile at $z \to 0$ for the vertical attenuation coefficient K_d(PAR), independent of z

$$PAR(z) = PAR(0^-) \cdot \exp(-K_d(PAR) \cdot z) \quad (1).$$

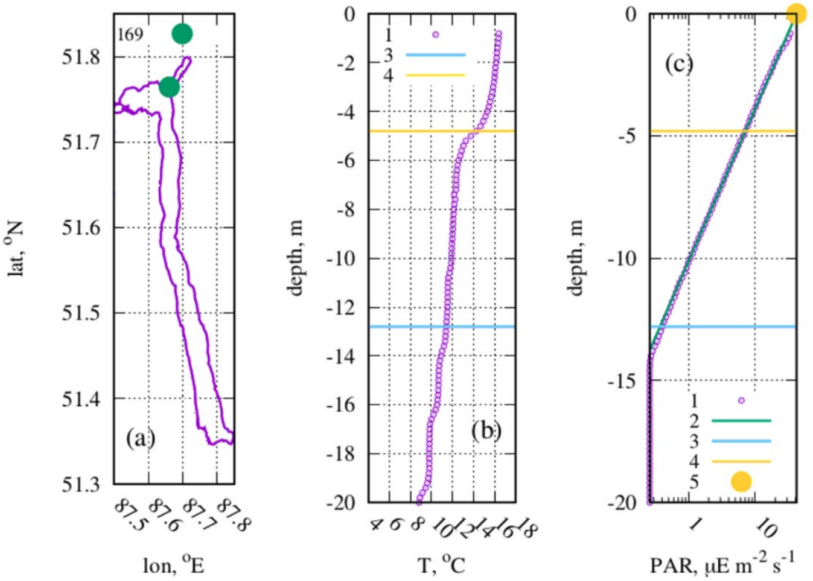


Fig.2. An example of simultaneous measurement of temperature profiles (b) and PAR (c) by the "CONDOR" instrument at station 169, carried out on August 17 in Kamga Bay (a), and the result of data processing: 1 – behavior of the profile of the measured parameter; 2 – linear approximation by equation (2); 3 – lower border of Z_{eu}; 4 – lower limit of the UML; 5 – PAR(0⁻).

The solution $\{K_d(\mathrm{PAR}), \mathrm{PAR}(0^-)\}$ was found by the least squares method after taking the logarithm of equation (1) in the form of a linear function (2)

$$y = -a \cdot z + b, \quad (2)$$

where $y \equiv ln(\mathrm{PAR}(z))$, $b \equiv ln(\mathrm{PAR}(0^-))$, $a \equiv K_d(\mathrm{PAR})$ is vertical attenuation coefficient of PAR in m^{-1}, z – depth in m.

Thus, Z_{eu} was determined both from direct measurements of the PAR profile and from expression (1) $Z_{eu} = -\frac{1}{K_d(\mathrm{PAR})} \cdot \ln(0.01)$, with known $K_d(\mathrm{PAR})$.

After finding the $\mathrm{PAR}(0^-)$ and the exponent a (or $K_d(\mathrm{PAR})$), it is easy to obtain an estimate of the average PAR proportion in the UML ($\omega \equiv \frac{\langle \mathrm{PAR}(0^- - Z_{UML}) \rangle}{\mathrm{PAR}(0^+)}$) in relation to the entire incident photosynthetically active radiation, where

$$\langle \mathrm{PAR}(0^- - Z_{UML}) \rangle = \frac{1}{Z_{UML}} \cdot \int_0^{Z_{UML}} \mathrm{PAR}(z) dz, \quad (3)$$

where $\langle \mathrm{PAR}(0^- - Z_{UML}) \rangle$ is the average value of PAR in the UML layer, integrating (3) taking into account (1), we obtain:

$$\omega = \frac{0.943}{K_d(\mathrm{PAR}) \cdot Z_{UML}} \cdot \left(1 - \exp(-K_d(\mathrm{PAR}) \cdot Z_{UML})\right), \quad (4)$$

3. Results and discussion

The result of comparison of Z_{eu} measured *in situ* with its value calculated from equation (1) with $K_d(\mathrm{PAR})$ independent of z is shown in Fig. 3. From Fig. 3 it can be seen that in situ Z_{eu} coincide quite satisfactorily with their calculated value according to formula (1) ($R^2 = 0.95$) for depth-independent $K_d(\mathrm{PAR})$. Figure 3 shows the results for 53 stations, since at 3 out of 56 stations the calculated Z_{eu} was greater than the sounding depth for the corresponding station.

