

Long-term dynamics of spectral water transparency in the surface layer of Lake Teletskoye in summer

Akulova O.B.*^{ORCID}, Bukaty V.I.

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia

ABSTRACT. The article presents the long-term experimental data on spectral water transparency in the surface layer of Lake Teletskoye (21 sampling stations) obtained in summer of 2017–2022. During the study period, values of the light attenuation index calculated at the natural logarithmic base at four wavelengths (430, 450, 550 and 670 nm) ranged within 0.2–4.0 m⁻¹. The index of light absorption by yellow substance varied from 0.1 to 3.2 m⁻¹. Relative transparency measured with the use of a white Secchi disk made up 0.8–11.7 m at its average of 6.3 m. Over a 6-year study period, the content of chlorophyll-*a* in the surface layer was 0.1–4.1 mg/m³ that corresponded to the oligotrophic type of lakes. The concentration of yellow substance in the lake, optically determined through measuring light absorption by yellow substance at a wavelength of $\lambda = 450$ nm, ranged from 0.9 to 15.0 g/m³. Calculations of the spectral contribution of the main optically active components of lake water to light attenuation in the surface layer of Lake Teletskoye in various sampling sites indicated that yellow substance and suspension had the greatest optical effect on the total attenuation. It is shown that the optic structure of the study reservoir (dynamics of major primary hydro-optical properties) depends on spatial-temporal variability of concentrations of different optically active components influenced by the in-water processes closely related with those occurred in the lake catchment.

Keywords: spectral transparency of water, light attenuation index, index of light absorption by yellow substance, physical model, yellow substance, chlorophyll-*a*, suspension, pure water, Lake Teletskoye

For citation: Akulova O.B., Bukaty V.I. Long-term dynamics of spectral water transparency in the surface layer of Lake Teletskoye in summer // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - P. 1228-1242. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-5-1228

1. Introduction

Water transparency was long thought to be just a qualitative visually defined characteristics. Traditionally, relative transparency of various natural waters (oceans, seas, lakes, reservoirs, rivers, etc.) is determined by a semi-instrumental method, i.e. maximum visibility depth of a standard Secchi disk (SD) in the water column until its complete disappearance from view (measured in meters). Close to waters of oceans and seas, water transparency of Lake Baikal is one of the highest among freshwater water bodies due to few dissolved and suspended substances. For instance, SD in Baikal water is visible to a depth of 40 m (Sherstyankin, 1993), while in Lake Teletskoye – up to 15.5 m (Selegy et al., 2001). This method, widely used by hydrobiologists because of its simplicity and practicality, is still considered subjective. It has significant measurement

errors (20% or more) and limitations in application during a winter under-ice period. Being universal and more precise, electronic spectrophotometric methods and devices (spectrophotometers, turbidimeters, transparency meters, etc.) can measure spectral water transparency at any depth day and night with the provision of its data records.

According to (Erlov, 1980; Kopelevich and Shifrin, 1981; Shifrin, 1983; Kopelevich, 1983; Mankovsky et al., 2009; Dera, 1992; Mobley, 1994; Mankovsky, 2011; Levin, 2014), spectral transparency of water (measured in reverse meters) refers to the primary (or internal, intrinsic) hydro-optical features. It is a physical quantity characterizing optical properties of natural waters. Spectral water transparency defines the conditions for light propagation in water and contains the information about suspended organic-mineral particles and organic matter dissolved there.

*Corresponding author.

E-mail address: akulova8282@mail.ru (O.B. Akulova)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** September 17, 2024;

Available online: October 31, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



The relevance of our study is dictated by the need to expand and improve the understanding of spectral transparency of Lake Teletskoye waters greatly depending on its periodically varying main optically active components, i.e. yellow substance (YS), suspension (S), chlorophyll (Chl) and pure water (PW). Currently, special attention is worldwide paid to studying the spectral contribution of each optically active components of natural waters to the total light attenuation and dynamics of their concentrations in time and space.

The purpose of our study is to experimentally estimate the longstanding variations in spectral water transparency in the 5–7 cm surface layer of Lake Teletskoye in summer of 2017–2022 and the influence of its main optically active components on the total light attenuation.

2. Material and methods

Object of study

Lake Teletskoye (coordinates: 51°21'46" – 51°48'36"N, 87°14'40" – 87°50'54"E) is a deep-water reservoir of tectonic origin located at an altitude of 434 m asl in the northeastern part of the Altai Mountains (south of Western Siberia). Its water area is 227.3 km², drainage basin area – 20400 km², length – 77.8 km, average width – 2.9 km, maximum depth – 323.0 m, and volume – 41.1 km³ (Selegey and Selegey, 1978). The lake consists of two parts, i.e. the 50 km southern elongated along the meridian and the northern latitudinal one of 28 km long. As compared to the deep-water (pelagic) zone, the shallow (littoral) part of the lake is distinguished by a considerable hydrodynamic impact caused by intensive wind-wave processes (maximum wave height up to 2.5 m) and significant (up to 6 m) annual fluctuations in water levels. The lake's coastline is weakly rugged. There are few bays here, but the largest are Kamginsky and Kyginsky with an area of

6.5 km² and 3.1 km², respectively. Kamginsky Bay is the shallowest and well-protected from waves. In terms of thermal regime and soil type, it is the most favorable among all bays of Lake Teletskoye. By its hydrochemical regime, the lake is a weakly mineralized, oxygen-rich mountain water body with low temperatures and a little content of organic and biogenic substances in the water (Selegey et al., 2001).

In recent years, the anthropogenic load on the lake (especially in its northern part) has increased due to intensive development of tourism in the Altai Mountains. Ecosystems of cold-water oligotrophic lakes are the most vulnerable to external impacts. Poor development of aquatic organisms in such reservoirs is responsible for the low potential of biological self-purification of coming from the catchment suspended, dissolved and slightly soluble substances able to affect water quality and intensity of intra-reservoir processes significantly.

Research methods

Studies of the main hydro-optical characteristics (indicators of light attenuation by water, light absorption by yellow substance and relative transparency measured using a white Secchi disk) in the water area of Lake Teletskoye were carried out by IWEP SB RAS in summer of 2017–2022 (July 7–11, 2017; June 19–23, 2018; July 1–5, 2019; June 24–29, 2020; July 29–August 1, 2021; August 1–5, 2022).

Every year, 21 samples were taken from the surface layer of Lake Teletskoye using a bathometer installed a board of a research vessel (Fig. 1). During the 6-year period of the lake study, a total of 126 water samplings were implemented and 1008 separate measurements of spectral water transparency (transmission factor) at four wavelengths (430, 450, 550 and 670 nm) on the stationary single-beam spectrophotometer PE-5400UF before and after sample filtration were examined in the laboratory.

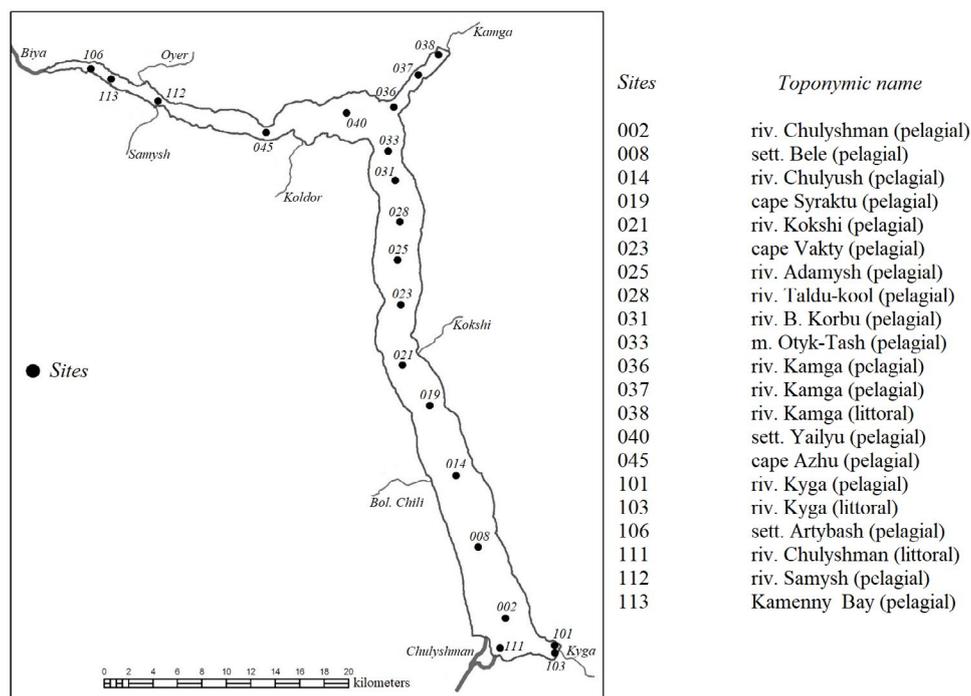


Fig.1. Sampling sites in the water area of Lake Teletskoye

The spectral light attenuation index $c(\lambda)$ was calculated using the formula derived from the Bouguer's law

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

where L is the length of a measuring glass cuvette of 50 mm long, $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ – the spectral transparency of water in relative units; $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ – the intensity of transmitted and incident light on the cuvette, respectively, λ – the wavelength of light. The indicator of light absorption by yellow substance $a_{ys}(\lambda)$ was determined after measuring spectral transparency of the water purified from suspension by filtration through «Vladipor» membranes of MFAS-OS-1 type with a pore diameter of 0.22 μm . The maximum absolute error in measuring $c(\lambda)$ and $a_{ys}(\lambda)$ within the studied spectral range made up 0.1 m^{-1} .

The spectral dependence of light absorption by YS was approximated by the exponential law

$$a_{ys}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda}, \quad (2)$$

where μ – the coefficient of spectral variability, characterizing the qualitative composition of dissolved organic matter (DOM). Following (Mankovsky, 2015), we measured $a_{ys}(450)$ (at $\lambda = 450$ nm) and estimated the content of YS in water samples by the formula

$$C_{ys} = a_{ys}(450) / a_{sp,ys}(450). \quad (3)$$

Here, C_{ys} is the concentration of YS, in g/m^3 , $a_{sp,ys}(450)$ is the specific indicator of light absorption by YS (m^2/g). Taking into account the approach proposed in (Mankovsky, 2015), we calculated C_{ys} using the value $a_{sp,ys}(450)$ from (Nyquist, 1979).

