

Vertical distribution of annual water temperature maxima in the southern coastal zone of Lake Baikal

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYNaumenko M.A.¹, Guzivaty V.V.¹, Lovtsov S.², Troitskaya E.S.³, Budnev N.²¹Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Sevastyanova Str., 9, St. Petersburg, 196105, Russia²Research Institute of Applied Physics of Irkutsk State University, Gagarin Blvd, 20, Irkutsk, 664033, Russia³Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. It is frequently observed that an extreme event, such as a temperature maximum, has a greater impact on a lake ecosystem than changes in average conditions. For the first time, we examine the vertical variability of annual water temperature maxima (AWTM) and dates of their occurrence based on *in-situ* measurements of water temperature with discreteness of 15 minutes for a stable stratification period over eleven years (since 2005 to 2016 except 2009) in the southern coastal zone of Lake Baikal with a bottom depth of 545 m. The estimated statistical characteristics clearly distinguish various features of the vertical distribution of AWTM. There are significant time shifts (about 86 days) between the uppermost horizon (about 15 m) and the lowest 300 m horizon. The average maximum annual temperatures (15 °C) decrease from the upper horizon to a temperature of 4 °C at 300 m depth. To quantify changes in the annual maximum water temperature, the empirical functions were constructed to estimate relationships between AWTM, dates of their occurrence and depth. These dependencies are not linear and verified by independent data. They have fairly high coefficients of determination.

Keywords: annual water temperature maxima, vertical distribution, Lake Baikal

For citation: Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Lovtsov S., Troitskaya E.S., Budnev N. Vertical distribution of annual water temperature maxima in the southern coastal zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - P. 157-170. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-157

1. Introduction

The current knowledge of thermal structure and interannual variability in large lake require much more simulations and observations than available today (Beletsky et al., 2006). Especially, it concerns a large dimictic lake, Lake Baikal, with the biggest depth and largest freshwater volume among the world's lakes (Minoura, 2000; Sherstyankin et al., 2006). According to many publications, it is known that the lakes in the world are exposed to climate change (Adrian et al., 2009; O'Reilly et al., 2015). In fact, during the last 30-year period, the water surface temperature of world lakes increased, ice-covered period decreased, date and duration of stratification period changed. The Lake Baikal ecosystem is undergoing rapid change on a local and global scale (Hampton et al., 2008; Izmet`eva et al., 2016). The vertical and horizontal exchange of heat and momentum determines the distribution of water temperature from surface to bottom. Quantification of hydrophysical processes is necessary to understand

the changes in many aquatic processes. For these reasons, as well as for monitoring climatological temperature conditions in lakes, knowledge of the spatial and temporal distribution of lake water temperature can be extremely valuable (Carpenter et al., 2011).

The thermal regime of a large dimictic lake is determined by the seasonal course of heat input to the water surface, the interaction of the moving air layer with water, and the propagation of heat into the depths of the lake. Dimictism of the lake stratum is manifested in the fact that the lake is stirred twice a year from the surface to the bottom due to the anomaly of fresh water density at a temperature of 3.98°C on the surface. Usually, between two basic mixing events, the lake is stable and stratified for a few months. The classic three-layer vertical temperature distribution is formed: 1) the surface mixed layer (epilimnion), 2) the middle layer with big vertical temperature gradients (metalimnion) and 3) the bottom layer, which is colder, and denser than every upper layer (hypolimnion) (Boehrer and Schultze, 2008).

*Corresponding author.

E-mail address: m.a.naumenko@mail.ru (M.A. Naumenko)

Received: May 14, 2024; **Accepted:** June 05, 2024;

Available online: June 19, 2024

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



Usually, the annual maximum temperature on the water surface layer T_{\max} occurs in the middle of summer. In Lake Baikal, due to its huge size, the annual water temperature maxima (AWTM) near the shore is observed in late July-August and in the open parts of the lake in August-September. The largest vertical temperature and density gradients arise during the heating period in metalimnion, 20–30 days before the surface water temperature reaches its maximum (Naumenko and Guzivaty, 2022). Then the cooling begins, initiating convective mixing, which accelerates the deepening of the epilimnion, and the gradients decrease. Heat is transferred to the underlying horizons, resulting in a shift of temperature maxima to greater depths and a decrease in their values. On every date, the penetration of heat to underlying horizons can be traced as the deepening of annual water temperature maxima from surface layer to bottom on a certain vertical (James, 1971; Stepanenko et al., 2018). In autumn, when the heat reaches the bottom, the overturn (that is, a vertical isothermia) arises, and the temperature at the bottom becomes the highest for the year in the large dimictic lake.