Knowing $K_d(\mathrm{PAR})$ and $\mathrm{PAR}(0^+)$, it is easy to obtain an estimate of PAR(z) for any depth from the photosynthesis layer. For example, you can calculate the average PAR value in the UML layer, which is important for a number of problems in the functioning of phytoplankton (Churilova et al., 2020a). A summary table of the average values of the coefficients $\langle Z_{eu} \rangle$, $\langle K_d(\mathrm{PAR}) \rangle$, $\langle \omega \rangle$ and $\langle Z_{UML} \rangle$ and their standard deviations (RMS), maximum (max) and minimum (min) values for each of the seven regions is presented in Table. 2. The results we obtained – the range of values of the photosynthetic layer – are in satisfactory agreement with the previously obtained results of other researchers (Akulova et al., 2022; Churilova et al., 2023; Churilova et al., 2024).

Maximum values of 0.577 m^{-1} were found in the northern part of the lake in the Kamga bay (Fig. 1), minimum – 0.247 m^{-1} in the central part of the lake, exposed to the Kokshi river flow (Fig. 1). The average values of $\langle K_d(\mathrm{PAR}) \rangle$ for deepwater stations remoted from river mouths varied from north to south with a small minimum in the center of the lake – 0.45 m^{-1}, 0.34 m^{-1}, 0.38 m^{-1}, respectively. Figure 4a shows the

Table 1. Information about the study areas of Lake Teletskoye in August 2023

№	Number of measurements	Geographical location of the area
01	11	Northeast (Kamga Bay)
02	3	Northern part (opposite Yailyu village)
03	8	Central deepwater part
04	7	Central part (mouth of the Kokshi River)
05	2	Southern deepwater part
06	10	Southwestern part (mouth of the Cholyshman River)
07	15	South-eastern part (mouth of the Kyga River)

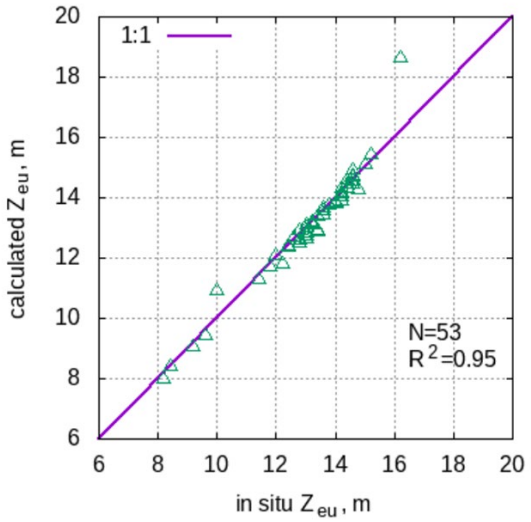


Fig.3. Comparison of *in situ* Z_{eu} with calculated Z_{eu} using equation (1).

relationship between $\langle K_d(\mathrm{PAR}) \rangle$ and $\langle Z_{eu} \rangle$ for seven regions, demonstrating regional variability. The nature of the relationship indicates that the optical properties of water carried out by rivers differ from the optical properties of the lake. Figure 4b illustrates the relationship between $\langle \omega \rangle$ and $\langle Z_{UML} \rangle$, which is also related to river inflow. The range of variability of ω was from 0.13 to 0.62 (Table 2). All of the listed features indicate that the main source of dissolved organic matter is the degradation processes of organic matter in the lake itself, which are not associated with its supply through river runoff.

4. Conclusions

It has been shown that in the areas where rivers flow, the vertical attenuation coefficient of photosynthetically active radiation is on average less than in the remaining lake aquatory. The maximum values of 0.577 m^{-1} were found in the northern part of the lake, the minimum – 0.247 m^{-1} in the central part of the lake,

Table 2. Statistical characteristics of PAR for seven regions of Lake Teletskoye

№	$\langle Z_{eu} \rangle \pm$ RMS min/max, m	$\langle K_d(\mathrm{PAR}) \rangle \pm$ RMS min/max, m^{-1}	$\langle \omega \rangle \pm$ RMS min/max	$\langle Z_{UML} \rangle \pm$ RMS min/max, m
01	13.3 ± 0.5 8.2/14.4	0.359 ± 0.022 0.315/0.577	0.44 ± 0.02 0.33/0.56	5.6 ± 0.4 3.8/8.2
02	10.9 ± 2.0 8.4/14.8	0.452 ± 0.067 0.322/0.547	0.31 ± 0.03 0.26/0.36	6.9 ± 0.6 6.0/8.0
03	13.9 ± 0.8 9.2/16.2	0.337 ± 0.027 0.247/0.509	0.51 ± 0.03 0.38/0.62	4.9 ± 0.5 3.0/7.6
04	13.2 ± 0.2 12.6/14.4	0.351 ± 0.006 0.322/0.365	0.31 ± 0.06 0.13/0.55	10.8 ± 2.1 4.2/20.6
05	12.6 ± 0.4 12.2/13.0	0.377 ± 0.013 0.364/0.390	0.32 ± 0.14 0.18/0.46	9.5 ± 4.5 5.0/14.0
06	12.9 ± 0.4 11.4/14.6	0.358 ± 0.010 0.312/0.408	0.19 ± 0.02 0.13/0.57	17.0 ± 0.7 3.8/19.6
07	13.6 ± 0.3 10/14.6	0.338 ± 0.007 0.309/0.422	0.32 ± 0.02 0.24/0.61	9.4 ± 0.7 3.2/12.2

Note: *PAR – μE m^{-2} s^{-1}

exposed to the river Kokshi runoff. This indicates that the main source of dissolved organic matter is the degradation processes of organic matter in the lake itself, which are not associated with its supply due to river runoff. In addition, an estimate was obtained for the proportion of the average PAR value attributable to the upper mixed layer, with a variability range of 0.13 – 0.62, which is also associated with river inflow.