In addition, to compare our data on spectral water transparency with the results of similar optical studies previously performed in aquatic ecosystems by other researchers, we measured relative transparency by SD .

The concentrations of chlorophyll C_{chl} were determined by a standard spectrophotometric method according to (GOST, 2003).

The relative spectral contribution of major optically active components of lake water (S, YS, Chl-*a* and PW) to $c(\lambda)$ in the surface layer of the studied reservoir was calculated using the modified semi-empirical light attenuation model (Akulova, 2015) first proposed by O.V. Kopelevich (Kopelevich, 1983) and having the form

$$c(\lambda) = a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + b_s(\lambda) + a_{pw}, \quad (4)$$

where $a_{chl}(\lambda)$ and $a_{ys}(\lambda)$ are indicators of spectral absorption by Chl-*a* and YS, respectively, $b_{mol}(\lambda)$ – spectral molecular scattering by PW, $b_s(\lambda)$ – spectral scattering by S, $a_{pw}(\lambda)$ – spectral absorption by PW. As can be seen from this expression, spectral attenuation of light is described by a three-parameter model. Since the parameter $a_{ys}(\lambda)$ is identified experimentally, the spectral index for PW scattering $b_s(\lambda)$ can be derived from the formula

$$b_s(\lambda) = c(\lambda) - [a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + a_{pw}(\lambda)]. \quad (5)$$

The trophic status was assessed using the Carlson Trophic State Index (Carlson, 1977) and the

international trophic classification of water bodies (Environment Canada, 2004). We also applied the spectral index of light attenuation $c(\lambda)$. The oligotrophic type of reservoirs corresponds to a range of values $c(\lambda)$ from 0 to 2 m^{-1} , mesotrophic – from 2 to 3 m^{-1} , eutrophic – from 3 to 23 m^{-1} , and hypereutrophic – from 23 m^{-1} or more (Sutorikhin et al., 2017).

3. Results and discussion

Summer field works (2017–2022) in Lake Teletskoye allowed to estimate the primary hydro-optical characteristics, i.e. indicators of light attenuation $c(\lambda)$, light absorption by yellow substance $a_{ys}(\lambda)$, relative transparency according to SD at heterogeneous spatial distribution. Values of $c(\lambda)$ at four wavelengths ($\lambda = 430, 450, 550$ and 670 nm) in water samples taken in the surface layer of the reservoir varied from 0.2 to 4.0 m^{-1} . In summer of 2017 and 2021, this indicator changed slightly (1.0–1.6 m^{-1}). Reduced spectral transparency was noted in 2022 (0.2 m^{-1}). At the confluence of rivers Chulyshman, Chulyush and Kyga, including Cape Syraktu, $c(\lambda)$ exceeded 3.0 m^{-1} . Its peak was registered in the littoral zone of the Kyga River in 2018–2020. This is due to intensive removal of suspension (mainly mineral) by river waters and shoreline destruction. Here, in shallow waters, induced by wind-and-waves currents lifted bottom sediments and mixed them throughout the water column. In the pelagic zone, from Cape Vakty (site 023) to Cape Azhu (site 045), including Kamenny Bay (site 113), $c(\lambda)$ did not exceed 2.1 m^{-1} . This is in good agreement with YS content (close to its average in summer).

Over a 6-year period of optical investigations, indicators of light absorption by yellow substance $a_{ys}(\lambda)$ at wavelengths $\lambda = 430, 450, 550$ and 670 nm in the surface layer showed minor fluctuations (0.1–3.2 m^{-1}). Maximum values (above 2.0 m^{-1}) were recorded in 2018–2020 on rivers Chulyshman, Chulyush and Kyga, including Cape Syraktu. As an example, Fig. 2 and 3 represent the dynamics of $c(430)$ and $a_{ys}(450)$, respectively.

During the study period, SD -measured relative transparency widely ranged as 0.8–11.7 m with its average of 6.3 m. Transparency of 11.0 m was observed in 2019 in the pelagic zone of the Adamysh and Taldukool (sites 025 and 028, respectively). The highest SD value (11.7 m) was marked at the village of Yailyu in 2018.

It is known from (Mankovsky et al., 1996; Kukushkin, 2011; Voskresenskaya et al., 2011; Korchemkina and Latushkin, 2016; Churilova et al., 2018; 2022; Matyushenko et al., 2001; Betancur-Turizo et al., 2018; Shi et al., 2017; Slade and Boss, 2015; Korosov et al., 2017; Woźniak and Stramski, 2004; Reinart et al., 2004) that spectral transparency of water largely depends on the content of suspension (organic, mineral). Therefore, to explain inter-annual variations of $c(\lambda)$, the data on chlorophyll-*a* concentrations C_{chl-a} are required.

In the course of our 6-year study, the content of Chl-*a* the main photosynthetic pigment of phytoplankton

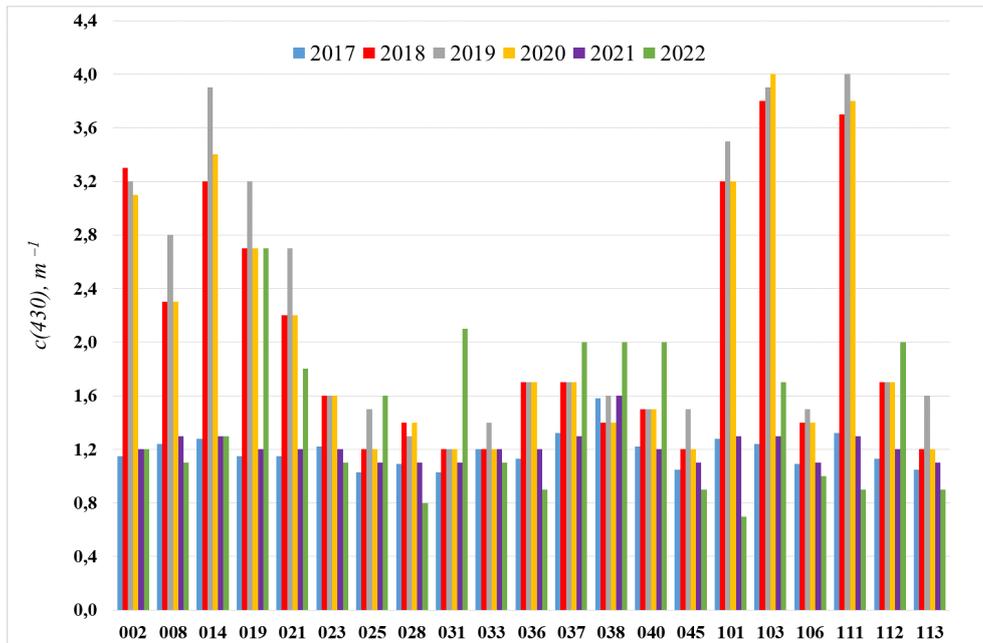


Fig.2. Long-term dynamics of light attenuation at a wavelength of $\lambda = 430$ nm in different sites of Lake Teletskoye

algae, varied as $0.1\text{--}4.1$ mg/m^3 (average: 2.1 mg/m^3), thereby corresponding to the oligotrophic type of lakes (Fig. 4). Its maximum was recorded in 2021 in all sampling sites of the lake ($1.1\text{--}4.1$ mg/m^3), while its minimum – in 2019 ($0.1\text{--}1.8$ mg/m^3). In general, the lake is characterized by poor development of algae phytoplankton because of low concentrations of nutrients and instability of the water column most of the year. In Lake Teletskoye waters, the specialists of the Chemical Analytical Center of IWEP SB RAS headed by Dr. Sc. Papina detected a low content ($0.7\text{--}1.9$ mg/dm^3 that is typical for oligotrophic lakes) of biogenic elements of the nitrogen group dominated by nitrate ions as a mineral nitrogen form. The concentrations of phosphate ions in the lake were insignificant (within micrograms), while silicon was one or two orders of magnitude higher than the content of other biogenic elements and averaged $2.2\text{--}2.9$ mg/dm^3 .

In 2017–2022, concentrations of yellow substance C_{ys} in the surface layer of the lake varied greatly, i.e. from 0.9 to 15.0 g/m^3 (average: 8.0 g/m^3) (Fig. 5). For the last two years of our investigations, it decreased ($0.9\text{--}7.1$ g/m^3) and reached the indicators of 2017 ($2.9\text{--}5.1$ g/m^3).

Calculations of the spectral contribution of optically active components of the lake water in the surface layer of Lake Teletskoye in various sampling sites are evidence of the greatest optical influence of YS and S on the total attenuation.

In 2017, the maximum contribution (89.2%) to light attenuation by YS at $\lambda = 430$ nm was noted in the littoral zone of the river Kamga (site 038). At a wavelength of 550 nm, this indicator varied from 60.0% to 83.3% in sites 111 and 038 of the Chulyshman River littoral. Suspension made its maximum contribution (17.1%) at $\lambda = 430$ nm in site 103 of the Kyga River.