Seasonal variations in thermal stratification can influence phytoplankton and zooplankton population dynamics (Eckert and Walz, 1998; Brandão et al., 2012). The vertical extent of the epilimnion (i.e., the mixed layer depth) and the magnitude of the thermal gradient in the water column affect plankton growth and primary production (Vincent et al., 1984; O'Brien et al., 2003; Brighenti et al., 2015) and thereby regulate light penetration and internal nutrient loading. Thus, the absolute annual maximum temperature T_{\max} and time of occurrence of annual peak at $t_{T_{\max}}$ at certain depth $Z_{T_{\max}}$ are to influence the position of the chlorophyll concentration maximum during the seasonal course of the lake ecosystem parameters. Therefore, the deepening of the temperature maximum in stratified lakes can be considered not only as an important hydrophysical process but also as a parameter influencing the structure of the ecosystem. Moreover, the climatic maxima change may affect fish populations and communities (Gillis et al., 2021).

Obviously, knowledge of the magnitude and date of onset of temperature maxima at different horizons is necessary to understand changes in many water processes in different types of lakes. There are publications about the importance of these extreme events (Sharma et al., 2008; Minns et al., 2018; Ptak et al., 2019; Dokulil et al., 2021), and unfortunately, they practically concern only surface water temperature except for the article (Hondzo and Stefan, 1996), which deals with the bottom temperature.

There are no publications about the vertical distribution of AWTM in dimictic lakes, in particular in the deep regions of Lake Baikal. The interannual variability of temperature and the depth of occurrence of the mesothermal maximum temperature during the period of winter stratification in Lake Baikal are considered in the article (Aslamov et al., 2024). The only two articles on the distribution of maximum water tem-

peratures in the coastal zone of Lake Baikal concern the bottom depths of 15 meters or less (Rossolimo, 1957; Fedotov and Khanaev, 2023). Therefore, the objective of this study was to present for the first time the data of annual water temperature maxima T_{\max} by using stationary long-term high-precision temperature measurements at different horizons (since 2005 to 2016 except 2009) referring to the bottom depths up to 500 m in the southern coastal zone of Lake Baikal. After analyzing the observed vertical temperature profiles data sets the empirical relationship between both the absolute annual maximum temperature T_{\max} and the date $t_{T_{\max}}$ and depth of its appearance $Z_{T_{\max}}$ were established.

2. Data and Study area

Lake Baikal has been studied extensively since 1990, when the Baikal International Center for Ecological Research (BICER) was created. Stationary long-term high-precision temperature measurements have been carried out since March 1999 by Research Institute of Applied Physics of Irkutsk State University in cooperation with the Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG) and Limnological Institute SB RAS on the base of the Lake Baikal Neutrino Experiment (Baikal Neutrino Telescope NT200+ in operation) (Aynutdinov et al., 2009). Several stations were set up in the southern coastal zone of the lake.

We used data from the buoy station closest to shore at a distance of 1.0 km and a bottom depth of 550 m (Fig. 1a). Seven temperature loggers distributed along the lake bed and 15 m deep recorded the temperature profile throughout the year at 15 min intervals for eleven years from 2005 to 2016 (except 2009). Measurement horizons were: 1) 14.7 to 26.5 m, 2) 50 to 52.3 m, 3) 100 to 102.3 m, 4) 150 to 152.3 m, 5) 200 to 202.3 m, 6) 250 to 252.3 m, and 7) 300 to 302.3 m. The characteristics of the measurements performed are given in Aslamov et al., 2024. Some of the variation in logger depths is due to technical difficulties in installation from year to year. Figure 1a shows the location of the buoy station in Southern Baikal, near Cape Ivanovsky (51°47'22.7" N, 104°24'53.4" E).

The average bottom slope in the station area is 33° (Bathymetric map..., 2024), which exceeds the critical value for sliding processes (Hakanson and Jansson, 2002). This indicates that both the sliding of water masses and the movement of substances can occur on this slope.