Acknowledgements

The work was carried out within the frameworks of government assignments: for FSBSI FRC MHI RAS № FNNN-2024-0012, and for FSBSI IWEP SB RAS №0306-2021-0001 agreements with the administration of the Altai State Nature Reserve. The expeditionary work used scientific equipment of the CSU “Research Vessels of the FSBSI IWEP SB RAS”.

Conflict of interest

The authors declare no competing interest.

References

Akulova O.B., Bukaty V.I., Wagner A.A. et al. 2022. Photosynthetically active solar radiation in Lake Teletskoye during the open water period. Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Altai State University] 4(126): 11-17. (in Russian)

Churilova T.Ya. 2009. Seasonal and interannual variability of the depth of the photosynthesis zone in the Black Sea according to model calculations. Ekologicheskaya bezopasnost’ pribrezhnoj i shel’fovoj zon i kompleksnoe ispol’zovanie resursov shel’fa [Environmental safety of the coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources] 19: 265-278. (in Russian)

Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A. et al. 2024. Comparison of Bio-Optical Properties of Optically Complex Waters with Different Trophic Status. Physical Oceanography 31(4): 507–526.

Churilova T., Moiseeva N., Efimova T. et al. 2020a. Spectral bio-optical properties of Lake Baikal (July 2018 and September 2019). Limnology and Freshwater Biology 4: 910–911. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-910

Churilova T.Ya., Suslin V.V., Moiseeva N.A. et al. 2020b. Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. Journal of Applied Spectroscopy 86(6): 1084–1091. DOI: 10.1007/s10812-020-00944-0

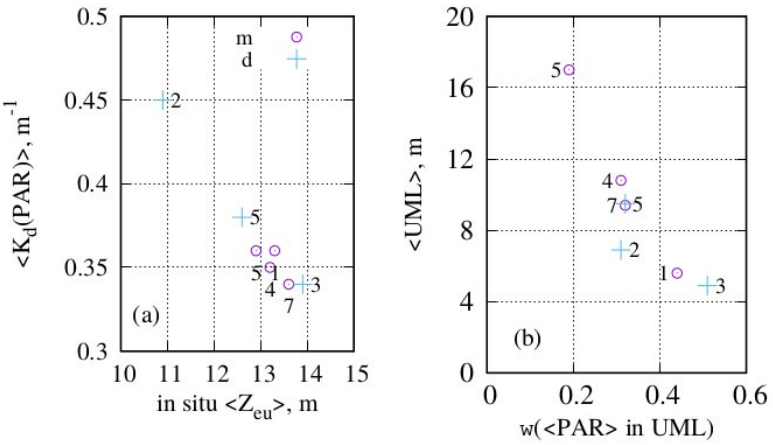


Fig.4. Relationship between the average values of the photosynthesis layer and the PAR attenuation coefficient in this layer (a); the PAR share in the UML and the thickness of the UML (b) in seven regions of Lake Teletskoye: (m) near river mouths and (d) in the deep-water part beyond from river mouths. The numbers indicate the measurement districts (see Tables 1 and 2).

Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Efimova T.V. et al. 2023. Water transparency and spectral downwelling irradiance in the Black and Azov seas and in Lake Teletskoye. Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 1278047. DOI: 10.1117/12.2690845

Churilova T., Moiseeva N., Latushkin A. et al. 2018. Development of operative ecological monitoring based on remote sensing data: preliminary results of investigation of biooptical properties of lake Baikal in July 2018. In: International Conference “Freshwater Ecosystems – Key Problems” LIN SB RAS, pp. 127.

Hydrobiophysical multiparametric submersible autonomous complex “CONDOR”. 2024. URL: https://dent-s.narod.ru/kondor.html (21.01.2024) (in Russian)

Kovalyova I.V., Suslin V.V. 2022. Integrated Primary Production in the Deep-Sea Regions of the Black Sea in 1998–2015. Physical Oceanography 29(4): 404-416. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-4-404-416

Latushkin A.A., Kudinov O.B. 2019. Autonomous sounding meter of photosynthetically active radiation. In: Andreeva A.Yu. et al. (Eds.), Materials of the IV All-Russian Scientific Conference of Young Scientists: Comprehensive studies of the World Ocean. Sevastopol, pp. 365–366. (in Russian)