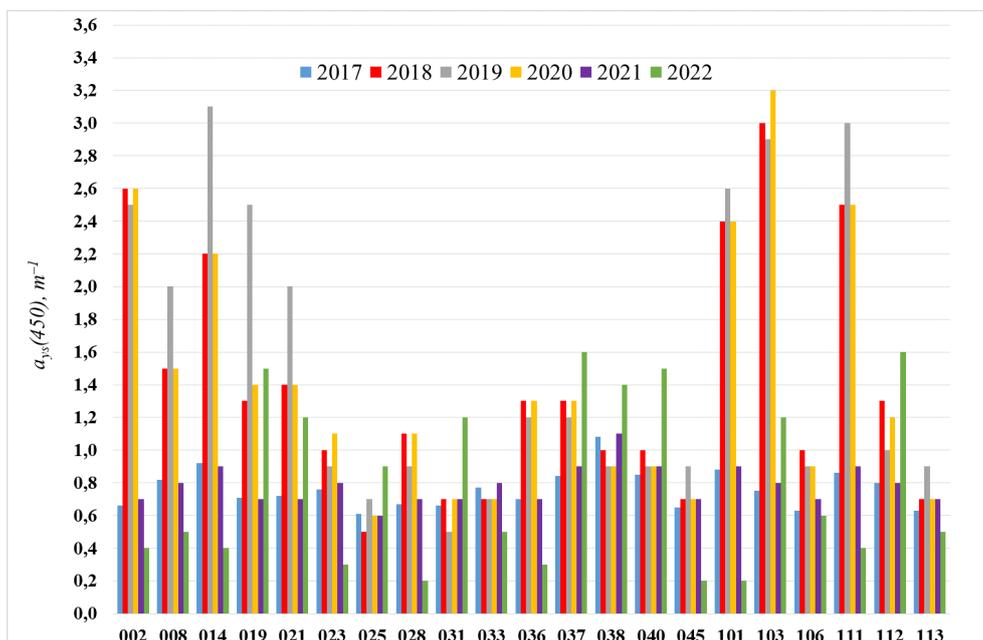


Fig.3. Long-term dynamics of light absorption by YS at a wavelength of $\lambda = 450$ nm in different sites of Lake Teletskoye

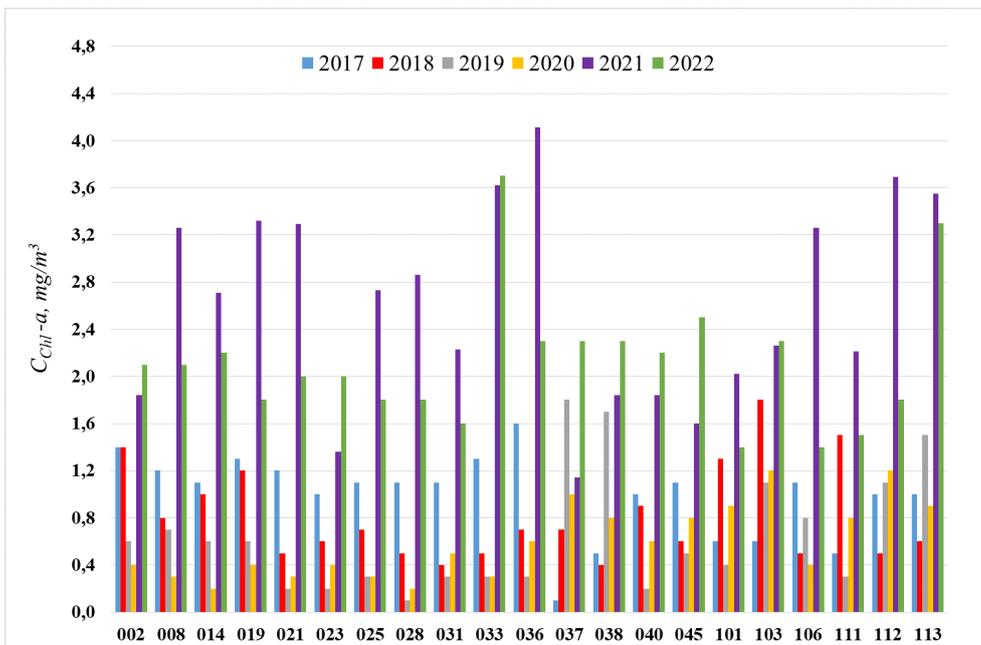


Fig.4. Long-term dynamics of chlorophyll-a concentrations in different sites of Lake Teletskoye

It increased to 28.1% at $\lambda=550$ nm in site 111. The contribution of PW was insignificant at $\lambda=430$ nm in all sampling stations (less than 0.4%). However, it drastically increased in the long-wave region (up to 18.8%) at $\lambda=550$ nm. The contribution of chlorophyll at $\lambda=430$ nm was 0.6% – 11.3% (sites 037 and 036 of the pelagic zone of the Kamga River), whereas at $\lambda=550$ nm – from 0.1% (site 037) to 2.6% (site 002 – the pelagic zone of the Chulyshman River).

In 2018, the largest contribution of YS to $c(\lambda)$ at $\lambda=430$ nm occurred in the pelagic zone of rivers Kamga (site 036) and Chulyshman (site 002), i.e. 94.1 and 90.9%, respectively. At a wavelength of 550 nm, its contribution varied from 40.0% (site 025 – the pelagic zone of the Adamysh River) to 91.3% (site 103 – the littoral of the Kyga River). Suspension made the maximum contribution (33.4%) at $\lambda=430$ nm in site 119 of the pelagic zone of Cape Syraktu, which increased to 47.8% in site 025 of the pelagic zone of the Adamysh

River at $\lambda=550$ nm. Contribution of PW was inessential (0.4%) at $\lambda=430$ nm. However, it greatly increased up to 14.1% in the long-wave region at $\lambda=550$ nm. The contribution of Chl-a at $\lambda=430$ nm ranged as 1.8% (site 021 – the pelagic zone of the Kokshi River) and 4.8% (site 040 – the pelagic zone of Yailyu village), at $\lambda=550$ nm – from 0.3% to 1.2% (sites (021 and 040 of the pelagic zone of Yailyu village).

In 2019, the largest contribution of YS at $\lambda=430$ nm was noted in the pelagic zone of rivers Chulyush, Kyga and Kokshi (87.1, 85.7 and 85.1%, respectively). At a wavelength of 550 nm, the contribution of YS changed from 50.0% (the pelagic zone of the B. Korbu River and Kamenny Bay, respectively) to 95.4% (the pelagic zone of the Chulyush River). Suspension made its maximum contribution (31.5%) to light attenuation at $\lambda=430$ nm in site 025 of the pelagic part of the Adamysh River, increasing to 41.9% at $\lambda=550$ nm in site 113 of the pelagic zone of

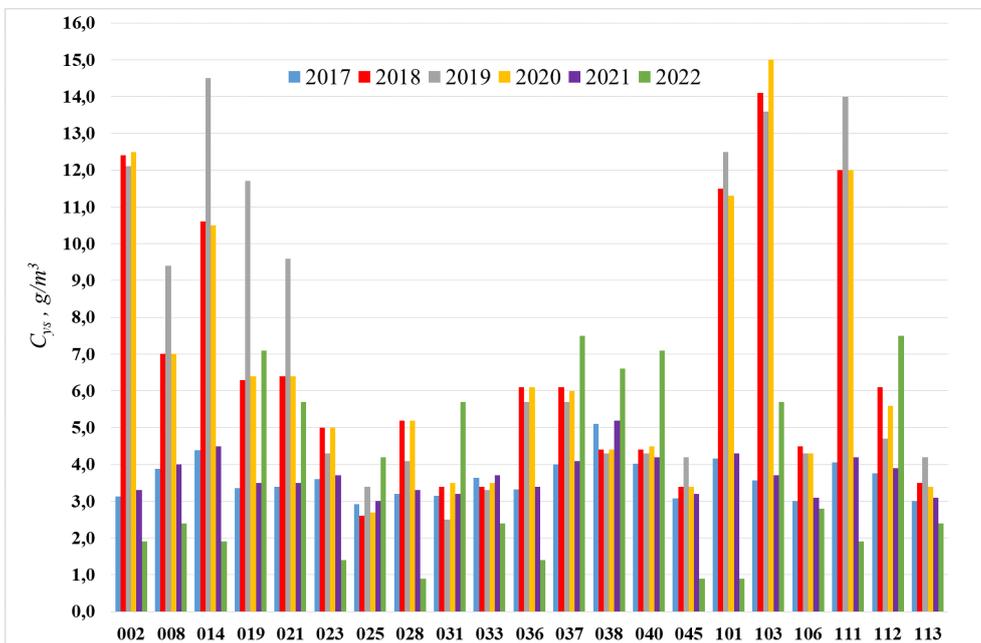


Fig.5. Long-term dynamics of YS concentrations in different sites of Lake Teletskoye

Kamenny Bay. The contribution of PW to light attenuation was insignificant (up to 14.1%) at $\lambda = 430$ nm (less than 0.4%), but at $\lambda = 550$ nm it increased sharply in the green region of the spectrum. The contribution of chlorophyll at $\lambda = 430$ nm ranged from 0.6 to 8.5% and at $\lambda = 550$ nm – from 0.1% to 1.8%.

In 2020, the largest contribution of YS at $\lambda = 430$ nm was recorded in the pelagic part of rivers Kamga and Chulyshman (94.1 and 93.5%, respectively). At a wavelength of 550 nm, YS contribution varied from 40.0% (the pelagial area of the Adamysh River) to 91.3% (the littoral of the Kyga River). Suspension made its maximum contribution (32.1%) at $\lambda = 430$ nm in site 019 (the pelagic zone of Cape Syraktu), which increased to 46.4% (site 014 – the pelagic part of Chulyush River) at $\lambda = 550$ nm. At $\lambda = 430$ nm, PW demonstrated minor contribution in all sites (less than 0.1%), but it abruptly increased in the green region of the spectrum (up to 14.1%). The contribution of chlorophyll at $\lambda = 430$ nm ranged from 0.5 to 6.0%, while at $\lambda = 550$ nm – from 0.1% to 1.4%.

In 2021, the largest contribution of YS at $\lambda = 430$ nm was detected in the pelagic and littoral parts of the Kamga River (85.8 and 75.0%, respectively). At a wavelength of 550 nm, the contribution of YS varied from 29.6% (the pelagic part of Kamenny Bay) to 67.0% (the pelagic part of the Kamga River). Suspension made the greatest contribution (21.4%) at $\lambda = 430$ nm in site 103 (the littoral of the Kyga River) and was growing up to 43.8% at $\lambda = 550$ nm in site 113 of the pelagic part of Kamenny Bay. The contribution of chlorophyll at $\lambda = 430$ nm ranged as 6.8–27.3% and at $\lambda = 550$ nm – from 1.4% to 7.8%. PW made an insignificant contribution to light attenuation at $\lambda = 430$ nm (less than 0.1%), but sharply increased up to 18.8% in the green region of the spectrum at $\lambda = 550$ nm.