The southern part of Lake Baikal has pronounced peculiarities associated with the influence of the bordering shores with various heights and wind action in the semi-enclosed area of the lake. As Kozhova and Izmet'eva (1998) reported, in the southern part of Lake Baikal, strong northwestern winds disrupt often the summer stratification, generating cold-water upwellings along the western coast and causing surface water temperatures to plunge to 4 °C from 14° to 16 °C within hours. Strong winds can accelerate the mixing, and some warm pulses, followed by a return to 4 °C,

can cause the thermocline to disappear. A well-mixed surface layer is formed by coastal downwelling due to inshore Ekman transport generated by a wind blowing parallel to the coast.

3. Results and Discussion

3.1. Basic features of vertical distribution of annual water temperature maxima in the southern coastal zone

The timing of the annual surface temperature maximum $t_{T_{\max}}$ is the most active period for the air-lake surface interaction (Naumenko and Guzivaty, 2022). The dates are important phenological indicators for assessing the long-term change in the thermal regime of large lakes, in particular Lake Baikal. Long-term year-round temperature measurements at certain horizons allow precise identification of key temperatures in the thermal cycle of Lake Baikal. For every available horizon (usually from 15–19 m to 300 m), both the maximum temperature T_{\max} and its date $t_{T_{\max}}$ were estimated in the southern coastal zone of Lake Baikal based on the dataset used. This was done for the stable stratification period over eleven years, from 2005 to 2016, except 2009. Fig.1 shows the seasonal course of water temperature for two different data sets, namely the very cold stratification period and the very warm period. As the depth of measurement increases, the temperature change from higher to lower values is clearly visible. Obviously, there is a significant difference in temperature and the timing of the occurrence of maximum temperatures $t_{T_{\max}}$ at the two upper horizons, while at the lower horizons, these differences are much smaller. As for upwelling, it can be recognized by a sharp decrease in temperature in the upper horizons (Troitskaya et al., 2023).

In general, the most pronounced shape of the temperature graph for the upper layer of the lake has the shape of a pointed peak each year. It is well known that Lake Baikal is a typical dimictic lake up to a depth of the active layer of 200–300 m, where the annual seasonal temperature fluctuations are observed (Shimaraev, 1977; Shimaraev et al., 1994; Shimaraev et al., 2012).

The deeper temperature structure demonstrates more gentle curves with a short maximum period. At a depth of more than 100 m, seasonal fluctuations are insignificant (Fig. 1).

The statistical characteristics of the parameters of annual temperature maxima T_{\max} and the dates of their occurrence $t_{T_{\max}}$ for the coastal zone of Southern Baikal are given in Table 1.

The annual maximum water temperatures in the years 2005–2016 varied from 10.9 °C in 2010 to 18.2 °C in 2005 at the highest horizon of about 20 m (Fig. 1). The average maximum annual temperature (15 °C) decreases from the upper horizon to a maximum density of 4 °C at a depth of 300 m. The smallest variability in maximum water temperatures was observed at the same depth. The interannual T_{\max} range decreased dra-

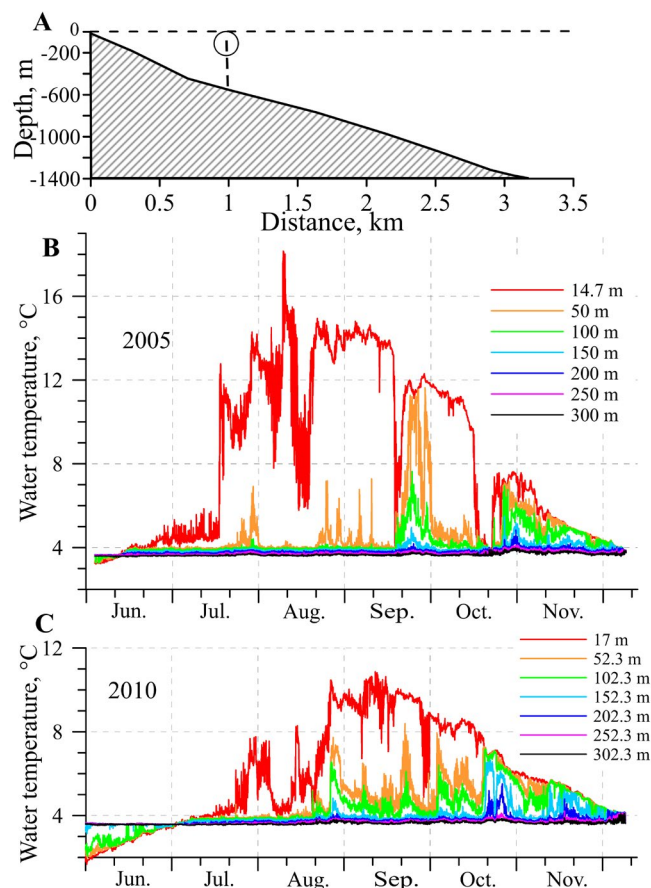


Fig.1. Location of the buoy station in Southern Baikal (A) and seasonal course of water temperature for two different stratification periods, namely the very warm (2005) (B) and the very cold periods (2010) (C).

matically with depth by 20 times compared to the upper horizon, as well as the standard deviation (Table 1).