Lee M.E. 2012. Development of hydro-optical instruments at MHI NAS of Ukraine. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy [Environmental Control Systems] 17: 7–20. DOI: 10.33075/2220-5861 (in Russian)

Mankovsky V.I. 1996. Fundamentals of ocean optics. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine. (in Russian)

Sherstyankin P.P. 1975. Experimental studies of the subglacial light field of Lake Baikal. Moscow: Nauka. (in Russian)

Selegey V.V., Selegey T.S. 1978. Lake Teletskoye. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)

Sutorikhin I.A., Bukaty V.I., Kharlamova N.F. et al. 2016. Climatic conditions and hydrooptical characteristics of freshwater lakes of the Altai Territory. Novosibirsk: Publishing house SB RAS. (in Russian)

Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.V. et al. 2021. Numerical modeling and field studies of the thermal bar in Lake Teletskoye. Meteorologiya i gidrologiya [Metrology and Hydrology] 5: 86-94. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94 (in Russian)

Оригинальная статья

Слой фотосинтеза по данным измерений профиля фотосинтетически активной радиации Телецкого озера в августе 2023 года: региональные особенности

Суслин В.В.[1]*, Латушкин А.А.[1], Кудинов О.Б.[1], Суторихин И.А.[2], Кирилов В.В.[2], Мартынов О.В.[1]

[1] *ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», 2, ул. Капитанская, Севастополь, 299011, Россия*
[2] *ФГБУН «Институт водных и экологических проблем СО РАН», 1, ул. Молодежная, Барнаул, 656038, Россия*

АННОТАЦИЯ. В работе выполнен анализ измерений профиля фотосинтетически активной радиации (ФАР) в Телецком озере, полученных в августе 2023 года. Получено, что в районах впадения рек показатель вертикального ослабления фотосинтетически активной радиации меньше, чем на остальной акватории озера. Максимальные значения 0.577 $м^{-1}$ обнаружены в северной части озера, минимальные – 0.247 $м^{-1}$ в центральной части озера, подверженной стоку р. Челюш. Все это указывает, что основным источником растворённой органики являются процессы деградации органического вещества в самом озере, не связанные с её поступлением за счёт стока рек. Получена оценка среднего значения ФАР, приходящейся на верхний квазиоднородный слой. Диапазон её изменчивости составил от 0.13 до 0.62, который также связан с притоком рек.

Ключевые слова: Телецкое озеро, слой фотосинтеза, измерения *in situ*, оптические свойства внутренних водоёмов

Для цитирования: Суслин В.В., Латушкин А.А., Кудинов О.Б., Суторихин И.А., Кирилов В.В., Мартынов О.В. Слой фотосинтеза по данным измерений профиля фотосинтетически активной радиации Телецкого озера в августе 2023 года: региональные особенности // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - С. 20-29. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-20

1. Введение

Скорость фотосинтеза и первичная продукция зависят от световых условий в среде обитания, что и объясняет актуальность исследования распространения солнечной радиации в озере (Шерстянкин, 1975; Суторихин и др., 2016; Churilova et al., 2018; Churilova et al., 2020a;b; Ковалёва и Суслин, 2022). Толщина слоя фотосинтеза (Z_{eu}) одна из важных характеристик состояния водной экосистемы, зависящая от первичных гидрооптических характеристик верхнего слоя воды (Чурилова, 2009). В рамках летней экспедиции 2023 года проведены масштабные измерения профилей фотосинтетически активной радиации (ФАР или PAR, photosyntetically active radiation), включающие всю акваторию Телецкого озера.

Телецкое озеро – уникальное горное озеро с особым гидродинамическим режимом и гидрохимическим составом (Селегей и Селегей, 1978; Зиновьев и др., 2021), что и определяет оптические свойства его воды.

Цель работы – получить оценку толщины слоя фотосинтеза для различных географических районов Телецкого озера, включая районы, прилегающие к устьям рек, с использованием массива измерений профиля ФАР, и получить оценки некоторых важных характеристик светового поля, включая показатель экспоненциального ослабления ФАР и доли среднего значения ФАР в верхнем квазиоднородном слое озера (ВКС или UML, upper mixed layer).

Оптические свойства вод Телецкого озера, в частности, ФАР и показатель её ослабления изучались и ранее. Однако представленные в данной работе результаты имеют более широкий пространственный охват измерениями, чем в работе (Акулова и др., 2022), и более подробный региональный анализ внутри озера, чем в работе (Churilova et al., 2023; Churilova et al., 2024). Кроме того, новизна состоит в получении оценки света в верхнем перемешанном слое. Другой немаловажный аспект состоит в том, что все измерения были выполнены с помощью аппаратуры разработанной и изготовленной в Морском гидрофизическом институте РАН.

*Автор для переписки.
Адрес e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru (В.В. Суслин)

Поступила: 17 июня 2024; ***Принята:*** 09 января 2025;
Опубликована online: 26 февраля 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.