In 2022, the largest contribution of YS at $\lambda = 430$ nm was noted in the pelagic part of rivers Kamga and Saimysh (90.0%). At a wavelength of 550 nm, this indicator varied from 33.3% (the pelagic part of the Kamga River) to 88.8% (the pelagic part of Yailyu village). Suspension showed its maximum contribution (40.3%) at $\lambda = 430$ nm in site 014 of the pelagic zone of the Chulyush River) and increased to 46.1% at $\lambda = 550$ nm in site 002 of the pelagic part of the Chulyshman River. A share of PW was negligible (less than 0.1%) at $\lambda = 430$ nm, but abruptly increased up to 28.2% at $\lambda = 550$ nm. The contribution of chlorophyll at $\lambda = 430$ nm ranged from 3.2 to 29.3% and at $\lambda = 550$ nm – from 0.8% to 10.5%. The least indicators (about 0.1%) of molecular light scattering by PW were observed in the study spectral range.

Thus, YS and S turned out to be the most significant optically active components affecting the total light attenuation in Lake Teletskoye waters.

The analyzed literature data confirm our pioneer calculations of spectral contributions of the main optically active components of Lake Teletskoye waters to the spectral index of light attenuation $c(\lambda)$ (2017–2022).

The trophic status of the lake is determined by limnoclimate, a type of a catchment area and its altitude. Prolonged periods of mixing of water masses and short periods of stratification, oxygenated water supply

by mountain streams, low water temperature throughout almost the whole year – all this contributes to oxygen saturation of the entire water column. Note that at the bottom saturation may be even higher than at the surface.

Our findings suggest that the trophic status of Lake Teletskoye can be characterized mainly as oligotrophic with the elements of mesotrophy in sites of the large rivers' confluence.

From general and specific indicators (i.e. trophosaprobity, mineralization and hardness of water, the hydrogen index and the presence of harmful substances (GOST, 1977), including quantitative characteristics of aquatic organisms (abundance, biomass and species number) it follows that waters of Lake Teletskoye belong to the class of “clean waters”, as well as “very clean” and “quite clean” according to the unified ecological classification of the surface waters of the land (Oksiyuk et al., 1993).

4. Conclusions

During Lake Teletskoye investigations (2017–2022), we collected new field data on spatiotemporal variability of light attenuation, light absorption by YS, SD-measured relative transparency, Chl and YS concentrations for various sampling sites. The modified semi-empirical model was applied to describe the spectral contribution of the main optically active components of natural waters to light attenuation with due regard for light absorption by terrigenous and biogenic particles. Summer studies of Lake Teletskoye demonstrated insignificant changes in the long-term dynamics of hydro-optical characteristics thus indicating good oligotrophic ecosystem conservation and high water quality of Lake Teletskoye under growing economic loads on the reservoir and its drainage basin. The obtained results suggest that hydro-optical characteristics can be widely used in studying large lakes, reservoirs and rivers to monitor the heterogeneity of water pollution level, qualitative assessment of the content of suspended and dissolved substances and, consequently, the ecological state of different-type waters.

Acknowledgement

We express our gratitude to E.Yu. Mitrofanova, a senior researcher of the Laboratory of Hydrobiology and K.V. Marusin, a researcher of the Laboratory of Hydrology and Geoinformatics for providing the data on relative transparency measurements and water sampling.

The work was carried out within the State Task of the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number of the project AAAA-A17-117041210241-4) with assistance of the Fleet Support Program.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Akulova O.B. 2015. Development of methods and a measuring computer system for assessing ecologically significant hydro-optical characteristics of freshwater reservoirs (by the example of lakes in Altai Krai). Theses of dissertation. Cand. Sc. (Technology) Barnaul, Russia. (in Russian)
- Betancur-Turizo S.P., González-Silvera A.G., Santamaría-Del-Ángel E. et al. 2018. 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* 1: 20-37.
- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 2: 361-369.
- Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A. et al. 2022. Spectral light absorption coefficient of particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics* 15 (3): 73-83.
- Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A. et al. 2018. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 58-61. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-58](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-58)
- Dera J. 1992. *Marine Physics*. Warszawa. Amsterdam: Elsevier.
- Environment Canada: national guidelines and standards office. 2004. Water policy and coordination directorate. Canadian guidance framework for the management of phosphorus in freshwater system. Ottawa: National guidelines and standards office water policy and coordination directorate environment Canada.
- Erlov N.G. 1980. *Sea optics*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
- GOST 17.1.1.04-77. 1977. Indicators of the state and rules of taxation of fishery water bodies. Moscow: Izd-vo standartov. (in Russian)
- GOST 17.1.4.02-90. 2003. Technique of spectrophotometric determination of chlorophyll a. Moscow: Izd-vo standartov. (in Russian)
- Kopelevich O.B., Shifrin K.S. 1981. Modern ideas of optical properties of sea water. *Ocean and atmospheric optics*. Moscow: Nauka. (in Russian)
- Kopelevich O.V. 1983. Low-parametrical model of optical properties of sea water. *Ocean optics*. 1. Physical optics of ocean. In: Monin A.S. (Ed.). Moscow: Nauka. (in Russian)
- Korchemkina E.N., Latushkin A.A. 2016. Determination of dissolved organic matter and suspended matter concentrations by spectral index of directional light attenuation. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zony morya* [Ecological safety of coastal and offshore zones] 3: 44-48. (in Russian)
- Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Shuchman R. et al. 2017. Bio-optical retrieval algorithm for the optically shallow waters of Lake Michigan. I. Model description and sensitivity/robustness assessment. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* 3: 79-92.
- Kukushkin A.S. 2011. Long-term measurements of transparency in deep water and shelf areas of the Black Sea. *Fizicheskie problemy ekologii* [Physical environmental problems] 18: 219-231. (in Russian)
- Levin I.M. 2014. Low-parametric optical models of primary optical properties of seawater. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics] 3: 3-22. (In Russian)
- Mankovsky V.I., Solovyev M.V., Mankovskaya E.V. 2009. Hydrooptical characteristics of the Black Sea. *Spravochnik*. Sevastopol: MGI NAN Ukrainy. (in Russian)
- Mankovsky V.I., Vladimirov V.L., Afonin E.I. et al. 1996. Long-term variability of water transparency in the Black Sea and factors that led to its strong decline in the late 80s and early 90s. Preprint. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute. (in Russian)
- Mankovsky V.I. 2011. Spectral contribution of the seawater components in the attenuation coefficient of directed light in the surface Mediterranean waters. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal] 5: 14-29. (in Russian)
- Mankovsky V.I. 2015. Yellow substance in surface waters of the eastern part of the Tropical Atlantic. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal] 3: 53-61. (in Russian)
- Matyushenko V.A., Lukin L.R., Khomenko G.D. et al. 2001. Indicator of light attenuation and its relationship with hydrological characteristics and content of suspended matter in the waters of the Barents Sea. Experience of systemic oceanological research in the Arctic. (Pod red. A.L. Lisitsyna, M.E. Vinogradova, E.A. Romankevicha) Moscow: Nauchny mir. (in Russian)
- Mobley C.D. 1994. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press.
- Nyquist G. 1979. 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, Sweden.
- Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N., Braginskiy L.P. et al. 1993. Integrated environmental classification of land surface water quality. *Gidrobiologicheskij zhurnal* [Hydrobiological Journal] 4: 62-76. (in Russian)
- Reinart A., Paavel B., Pierson D. et al. 2004. Inherent and apparent optical properties of Lake Peipsi, Estonia. *Boreal Environment Research* 9: 429-445.
- Selegety V.V., Dekhandskhyutter B., Klerks Ya. et al. 2001. Physical and geological environment of Lake Teletskoye. Monograph. Tervuren. Belgium: Royal Museum for Central Africa. (in Russian and English)
- Selegety V.V., Selegety T.S. 1978. *Lake Teletskoye*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Sherstyankin P.P. 1993. Optical structures and ocean-type fronts on Lake Baikal. Abstract of dissertation. Doc. Sc. (Phys.-Mat.) Moscow, Russia. (in Russian)
- Shifrin K.S. 1983. *Introduction to ocean optics*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Shi L., Mao Z., Wu J. et al. 2017. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu. *Water* 5: 352. DOI: [10.3390/w9050352](https://doi.org/10.3390/w9050352)
- Slade W.H., Boss E. 2015. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size. *Applied Optics* 24: 7264-7277.
- Sutorikhin I.A., Akulova O.B., Bukaty V.I. et al. 2017. Determination of the trophic status of freshwater lakes of the Altai Krai in the period 2013-2016 by hydrooptic characteristics. *Izvestiya Altajskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Izvestiya of Altai State University] 1 (93): 58-61. DOI: [10.14258/izvasu\(2017\)1-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)1-10) (in Russian)
- Voskresenskaya E.N., Kukushkin A.S., Mikhaylova N.V. 2011. Features of variability of distributions of transparency and content of suspended matter in the northwestern part of the Black Sea in the spring due to large-scale 248 processes in the ocean-atmosphere system. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology] 1: 64-77. (in Russian)
- Woźniak S.B., Stramski D. 2004. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms. *Applied Optics* 17: 3489-3503.

Многолетняя динамика спектральной прозрачности воды в поверхностном слое озера Телецкое в летний период

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYАкулова О.Б.*^{ORCID}, Букатый В.И.