Table 1 indicates that date of annual temperature maximum $t_{T_{\max}}$ varied from August 6 (2012) to September 16 (2013) at the highest horizon. The date difference is about one month and a half, with an average date $t_{T_{\max}}$ August 22.

On average, the occurrence of peaks $t_{T_{\max}}$ from horizon to horizon varied from 28 days between the upper horizons, with a decrease to five days from 250 to 300 m.

However, in 2013, the difference between the dates of maxima at the neighboring upper horizons was the largest over the entire eleven-year period and was approximately 52 days.

The difference between the dates of maxima at the uppermost horizon and the lowest horizon averaged 86 days, with a maximum of 111 days in 2016. This phenomenon confirms the unevenness of heat input at depth from year to year, related to differences in weather conditions, the intensity of vertical mixing processes, stratification stability, and the degree of warming of the upper water layer.

The standard deviation of $t_{T_{\max}}$ is large and almost identical at all horizons (13 – 19 days), indicating a large scatter of dates.

Table 1. Statistical characteristics of the parameters of temperature maxima T_{max} and the dates of their occurrence $t_{T_{max}}$

Parameters	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇
Annual temperature maximum T_{max} , °C							
Minimum	10.87	8.39	6.93	5.49	4.41	3.94	3.84
Maximum	18.15	16.04	10.35	7.29	6.11	5.37	4.18
Range	7.28	7.65	3.42	1.80	1.70	1.43	0.34
Mean	15.00	11.06	8.34	6.16	5.14	4.34	3.99
Std. dev.	2.64	2.20	1.32	0.56	0.55	0.41	0.11
Date of annual temperature maximum $t_{T_{max}}$, day of year							
Minimum	Aug.6	Aug.16	Sep.23	Oct.3	Oct.12	Oct.12	Oct.12
Maximum	Sep.16	Oct.8	Nov.2	Nov.19	Nov.24	Nov.25	Dec.17
Range	41	54	40	46	44	44	66
Mean	Aug.22	Sep.19	Oct.10	Oct.28	Nov.5	Nov.10	Nov.16
Std. dev.	14	15	13	15	14	15	19

Note: Z₁ conforms to the depth of measurement from 14.7 to 26.5 m, Z₂ from 50 to 52.3 m, Z₃ from 100 to 102.3 m, Z₄ from 150 to 152.3 m, Z₅ from 200 to 202.3 m, Z₆ from 250 to 252.3 m, and Z₇ from 300 to 302.3 m.

Seven data sets for every studied horizon during eleven years illustrate how the annual maximum water temperatures varied versus day of year with linear dependence for every horizon (Fig. 2).

We can see that in the three upper horizons (up 100 m), there is a decrease in maximum temperatures with increasing dates. This means that the later the maximum temperature occurs, the lower it is. Starting from the horizon at 150 m, this pattern stops, and regardless of the date, the maximum temperature remains constant.

This supports the conclusion that a negligible amount of heat from the surface penetrates to these depths. Obviously, the variation of the maximum temperature with depth is strongly nonlinear.

In terms of climate trends, we found no significant trends for the eleven-year study period, for either T_{max} or $t_{T_{max}}$.

3.2. Empirical relationship of variation of maximum temperature by time and depth

The upper layer of Lake Baikal reaches its maximum temperature in July and August in the southern part of the lake. Maximum temperatures are recorded at depths of more than 200 m between October and December. We hypothesize that for every specific dimictic lake (or some area of lake), the annual extreme temperatures can be a function of depth. It is obvious that if the summer vertical temperature distribution is stable, the maximum temperature will gradually decrease with depth due to surface heat penetration and horizontal exchange (Naumenko and Guzivaty, 2022). We wonder at what rate this deepening occurs and whether there are correlations between the magnitude of the maximum, its depth, and the time of the occurrence. To quantify changes in the AMWT, the previously developed approximation forms of empirical functions were used to find three dependencies, namely