2. Материалы и методы

Для решения задачи использовали измерения прибором «КОНДОР», который выполнял синхронные измерения профилей температуры (T), мутности (Turb) и ФАР (Ли, 2012; Латушкин и Кудинов, 2019). Все датчики прибора «КОНДОР» прокалиброваны (Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР»: URL: https://dent-s.narod.ru/kondor.html).

В анализе использованы результаты измерения профилей ФАР на 56 станциях, полученные в ходе экспедиции на Телецкое озеро в августе 2023 года. Проводилось и синхронное измерение профиля температуры для определения толщины ВКС, которая определялась, как падение температуры на 2°C от поверхности до его нижней границы. Величина 2°C была выбрана в результате анализа профилей температуры для всех, выполненных станций (N = 56), чтобы убрать влияние на ВКС небольших рек, впадающих в озеро. Этот анализ в данной статье не приведён. Введённый нами критерий позволяет выделить основной термоклин в летний сезон, точнее, чётко определить положение основного термоклина, и тем самым получить оценку толщины ВКС с достаточной точностью (< 1 м).

Карта районов, на которых выполнены синхронные измерения профилей ФАР и температуры, представлены на Рис. 1.

Пример профилей температуры и ФАР, измеренных в зал. Камга, показан на Рис. 2. На рисунке отмечено положение нижней границы ВКС и Z_{eu}, а также значение фотосинтетически активной радиации сразу под поверхностью воды ФАР(0^-).

Все озеро было разбито на 7 районов, включая районы, прилегающие к устьям рек (см. Таблицу 1).

Процедура обработки данных измерений прибором «КОНДОР», включающая расчёт слоя ВКС и Z_{eu}, представлена в виде примера на Рис. 2.

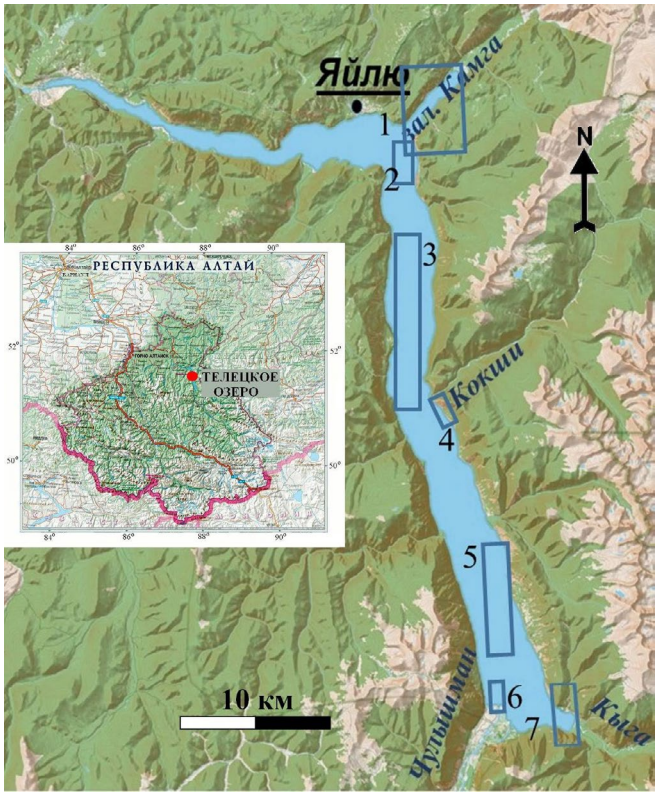


Рис.1. Схема расположения Телецкого озера и районов, где проводились исследования: 1– залив Камга, 2– напротив поселка Яйлю, 3– центральная глубоководная часть, 4– устье р. Кокши, 5– южная глубоководная часть, 6– устье р. Чулышман, 7 – устье р. Кыга.

Величина слоя фотосинтеза Z_{eu} определялась как глубина, на которой достигался 1 % уровень фотосинтетически активной радиации, падающей на поверхность воды ФАР(0^+), где ФАР(0^+) = 1.06 · ФАР(0^-) (Маньковский, 1996), ФАР(0^-) – фотосинтетически активная радиация сразу под поверхностью воды. Значения ФАР(0^-) находились путём интерполяции измеренного про-