Институт водных и экологических проблем, Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Молодёжная, д. 1, Барнаул, 656038, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты многолетних экспериментальных данных по спектральной прозрачности воды в поверхностном слое Телецкого озера (21 точка отбора проб), полученные летом в период 2017–2022 гг. Значения показателя ослабления света, рассчитаны при натуральном основании логарифма на четырёх длинах волн (430, 450, 550 и 670 нм) за исследуемый период находились в достаточно узком диапазоне от 0,2 до 4,0 м⁻¹, показателя поглощения света жёлтым веществом – от 0,1 до 3,2 м⁻¹. Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки, находились в пределах 0,8–11,7 м со средним значением 6,3 м. Содержание хлорофилла-а в поверхностном слое водоёма изменялось за 6-летний период в диапазоне 0,1–4,1 мг/м³, что соответствует олиготрофному типу озёр. Концентрация жёлтого вещества в озере, определяемая оптическим методом по измеренному показателю поглощения света жёлтым веществом на длине волны $\lambda = 450$ нм, варьировала в пределах 0,9–15,0 г/м³. В результате расчётов спектрального вклада основных оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света для поверхностного слоя Телецкого озера в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают жёлтое вещество и взвесь. Показано, что оптическая структура исследуемого водоёма – динамика основных первичных гидрооптических характеристик зависит от изменчивости концентраций различных оптически активных компонентов как во времени, так и в пространстве под влиянием внутриводоёмных процессов, протекающих в тесной связи с водосбором озера.

Ключевые слова: спектральная прозрачность воды, показатель ослабления света, показатель поглощения света жёлтым веществом, физическая модель, жёлтое вещество, хлорофилл-а, взвесь, чистая вода, Телецкое озеро

Для цитирования: Акулова О.Б., Букатый В.И. Многолетняя динамика спектральной прозрачности воды в поверхностном слое озера Телецкое в летний период // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - С. 1228-1242. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-5-1228

1. Введение

Долгое время прозрачность воды была лишь качественной характеристикой, наблюдения за которой проводились лишь визуально. Традиционно относительную прозрачность природных вод разного типа (океанов, морей, озёр, водохранилищ, рек и др.) определяют полуинструментальным методом – по предельной глубине видимости белого стандартного диска Секки в водной толще, до полного его исчезновения из виду (измеряется в метрах). Например, прозрачность воды озера Байкал является одной из самых высоких среди пресноводных водоёмов, так как содержит мало растворённых и взвешенных веществ и близка к прозрачности вод

океанов и морей. Так, в байкальской воде белый диск Секки виден до глубины 40 м (Шерстянkin, 1993), а максимальная прозрачность воды в Телецком озере – 15,5 м (Селегей и др., 2001). Этот метод, широко применяемый среди учёных-гидробиологов в силу своей простоты и практичности, всё-таки считается субъективным и обладает значительной погрешностью измерений (20% и более) и существенным ограничением его использования в зимних подлёдных условиях. А вот использование электронных спектрофотометрических методов и приборов (спектрофотометров, турбидиметров, прозрачномеров и др.), которые позволяют определить спектральную прозрачность воды на любой глубине как днём, так и ночью, а результаты запи-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: akulova8282@mail.ru (О.Б. Акулова)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 17 сентября 2024;

Опубликована online: 31 октября 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



сать на самопишущих приборах, являются практически универсальными, а главное – более точными.

Как известно (Ерлов, 1980; Копелевич и Шифрин, 1981; Шифрин, 1983; Копелевич, 1983; Маньковский и др., 2009; Dera, 1992; Mobley, 1994; Маньковский, 2011; Левин, 2014), спектральная прозрачность воды (измеряется в обратных метрах), относится к первичным (или внутренним, собственным) гидрооптическим характеристикам, которая представляет собой физическую величину, характеризующая оптические свойства природных вод. Спектральная прозрачность воды определяет условия распространения света в воде, а также содержит информацию о взвешенных органо-минеральных частицах и растворённом в воде органическом веществе.

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

Целью работы являются экспериментальные исследования по оценке многолетней изменчивости спектральной прозрачности воды в поверхностном слое (толщиной 5–7 см) Телецкого озера в летний период 2017–2022 гг. и влиянию основных оптически активных компонентов озёрной воды на суммарное ослабление света.

2. Материалы и методы

Объект исследования

Телецкое озеро (координаты: между 51°21'46" и 51°48'36" с.ш., между 87°14'40" и 87°50'54" в.д.) – глубоководный водоём тектонического происхождения, расположенный на высоте 434 м над уровнем моря в северо-восточной части Горного Алтая (юг Западной Сибири). Основные характеристики водоёма следующие: площадь зеркала – 227,3 км², площадь водосборного бассейна – 20400 км², длина – 77,8 км, средняя ширина – 2,9 км, максимальная глубина – 323,0 м, объём – 41,1 км³ (Селегей и Селегей, 1978). Озеро состоит из двух частей – южной, вытянутой по меридиану, длиной более 50 км, и северной, имеющей широтное направление, длиной 28 км. По сравнению с глубоководной (пелагиальной) зоной мелководная (литоральная) зона озера имеет ряд особенностей, одно из которых – значительное гидродинамическое воздействие, связанное с интенсивными ветро-волновыми процессами (максимальная высота волны до 2,5 м) и со значительными (до 6 м) ежегодными колебаниями уровня воды. Изрезанность береговой линии озера выражена слабо, бухт и заливов мало, самые

большие – Камгинский и Кыгинский с площадью 6,5 км² и 3,1 км², соответственно. Камгинский залив самый мелководный, защищенный от волнений и наиболее благоприятный по термическому режиму и характеру грунтов из всех заливов Телецкого озера. По гидрохимическому режиму озеро – слабоминерализованный, богатый кислородом горный водоём с низкими температурами, с незначительным содержанием органических и биогенных веществ в воде (Селегей и др., 2001). За последние годы в связи с активным развитием туризма в Горном Алтае, возросла антропогенная нагрузка на озеро, особенно в его северной части. Экосистемы холодноводных олиготрофных озёр наиболее уязвимы к внешнему воздействию. Невысокий уровень развития гидробионтов в подобных водоёмах определяет низкий потенциал биологического самоочищения для поступающих с водосбора взвешенных, растворённых и слаборастворимых в воде веществ, которые могут существенно изменить качество воды и интенсивность внутриводоёмных процессов.

Методы исследования

Исследования основных гидрооптических характеристик (показателя ослабления света водой, показателя поглощения света жёлтым веществом и относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки) по акватории Телецкого озера выполнили летом в период 2017–2022 гг., организованный Институтом водных и экологических проблем СО РАН. Даты экспедиций следующие: 7–11 июля 2017 г., 19–23 июня 2018 г., 1–5 июля 2019 г., 24–29 июня 2020 г., 29 июля – 1 августа 2021 г., 1–5 августа 2022 г.

Ежегодно с поверхностного слоя Телецкого озера батометром с борта научно-исследовательского судна отбирали по 21 пробе (Рис. 1), всего за период исследования отобрали 126 водных проб. В лаборатории провели 1008 отдельных измерений спектральной прозрачности (коэффициента пропускания) воды на четырёх длинах волн (430, 450, 550 и 670 нм) на стационарном спектрофотометре ПЭ-5400УФ до и после фильтрации проб за 6-летний период исследования озера.

Спектральный показатель ослабления света $c(\lambda)$ рассчитали по формуле, вытекающей из закона Бугера

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

где L – длина измерительной кюветы (использовали стеклянные кюветы с рабочей длиной 50 мм), $T(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda)$ – спектральная прозрачность воды в относительных единицах, $I(\lambda)$, $I_0(\lambda)$ – интенсивности прошедшего и падающего на кювету света, соответственно, λ – длина волны света. Показатель поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$ определили после измерения спектральной прозрачности воды, очищенной от взвеси фильтрованием с использованием мембран «Владипор» типа МФАС-ОС-1 с диаметром пор 0,22 мкм. Максимальная абсолютная погрешность измерений $c(\lambda)$ и $a_{ys}(\lambda)$ для изучаемого спектрального диапазона составила 0,1 м⁻¹.

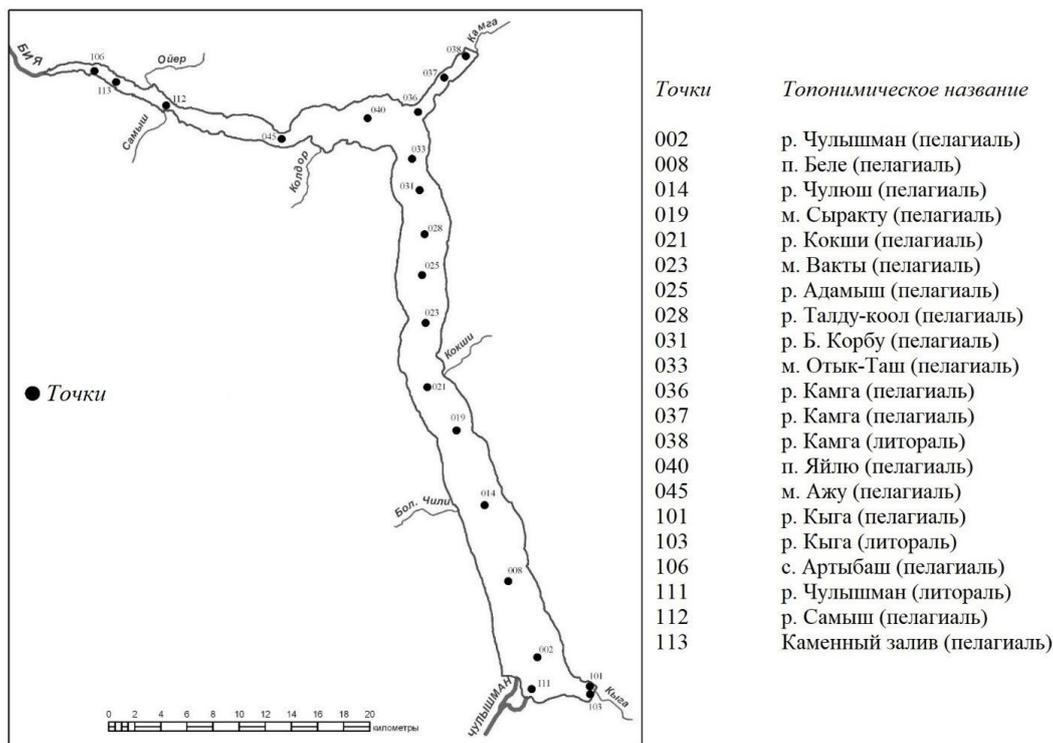


Рис.1. Картограмма точек отбора проб по акватории Телецкого озера

Спектральная зависимость показателя поглощения света жёлтым веществом аппроксимируется экспоненциальным законом

$$a_{ys}(\lambda) \sim e^{-\mu \cdot \lambda}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент спектральной изменчивости, характеризующий качественный состав растворённого органического вещества (РОВ). Следуя работе (Маньковский, 2015), измерив $a_{ys}(450)$ (при $\lambda = 450$ нм) определили концентрацию жёлтого вещества в пробах воды по формуле

$$C_{ys} = a_{ys}(450) / a_{sp,ys}(450). \quad (3)$$

Здесь C_{ys} – концентрация жёлтого вещества, в г/м³, $a_{sp,ys}(450)$ – удельный показатель поглощения света жёлтым веществом, в м²/г. С учётом предложенного в (Маньковский, 2015) подхода рассчитаны значения C_{ys} с использованием величины $a_{sp,ys}(450)$, взятой из работы (Nyquist, 1979).