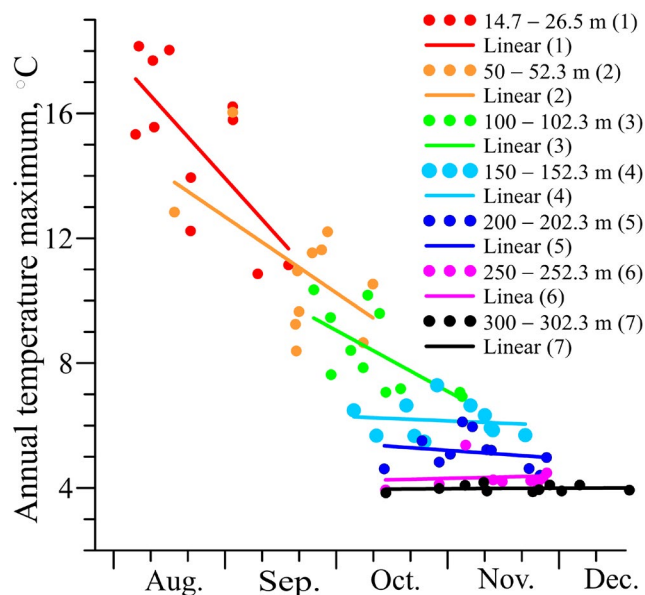


Fig.2. Annual maximum water temperatures depending on the day of year, with linear dependence for every horizon.

$$T_{max} = F(h)$$

$$Z_{T_{max}} = F(t)$$

$$T_{max} = F(t)$$

where h is depth in m, t is time, and day of year.

The forms of empirical dependencies and the coefficients of determination R^2 are given in Table 2 and Fig. 3.

It is evident that each dependence has a nonlinear character (Fig. 3). Empirical dependence describes from 66 to 87% of the variability of the studied parameters.

To construct empirical relationships, we used the values found for only eight years, which amounted to 54 values for each sample. The values for the three remaining years were highlighted in orange in Fig. 3. They were used to verify the dependencies as indepen-

dent data. Evidently, they lie within the same boundaries as the data used to construct the relationships. Independent observed data were compared with those estimated by the three empirical relationships. Root Mean Square Errors (RMSE) are 1.3 °C, 49 m, and 1.9 °C, respectively. It should be noted that the error in depth is quite large. This is due to the large variation of date $t_{T_{max}}$ across the studied horizons.

Differentiation of the obtained dependencies enables to estimate the rates of change of the studied parameters. Due to the nonlinearity of relationships for the studied seasonal cooling period of the southern part of Lake Baikal, the greatest variability of the maximum annual temperatures with time T_{max}/t was observed in early August, right after the beginning of regular convective mixing at a depth of up to 50 m (Fig. 3, right upper and lower graph). At the same time, the rate of deepening $Z_{T_{max}}/h$ is also maximum.

Fig. 3, right center graph shows the rate of deepening $Z_{T_{max}}/t$ over time. The minimum rate $Z_{T_{max}}/t$ is observed in early August at about 0.5 m/day, and then it increases to 6 m/day in early December.

In this way, the empirical dependences obtained for the first time allow us to estimate the background seasonal evolution of the vertical distribution of AWTM values in the southern part of Lake Baikal and the rate of change of these parameters.

4. Conclusion

We analyzed *in-situ* measurements of water temperature with discreteness of 15 minutes for stable stratification period in the southern coastal zone of Lake Baikal with a bottom depth of 550 m for eleven years from 2005 to 2016, except 2009. For the first time, the absolute annual temperature maxima T_{max} and time of occurrence $t_{T_{max}}$ at seven horizons were determined based on the dataset used. The statistical characteristics of the parameters are estimated. It should be noted that these characteristics will vary depending on the depth of the bottom and the distance from the shore of the lake. T_{max} at the upper horizon corresponds to the data on the maximum water surface temperature in Listvaynka (Fedotov and Khanaev, 2023). In contrast to the shallow zone of Lake Baikal, the maximum temperatures do not occur at the same time at all horizons. There are significant time shifts (about 86 days) between the uppermost horizon (~20 m) and the lowest horizon (~300 m).