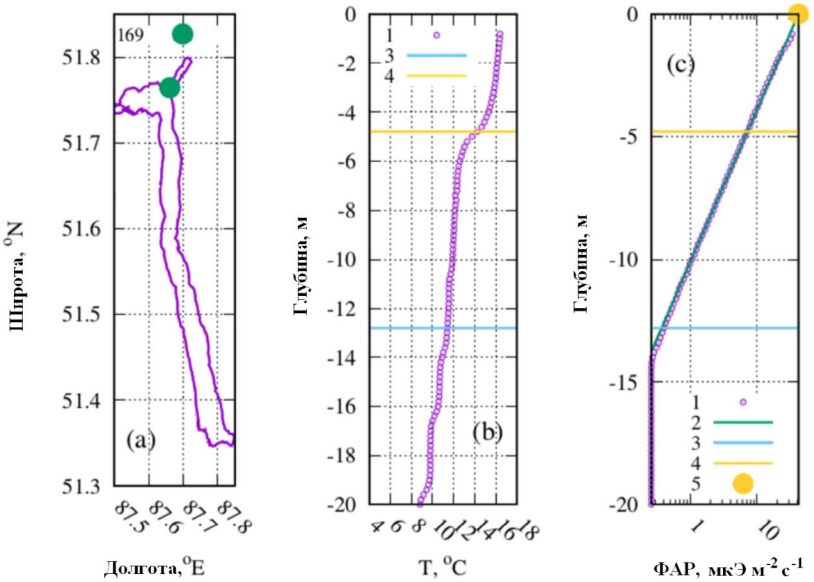


Рис.2. Пример одновременного измерения профилей температуры (*b*) и ФАР (*c*) прибором «КОНДОР» на ст. 169 район 1, выполненной 17 августа в заливе Камга (*a*), и результат обработки данных: 1 – поведение профиля измеряемого параметра; 2 – линейная аппроксимация уравнением (2); 3 – нижняя граница Z_{eu}; 4 – нижняя граница ВКС; 5 – ФАР(0^-).

филя ФАР(z) при $z \to 0^-$ для показателя вертикального ослабления K_d(ФАР), не зависящего от z

$$\text{ФАР}(z) = \text{ФАР}(0^-) \cdot \exp(-K_d(\text{ФАР}) \cdot z) \quad (1)$$

Процедура обработки данных измерений прибором «КОНДОР», включающая расчёт слоя ВКС и Z_{eu}, представлена в виде примера на Рис. 2.

Решение $\{K_d(\text{ФАР}), \text{ФАР}(0^-)\}$ найдено методом наименьших квадратов после логарифмирования уравнения (1) в виде линейной функции (2)

$$y = -a \cdot z + b, \quad (2)$$

где $y \equiv ln(\text{ФАР}(z))$, $b \equiv ln(\text{ФАР}(0^-))$, $a \equiv K_d(\text{ФАР})$ – показатель вертикального ослабления ФАР, в м$^{-1}$, z– глубина в м.

Таким образом, Z_{eu} определялось как по прямым измерениям профиля ФАР, так и из выражения (1) $Z_{eu} = -\frac{1}{K_d(\text{ФАР})} \cdot \ln(0.01)$, при известном K_d(ФАР).

После нахождения ФАР(0^-) и показателя экспоненты a (или K_d(ФАР)) легко получить оценку доли среднего значения ФАР в ВКС ($\omega \equiv \frac{\langle \text{ФАР}(0^- - Z_{BKC}) \rangle}{\text{ФАР}(0^+)}$) по отношению ко всей падающей фотосинтетически активной радиации, где

$$\langle \text{ФАР}(0^- - Z_{BKC}) \rangle = \frac{1}{Z_{BKC}} \cdot \int_0^{Z_{BKC}} \text{ФАР}(z) dz \,, \quad (3)$$

где $\langle \text{ФАР}(0^- - Z_{BKC}) \rangle$ – среднее значение ФАР в слое ВКС, интегрируя (3) с учётом (1), получаем

$$\omega = \frac{0.943}{K_d(\text{ФАР}) \cdot Z_{BKC}} \cdot \left(1 - \exp(-K_d(\text{ФАР}) \cdot Z_{BKC})\right). \quad (4)$$

3. Результаты и обсуждение

Результат сравнения Zeu, измеренной in situ, с её значением, вычисленным по уравнению (1) при Kd(ФАР), не зависящим от z, показан на Рис. 3. Из Рис. 3 видно, что in situ Zeu вполне удовлетворительно совпадают с их расчётным значением по формуле (1) (R2 = 0.95) для независящего от глубины Kd(ФАР). На Рис. 3 показаны результаты для 53 станций, т. к. на 3 из 56 станций расчётная Zeu была больше, чем глубина зондирования для соответствующей станции.

Зная K_d(ФАР) и ФАР(0^+), легко получить оценку ФАР(z) для любой глубины из слоя фотосинтеза. Например, можно сделать расчёт среднего значения ФАР в слое ВКС, что важно для ряда задач функционирования фитопланктона (Churilova et al., 2020a). Сводная таблица средних значений коэффициентов $\langle Z_{eu} \rangle$, $\langle K_d(\text{ФАР}) \rangle$, $\langle \omega \rangle$ и $\langle Z_{BKC} \rangle$ и их среднеквадратичных отклонений (СКО), максимального (макс) и минимального (мин) значений для каждого из семи районов представлена в Таблице 2. Полученные нами результаты – диапазон значений слоя фотосинтеза – удовлетворительно согласуются с ранее полученными результатами других исследователей (Акулова и др., 2022; Churilova et al., 2023; Churilova et al., 2024).

Таблица 1. Информация о районах исследования Телецкого озера в августе 2023 г.