С тем, чтобы иметь возможность сравнить полученные нами данные по спектральной прозрачности воды с результатами подобных оптических исследований, выполненных ранее другими авторами для водных экосистем, провели также измерения относительной прозрачности SD с помощью белого диска Секки.

Дополнительно определили концентрации хлорофилла C_{chl} стандартным спектрофотометрическим методом согласно (ГОСТ, 2003).

Относительный спектральный вклад основных оптически активных компонентов озёрной воды (взвеси, жёлтого вещества, хлорофилла-а и чистой воды) в $c(\lambda)$ в поверхностном слое исследуемого водоёма рассчитали с использованием модифицированной полуэмпирической модели ослабления света (Акулова, 2015), которая впервые предложена О.В. Копелевичем (Копелевич, 1983) и имеет вид

$$c(\lambda) = a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + b_s(\lambda) + a_{pw}, \quad (4)$$

где $a_{chl}(\lambda)$ и $a_{ys}(\lambda)$ – спектральные показатели поглощения хлорофиллом-а и жёлтым веществом, соответственно, $b_{mol}(\lambda)$ – спектральный показатель молекулярного рассеяния чистой водой, $b_s(\lambda)$ – спектральный показатель рассеяния взвесью, $a_{pw}(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения чистой водой. Как видно из данного выражения спектральное ослабление света описано с помощью трёхпараметрической модели. Так как в эксперименте определили параметр $a_{ys}(\lambda)$, то спектральный показатель рассеяния взвесью $b_s(\lambda)$ можно найти по формуле

$$b_s(\lambda) = c(\lambda) - [a_{chl}(\lambda) + a_{ys}(\lambda) + b_{mol}(\lambda) + a_{pw}(\lambda)]. \quad (5)$$

Трофический статус оценили с применением трофического индекса Карлсона TSI (*Trophic State Index*) (Carlson, 1977) и международной трофической классификации водоёмов (Environment Canada, 2004). Также использовали значения спектрального показателя ослабления света $c(\lambda)$, где олиготрофному типу водоёмов будет соответствовать диапазон значений $c(\lambda)$ от 0 до 2 м⁻¹, мезотрофному – от 2 до 3 м⁻¹, эвтрофному – от 3 до 23 м⁻¹, гиперэвтрофному – от 23 м⁻¹ и более (Суторихин и др., 2017).

3. Результаты и обсуждение

В результате проведённых летних экспедиций 2017–2022 гг. по акватории Телецкого озера были получены значения первичных гидрооптических характеристик – показателей ослабления света $c(\lambda)$, показателей поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$, относительной прозрачности по белому диску Секки SD , пространственное распределение которых было неоднородным. Величины $c(\lambda)$ на четырёх длинах волн ($\lambda = 430, 450, 550$ и 670 нм)

в пробах воды, отобранных в поверхностном слое водоёма, находились в диапазоне от 0,2 до 4,0 м⁻¹. В 2017 г. и 2021 г. летние значения $c(\lambda)$ изменялись незначительно (1,0–1,6 м⁻¹). Пониженная спектральная прозрачность зафиксирована в 2022 г. (0,2 м⁻¹). Значения свыше 3,0 м⁻¹ наблюдались в точках впадения рек Чулышман, Чулюш и Кыга, а также мыса Сыракуту, максимальные величины зарегистрированы в литоральной зоне реки Кыга в 2018–2020 гг. Это связано с интенсивным выносом взвешенного вещества (преимущественно минерального) речными водами и процессами разрушения береговой линии озера. Здесь на мелководье ветро-волновые течения поднимают донные осадки и перемешивают их по всей водной толще. В пелагиальной зоне, начиная с мыса Вакты (точка 023) до мыса Ажу (точка 045), а также в Каменном заливе (точка 113) значения $c(\lambda)$ не превышают 2,1 м⁻¹. Это хорошо согласуется с содержанием жёлтого вещества, которое было близким к его среднему содержанию в летний период.

За 6-летний период оптических исследований на озере амплитуда колебаний значений показателей поглощения света жёлтым веществом $a_{ys}(\lambda)$ на длинах волн $\lambda = 430, 450, 550$ и 670 нм в поверхностном слое изменялась также в небольших пределах от 0,1 до 3,2 м⁻¹, максимальные величины (более 2,0 м⁻¹) зафиксированы в период 2018–2020 г. в точках рек Чулышман, Чулюш и Кыга, а также мыса Сыракуту. В качестве примера, на Рис. 2 и 3 представлена динамика $c(430)$ и $a_{ys}(450)$, соответственно.

Величины относительной прозрачности, измеренной с помощью белого диска Секки SD за исследуемый период, находились в широком диапазоне 0,8–11,7 м со средним значением 6,3 м. Прозрачность 11,0 м наблюдалась в 2019 г. в пелагиале рек Адамыш и Талду-коол (в точках 025 и 028, соответственно). Максимальная величина SD (11,7 м) зарегистрирована в посёлке Яйлю в 2018 г.

Известно (Маньковский и др., 1996; Кукушкин, 2011; Воскресенская и др., 2011; Корчемкина и Латушкин, 2016; Churilova et al., 2018; 2022; Матюшенко и др., 2001; Betancur-Turizo et al., 2018; Shi et al., 2017; Slade and Boss, 2015; Korosov et al., 2017; Woźniak and Stramski, 2004; Reinart et al., 2004), что спектральная прозрачность воды существенно зависит от содержания в ней взвешенного вещества (органического, минерального), то для объяснения межгодовых изменений характерных значений $c(\lambda)$ необходимо использовать сведения о концентрации хлорофилла-а (C_{chl-a}).

Содержание основного фотосинтетического пигмента водорослей фитопланктона – хлорофилла-а изменялось за 6-летний период в пределах 0,1–4,1 мг/м³ со средним из полученных значений – 2,1 мг/м³ (Рис. 4), что соответствует олиготрофному типу озёр. Максимальные величины C_{chl-a} зарегистрированы в 2021 г. на всех точках озера (1,1–4,1 мг/м³), минимальные – в 2019 г. (0,1–1,8 мг/м³). В целом развитие водорослей фитопланктона озера невысокое, на что влияют низкие концентрации биогенных элементов, а также нестабильность водного столба на протяжении большей части года. Сотрудниками химико-аналитического центра ИВЭП СО РАН под руководством Т.С. Папиной установлено, что содержание биогенных элементов группы азота в водах Телецкого озера невысоко и доминирующей формой минерального азота являются нитрат-ионы, содержание которых изменяется в пределах 0,7–1,9 мг/дм³, типичными для олиготрофных озёр. Содержание фосфат-ионов в озере незначительно и находится на уровне микрограммов, кремния – на один-два порядка превосходит содержание остальных биогенных элементов и составляет в среднем 2,2–2,9 мг/дм³.

Результаты по концентрации жёлтого вещества C_{ys} в поверхностном слое озера за 6-летний период (2017–2022 гг.) варьировали в широком диа-

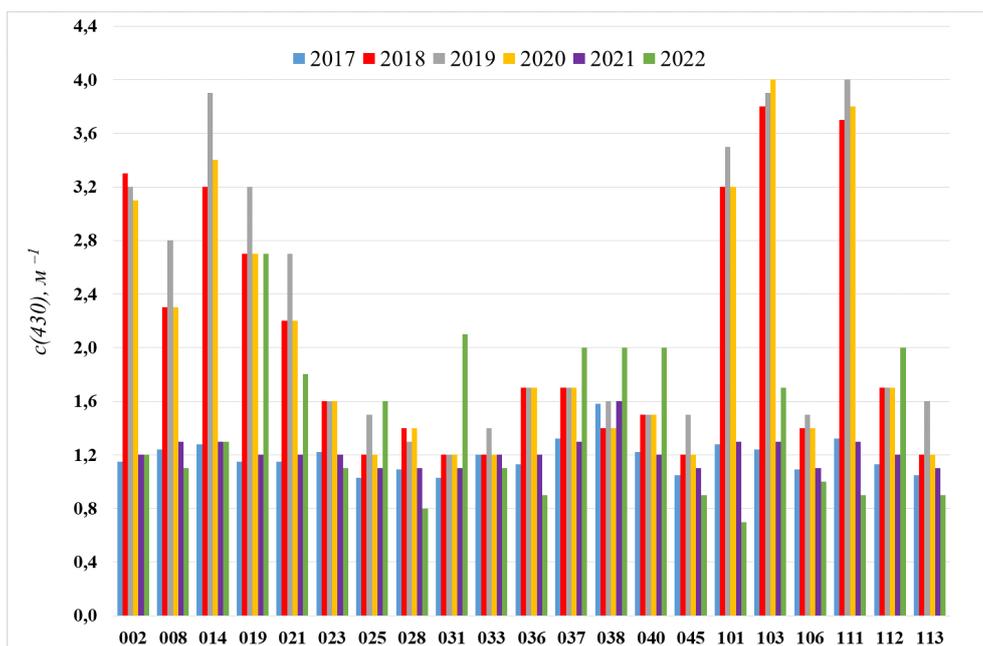


Рис.2. Многолетняя динамика показателя ослабления света на длине волн $\lambda = 430$ нм в различных точках Телецкого озера

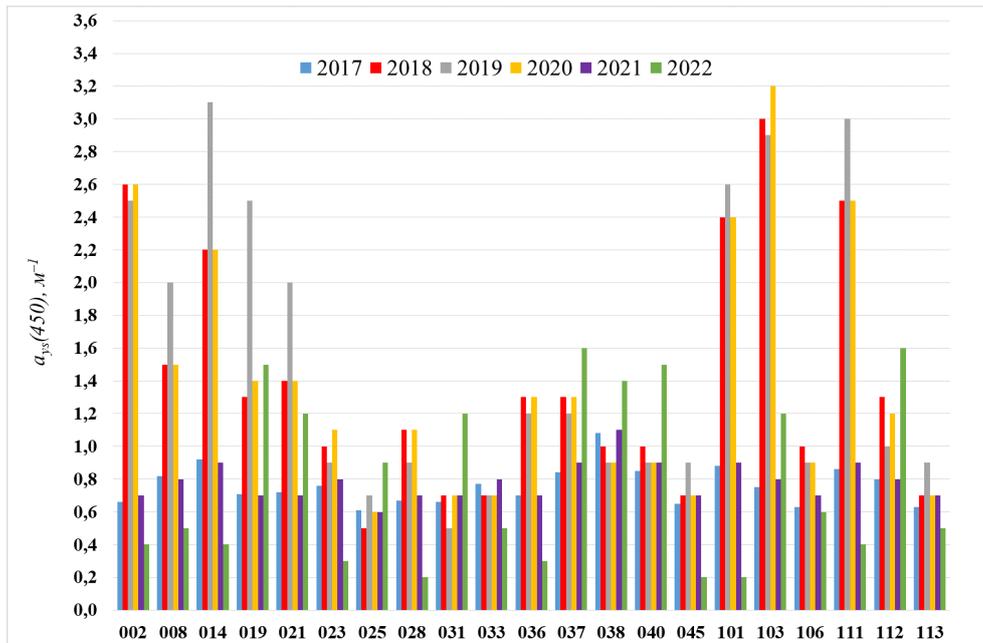


Рис.3. Многолетняя динамика показателя поглощения света жёлтым веществом на длине волны $\lambda = 450$ нм в различных точках Телецкого озера

пазоне $0,9\text{--}15,0$ г/м³ со средним значением $8,0$ г/м³ (Рис. 5). За последние два года исследований значения C_{chl-a} снизились ($0,9\text{--}7,1$ г/м³) до величин 2017 г. ($2,9\text{--}5,1$ г/м³).

В результате расчётов спектрального вклада оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света $s(\lambda)$ для поверхностного слоя озера Телецкое в различных точках отбора проб получено, что наибольшее оптическое влияние на суммарное ослабление оказывают жёлтое вещество и взвесь.

В **2017 г.** максимальный вклад в показатель ослабления света вносит жёлтое вещество (ЖВ). Наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на литораль р. Камга (точка 038), где он составил 89,2%. На длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьировал в пределах от 60,0% (точка 111 – литораль р. Чулышман) до 83,3% (точка 038).

Взвесь (ВВ) даёт максимальный вклад в показатель ослабления при $\lambda = 430$ нм в точке 103 (литораль р. Кыга) и составляет 17,1%. Вклад взвеси возрастает до 28,1% (точка 111) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода (ЧВ) вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм на всех точках и составляет не более 0,4%, но резко увеличивается в длинноволновой области: до 18,8% при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла (ХЛ) при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,6% (точка 037 – пелагиаль р. Камга) до 11,3% (точка 036 – пелагиаль р. Камга), при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% (точка 037) до 2,6% (точка 002 – пелагиаль р. Чулышман).

В **2018 г.** наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ 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 жёлтого вещества варьирует в пределах от

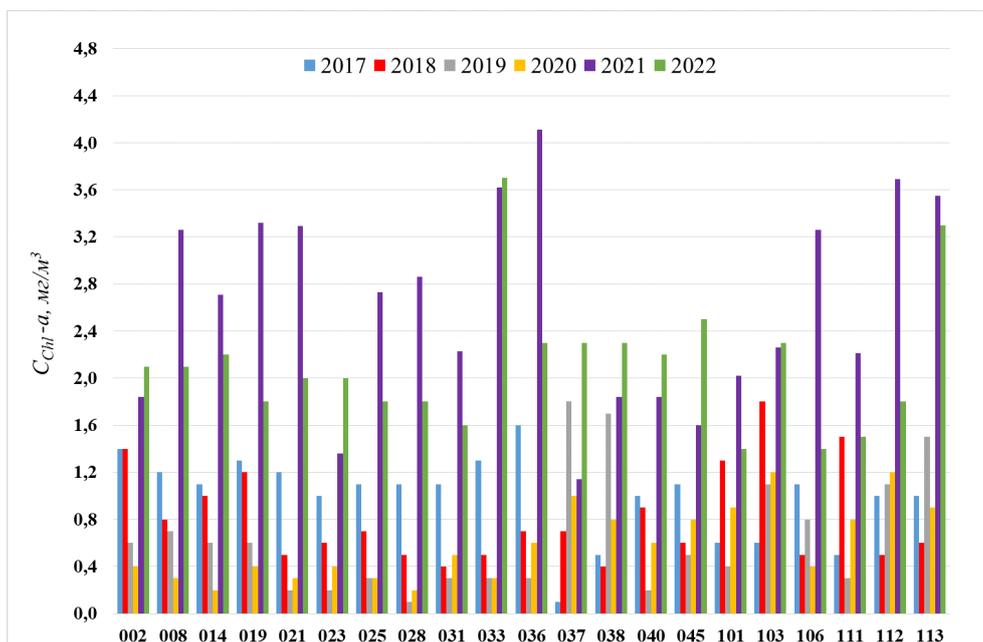


Рис.4. Многолетняя динамика концентраций хлорофилла-а в различных точках Телецкого озера

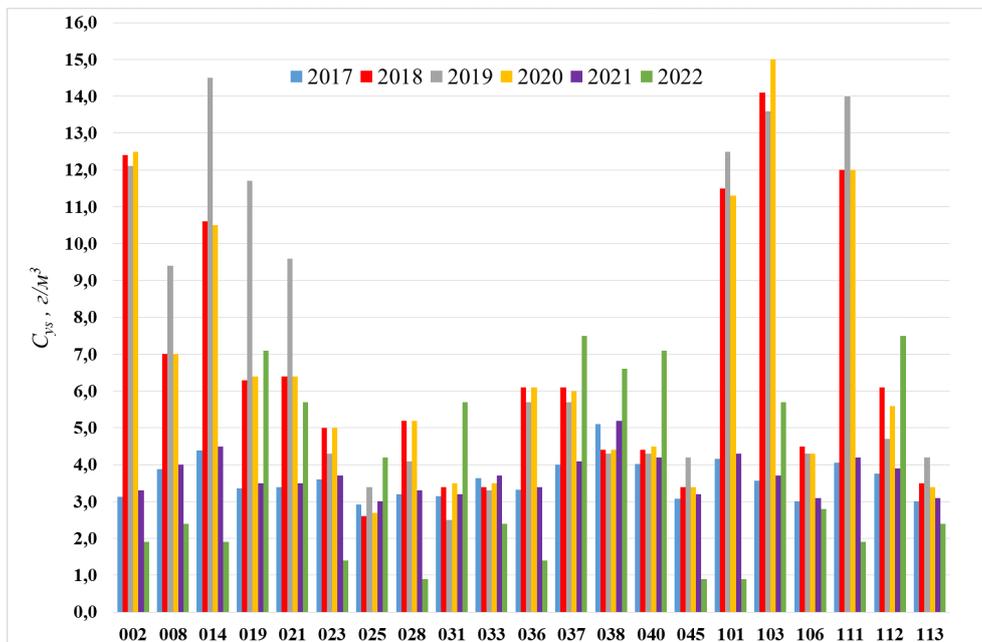


Рис.5. Многолетняя динамика концентрации жёлтого вещества в различных точках Телецкого озера

40,0% (точка 025 – пелагиаль р. Адамыш) до 91,3% (точка 103 – литораль р. Кыга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 119 (пелагиаль м. Сыраку) и составляет 33,4%. Вклад взвеси возрастает до 47,8% (точка 025, пелагиаль р. Адамыш) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,4%, но этот вклад резко увеличивается в длинноволновой области – до 14,1% при $\lambda = 550$ нм. Вклад ХЛ при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 1,8% (точка 021 – пелагиаль р. Кокши) до 4,8% (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю), при $\lambda = 550$ нм – от 0,3% (точка 021) до 1,2% (точка 040 – пелагиаль п. Яйлю).

В 2019 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиаль рек Чулюш, Кыга и Кокши, где он составляет 87,1, 85,7 и 85,1%, соответственно. На длине волны 550 нм вклад жёлтого вещества варьирует в пределах от 50,0% (пелагиаль р. Б. Корбу и район Каменного залива, соответственно) до 95,4% (пелагиаль р. Чулюш). Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda = 430$ нм в точке 025 (пелагиаль р. Адамыш) и составляет 31,5%. Вклад ВВ возрастает до 41,9% (точка 113 – пелагиаль Каменного залива) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,4%, но резко увеличивается в зелёной области спектра – до 14,1% при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,6 до 8,5%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% до 1,8%.