№	Количество измерений	Географическое положение района
01	11	Северо-восток (залив Камга)
02	3	Северная часть (напротив поселка Яйлю)
03	8	Центральная глубоководная часть
04	7	Центральная часть (устье р. Кокши)
05	2	Южная глубоководная часть
06	10	Юго-западная часть (устье р. Чулышман)
07	15	Юго-восточная часть (устье р. Кыга)

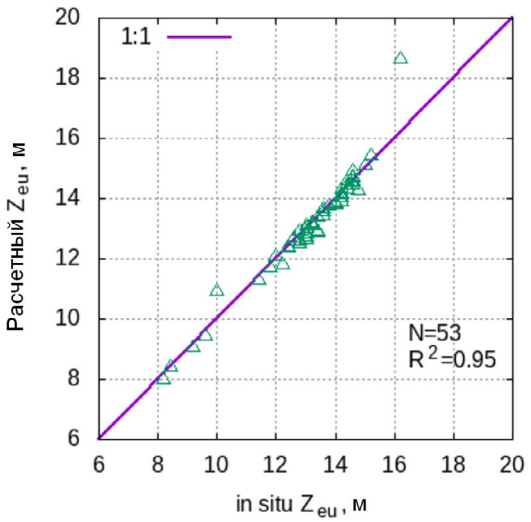


Рис.3. Сравнение *in situ* Z_{eu} с расчётным Z_{eu} по уравнению (1).

Максимальные значения 0.577 м$^{-1}$ обнаружены в северной части озера в зал. Камга (Рис. 1 район 1), минимальные – 0.247 м$^{-1}$ в центральной части озера, подверженной стоку р. Кокши (Рис. 1 район 4). Средние значения $\langle K_d(\text{ФАР}) \rangle$ для глубоководных станций, удалённых от устьев рек, менялись с севера на юг с небольшим минимумом в центре озера – 0.45 м$^{-1}$, 0.34 м$^{-1}$, 0.38 м$^{-1}$ соответственно. На Рис. 4a показана связь между $\langle K_d(\text{ФАР}) \rangle$ и $\langle Z_{eu} \rangle$ для семи районов, демонстрирующая региональную изменчивость. Характер связи указывает, что оптические свойства вод, выносимых реками, отличаются от оптических свойств озера. На Рис. 4b проиллюстрирована связь между $\langle \omega \rangle$ и $\langle Z_{BKC} \rangle$, которая также связана с притоком рек. Диапазон изменчивости ω составил от 0.13 до 0.62 (Таблица 2). Все перечисленные особенности указывают, что основным источником растворённой органики являются процессы деградации органического вещества в самом озере, не связанные с её поступлением за счёт стока рек.

Таблица 2. Статистические характеристики ФАР для семи районов Телецкого озера

№	$\langle Z_{eu} \rangle \pm$ СКО **мин/макс, м**	$\langle K_d(\text{ФАР}) \rangle \pm$ СКО **мин/макс, м$^{-1}$**	$\langle \omega \rangle \pm$ СКО **мин/макс**	$\langle Z_{BKC} \rangle \pm$ СКО **мин/макс, м**
01	13.3 ± 0.5 8.2/14.4	0.359 ± 0.022 0.315/0.577	0.44 ± 0.02 0.33/0.56	5.6 ± 0.4 3.8/8.2
02	10.9 ± 2.0 8.4/14.8	0.452 ± 0.067 0.322/0.547	0.31 ± 0.03 0.26/0.36	6.9 ± 0.6 6.0/8.0
03	13.9 ± 0.8 9.2/16.2	0.337 ± 0.027 0.247/0.509	0.51 ± 0.03 0.38/0.62	4.9 ± 0.5 3.0/7.6
04	13.2 ± 0.2 12.6/14.4	0.351 ± 0.006 0.322/0.365	0.31 ± 0.06 0.13/0.55	10.8 ± 2.1 4.2/20.6
05	12.6 ± 0.4 12.2/13.0	0.377 ± 0.013 0.364/0.390	0.32 ± 0.14 0.18/0.46	9.5 ± 4.5 5.0/14.0
06	12.9 ± 0.4 11.4/14.6	0.358 ± 0.010 0.312/0.408	0.19 ± 0.02 0.13/0.57	17.0 ± 0.7 3.8/19.6
07	13.6 ± 0.3 10/14.6	0.338 ± 0.007 0.309/0.422	0.32 ± 0.02 0.24/0.61	9.4 ± 0.7 3.2/12.2

Примечание: * ФАР – мкЭ м$^{-2}$ с$^{-1}$.

4. Выводы

Показано, что в районах впадения рек показатель вертикального ослабления фотосинтетически активной радиации в среднем меньше, чем на остальной акватории озера. Максимальные значения 0.577 м$^{-1}$ обнаружены в северной части озера, минимальные – 0.247 м$^{-1}$ в центральной части озера, подверженной стоку р. Кокши. Это указывает, что основным источником растворённой органики являются процессы деградации органического вещества в самом озере, которые не связаны с её поступлением за счёт стока рек. Кроме того, получена оценка доли среднего значения ФАР, приходящейся на верхний квазиоднородный слой, с диапазоном изменчивости 0.13 – 0.62, который также связан с притоком рек.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственных заданий ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2024-0012 и ФГБУН ИВЭП СО РАН №0306-2021-0001 и договоров с администрацией ФГБУ «Алтайский государственный заповедник». В экспедиционных работах использовалось научное оборудование ЦКП «Научно-исследовательские суда ИВЭП СО РАН».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Акулова О.Б., Букатый В.И., Вагнер А.А. и др. 2022. Фотосинтетически активная солнечная радиация в Телецком озере в период открытой воды. Известия Алтайского государственного университета 4(126): 11-17.

Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В. и др. 2021. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере. Метрология и гидрология 5: 86-94. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94

Ковалёва И.В., Суслин В.В. 2022. Интегральная первичная продукция в глубоководных районах Черного моря в 1998 - 2015 годах. Морской гидрофизический журнал 38(4): 432-445. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-4-432-445

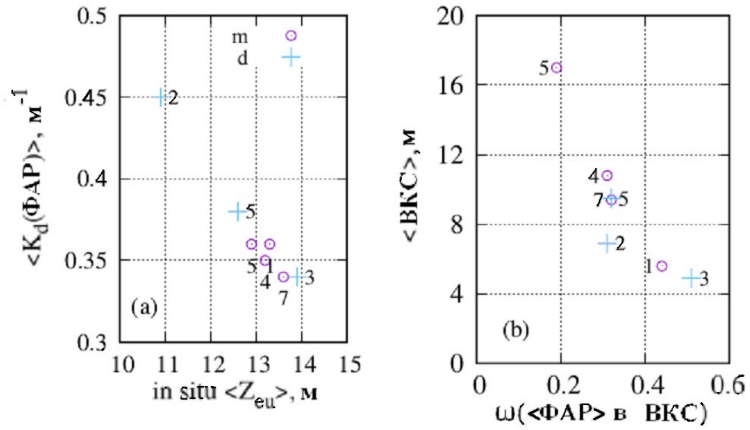


Рис.4. Связь между средними значениями слоя фотосинтеза и показателя ослабления ФАР в этом слое (a) и доли ФАР в ВКС и толщины ВКС (b) в семи районах Телецкого озера: (*m*) около устьев рек и (*d*) – в глубоководной части вдали от устьев рек. Цифрами показаны номера районов (см. Таблица 1 и 2).

Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР». 2024. URL: https://dent-s.narod.ru/kondor.html (21.01.2024).

Латушкин А.А., Кудинов О.Б. 2019. Автономный зондирующий измеритель фотосинтетически активной радиации. В: Андреева А.Ю. и др. (ред.), Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых: Комплексные исследования Мирового океана. Севастополь, С. 365-366.

Ли М.Е. 2012. Разработки гидрооптических приборов в МГИ. Системы контроля окружающей среды 17: 7–20. DOI: 10.33075/2220-5861

Маньковский В.И. 1996. Основы оптики океана. Севастополь: МГИ НАН Украины.

Селегей В.В., Селегей Т.С. 1978. Телецкое озеро. Ленинград: Гидрометеоиздат.

Суторихин И.А., Букатый В.И., Харламова Н.Ф. и др. 2016. Климатические условия и гидрооптические характеристики пресноводных озер Алтайского края. Новосибирск: Изд-во СО РАН.

Чурилова Т.Я. 2009. Сезонная и межгодовая вариабельность глубины зоны фотосинтеза в Черном море по модельным расчетам. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа 19: 265-278.

Шерстянкин П.П. 1975. Экспериментальные исследования подледного светового поля озера Байкал. Москва: Наука.

Churilova T., Moiseeva N., Efimova T. et al. 2020a. Spectral bio-optical properties of Lake Baikal (July 2018 and September 2019). Limnology and Freshwater Biology 4: 910–911. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-910

Churilova T.Ya., Suslin V.V., Moiseeva N.A. et al. 2020b. Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. Journal of Applied Spectroscopy 86(6): 1084–1091. DOI: 10.1007/s10812-020-00944-0

Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Efimova T.V. et al. 2023. Water transparency and spectral downwelling irradiance in the Black and Azov seas and in Lake Teletskoye. Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 1278047. DOI: 10.1117/12.2690845

Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A. et al. 2024. Comparison of Bio-Optical Properties of Optically Complex Waters with Different Trophic Status. Physical Oceanography 31(4): 507–526.

Churilova T., Moiseeva N., Latushkin A. et al. 2018. Development of operative ecological monitoring based on remote sensing data: preliminary results of investigation of biooptical properties of lake Baikal in July 2018. In: International Conference “Freshwater Ecosystems – Key Problems” LIN SB RAS, pp. 127.