В 2020 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную часть рек Камга и Чулышман, где он составляет 94,1 и 93,5%, соответственно. На длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 40,0% (пелагиальная часть р. Адамыш) до 91,3% (литоральная часть р. Кыга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 019 (пелагиальная часть

м. Сыраку) и составляет 32,1%. Вклад ВВ возрастает до 46,4% (точка 014 – пелагиальная часть р. Чулюш) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм на всех точках и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в зелёной области спектра – до 14,1%. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 0,5 до 6,0%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,1% до 1,4%.

В 2021 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную и литоральную части реки Камга, где он составляет 85,8 и 75,0%, соответственно. При длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 29,6% (пелагиальная часть Каменного залива) до 67,0% (пелагиальная часть р. Камга). Взвесь даёт максимальный вклад в $c(\lambda)$ при $\lambda = 430$ нм в точке 103 (литоральная часть р. Кыга) и составляет 21,4%. Вклад ВВ возрастает до 43,8% (точка 113 – пелагиальная часть Каменного залива) при $\lambda = 550$ нм. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм находился в диапазоне от 6,8 до 27,3%, при $\lambda = 550$ нм – от 1,4% до 7,8%. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается в зелёной области спектра (при $\lambda = 550$ нм) – до 18,8%.

2022 г. наибольший вклад ЖВ при $\lambda = 430$ нм приходится на пелагиальную часть рек Камга и Саймыш, где он составляет 90,0%. При длине волны 550 нм вклад ЖВ варьирует в пределах от 33,3% (пелагиальная часть р. Камга) до 88,8% (пелагиальная часть п. Яйлю). Взвесь даёт максимальный вклад в показатель ослабления света при $\lambda = 430$ нм в точке 014 (пелагиальная часть р. Чулюш) и составляет 40,3%. Вклад ВВ возрастает до 46,1% (точка 002 – пелагиальная часть р. Чулышман) при $\lambda = 550$ нм. Чистая вода вносит несущественный вклад в ослабление света при $\lambda = 430$ нм и составляет не более 0,1%, но резко увеличивается при $\lambda = 550$ нм – до 28,2%. Вклад хлорофилла при $\lambda = 430$ нм нахо-

дился в диапазоне от 3,2 до 29,3%, при $\lambda = 550$ нм – от 0,8% до 10,5%. Молекулярное рассеяние света чистой водой в исследуемом спектральном интервале не вносит ощутимый вклад и составляет около 0,1%.

Таким образом, для вод Телецкого озера жёлтое вещество и взвесь оказались наиболее значимыми оптически активными компонентами, влияющие на суммарный показатель ослабления света.

Нужно отметить, что расчёты по спектральным вкладам основных оптически активных компонентов озёрной воды в спектральный показатель ослабления света $s(\lambda)$ для Телецкого озера за исследуемый период (2017–2022 гг.) были выполнены впервые, это подтверждает и анализ литературных данных.

Трофический статус Телецкого озера определяется лимноклиматом, характером водосборного бассейна и положением его над уровнем моря. Продолжительные периоды перемешивания водных масс и короткие периоды стратификации, поступление с горными речными притоками насыщенной кислородом воды, низкая температура воды на протяжении практически всего года, всё это способствует насыщению кислородом всей водной толщи, при этом у дна оно бывает даже выше, чем у поверхности.

В результате исследований трофический статус Телецкого озера можно охарактеризовать, в основном, как олиготрофный с элементами мезотрофии на участках впадения крупных рек.

По совокупности общих и специфических показателей, а именно, трофосапробности, минерализации и жёсткости воды, водородного показателя и наличию вредных веществ (ГОСТ, 1977), по количественным характеристикам гидробионтов (численности, биомассе и числу видов) вода Телецкого озера относится к классу «чистые воды», а по унифицированной экологической классификации поверхностных вод суши (Оксиук и др., 1993) – ещё и к разряду «очень чистые» и «вполне чистые».

4. Заключение

Таким образом, за период исследования 2017–2022 гг. Телецкого озера были собраны новые натурные данные по пространственно-временной изменчивости спектрального показателя ослабления света, спектрального показателя поглощения света жёлтым веществом, относительной прозрачности по белому диску Секки, концентраций хлорофиллов и жёлтого вещества для различных точек отбора проб. Применена модифицированная полуэмпирическая модель для описания спектрального вклада основных оптически активных компонентов природной воды в спектральный показатель ослабления света, учитывающая поглощение света терригенными и биогенными частицами. Исследования Телецкого озера летом показали отсутствие значительных изменений в многолетней динамике гидрооптических характеристик, что свидетельствует о сохранении олиготрофности экосистемы и высо-

кого качества воды Телецкого озера в условиях увеличения хозяйственной деятельности на водоёме и его водосборном бассейне. Данные результаты подтверждают возможность использования гидрооптических характеристик при исследовании крупных озёр, водохранилищ и рек для наблюдения за неоднородностью уровня загрязнения воды, качественной оценки содержания взвешенных и растворённых веществ и, следовательно, для контроля экологического состояния вод различного типа.

Благодарности

Благодарим старшего научного сотрудника лаборатории гидробиологии Е.Ю. Митрофанову и научного сотрудника гидрологии и геоинформатики К.В. Марусина за предоставленные данные измерений относительной прозрачности и отбор проб воды на озере в период исследования.

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Betancur-Turizo S.P., González-Silvera A.G., Santamaría-Del-Ángel E. et al. 2018. 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* 1: 20-37.
- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 2: 361-369.
- Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A. et al. 2022. Spectral light absorption coefficient of particles and colored dissolved organic matter in the Sea of Azov. *Fundamental and Applied Hydrophysics* 15 (3): 73-83.
- Churilova T.Ya., Moiseeva N.A., Latushkin A.A. et al. 2018. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 58-61. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-58](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-58)
- Dera J. 1992. *Marine Physics*. Warszawa. Amsterdam: Elsevier.
- Environment Canada: national guidelines and standards office. 2004. Water policy and coordination directorate. Canadian guidance framework for the management of phosphorus in freshwater system. Ottawa: National guidelines and standards office water policy and coordination directorate environment Canada.
- Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Shuchman R. et al. 2017. Bio-optical retrieval algorithm for the optically shallow waters of Lake Michigan. I. Model description and sensitivity/robustness assessment. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* 3: 79-92.
- Mobley C.D. 1994. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press.
- Nyquist G. 1979. 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, Sweden.

Reinart A., Paavel B., Pierson D. et al. 2004. Inherent and apparent optical properties of Lake Peipsi, Estonia. *Boreal Environment Research* 9: 429-445.

Shi L., Mao Z., Wu J. et al. 2017. Variations in spectral absorption properties of phytoplankton, non-algal particles and chromophoric dissolved organic matter in Lake Qiandaohu. *Water* 5: 352. DOI: [10.3390/w9050352](https://doi.org/10.3390/w9050352)

Slade W.H., Boss E. 2015. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size. *Applied Optics* 24: 7264-7277.

Woźniak S.B., Stramski D. 2004. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms. *Applied Optics* 17: 3489-3503.

Акулова О.Б. 2015. Разработка методов и измерительно-вычислительного комплекса для оценки экологически значимых гидрооптических характеристик пресноводных водоёмов (на примере озёр Алтайского края). Диссертация канд. техн. наук. Барнаул, Россия.

Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Михайлова Н.В. 2011. Особенности изменчивости распределений прозрачности и содержания взвешенного вещества в северо-западной части Чёрного моря в весенний период в связи с крупномасштабными 248 процессами в системе океан – атмосфера. *Метеорология и гидрология* 1: 64-77.

ГОСТ 17.1.1.04-77. 1977. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. Москва: Изд-во стандартов.

ГОСТ 17.1.4.02–90. 2003. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. Москва: Изд-во стандартов.

Ерлов Н.Г. 1980. Оптика моря. Ленинград: Гидрометеиздат.

Копелевич О.В., Шифрин К.С. 1981. Современные представления об оптических свойствах морской воды. Оптика океана и атмосферы. Москва: Наука.

Копелевич О.В. 1983. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. Оптика океана. 1. Физическая оптика океана. (Под ред. А.С. Монины). Москва: Наука.

Корчемкина Е.Н., Латушкин А.А. 2016. Определение концентраций растворённого органического вещества и взвеси по спектральному показателю ослабления направленного света. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 3: 44-48.

Кукушкин А.С. 2011. Многолетние измерения прозрачности в глубоководных и шельфовых районах Чёрного моря. Физические проблемы экологии 18: 219-231.

Левин И.М. 2014. Малопараметрические модели первичных оптических характеристик морской воды. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика* 3: 3-22.

Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И. и др. 1996. Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х и начале 90-х годов. Препринт. Севастополь: Морской гидрофизический институт.

Маньковский В.И., Соловьев М.В., Маньковская Е.В. 2009. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь: МГИ НАН Украины.

Маньковский В.И. 2011. Спектральный вклад компонентов морской воды в показатель ослабления направленного света в поверхностных водах Средиземного моря. *Морской гидрофизический журнал* 5: 14-29.

Маньковский В.И. 2015. Жёлтое вещество в поверхностных водах восточной части Тропической Атлантики. *Морской гидрофизический журнал* 3: 53-61.

Матюшенко В.А., Лукин Л.Р., Хоменко Г.Д. и др. 2001. 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). Москва: Научный мир.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. 1993. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. *Гидробиологический журнал* 4: 62-76.

Селегей В.В., Дехандсхюттер Б., Клеркс Я. и др. 2001. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. Монография. Тервюрден. Бельгия: Королевский Музей Центральной Африки.

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

Суторихин И.А., Акулова О.Б., Букатый В.И. и др. 2017. Определение трофического статуса пресноводных озёр Алтайского края в период 2013-2016 гг. по гидрооптическим характеристикам. *Известия Алтайского Государственного Университета* 1 (93): 58-61. DOI: [10.14258/izvasu\(2017\)1-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)1-10)

Шерстянкин П.П. 1993. Оптические структуры и фронты океанического типа на Байкале. Афтореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук. Москва, Россия.

Шифрин К.С. 1983. Введение в оптику океана. Ленинград: Гидрометеиздат.