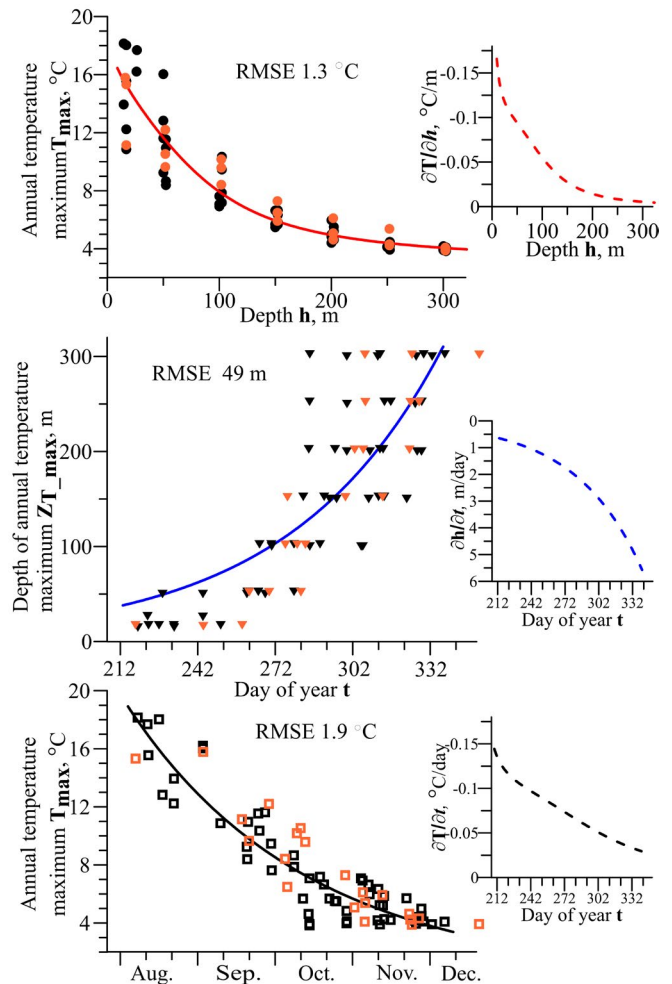


Fig. 3. Empirical dependences for estimation of the magnitude of the annual water temperature maxima, its depth, and the time of occurrence (left panel). The right panel demonstrates rates for the same parameters.

The annual maximum temperature goes from the surface to a depth of 300 m, where it reaches ~4 °C. Attempts have been made to derive equations to approximate the vertical distribution of annual extreme water temperature with depth as background for analysis of possible climatic variations. The resulting dependencies are non-linear. They are verified using independent data. Much of the variation in extreme lake water temperature can be explained by the vertical heat exchange, which depends on the depth.

The rates of change of the annual maximum temperature with depth have been determined. The maximum rate of change occurs immediately after the beginning of seasonal surface cooling and free vertical

Table 2. Empirical coefficients for dependencies developed for parameters of annual maximum water temperatures

Dependences	Formula	Coefficients			
		a	b	c	R ²
$T_{max} = F(h)$	$a * \text{Exp}(b * \text{ArcTan}(\text{Log}(h/1000) + c))$	6.91	-0.72	2.11	0.87
$Z_{T_{max}} = F(t)$	$a ** ((t/100) + c)$	5.47	-	0	0.66
$T_{max} = F(t)$	$a * \text{POW}((t/100), b) * \text{Exp}(c * (t/100))$	351.46	-0.67	-1.12	0.87

convection. The rate of deepening of the maximum is a measure of the vertical penetration of heat to the depth and can serve as the hydrophysical basis for Lake Baikal. These conclusions correspond to similar results for Lake Ladoga (Naumenko and Guzivaty, 2023). Dokulil et al. (2021) indicate a substantial increase in annual maximum lake surface temperatures in several lakes. Our results provide significant evidence of the existence of the background empirical dependencies necessary for detecting the features in terms of regional climate changes.

Acknowledgements

Financial support for the research was mainly provided by the federal budget funds for the State Assignment FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies of its basin, and adjacent territories under the influence of natural and anthropogenic factors against the background of climatic changes”.

Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences provided the initial data within the State Assignment LIN SB RAS (0279-2021-0004), and the results were jointly discussed on the basis of the State Assignment of the Ministry of Education and Science FZZE-2023-0004.

The authors thank colleagues from EAWAG (Switzerland) for joint field work and data collection and members of the Baikal Collaboration for assistance in expedition work.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

References

- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H. et al. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54(6):2283–2297. DOI: [10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283)
- Aslamov I., Troitskaya E., Gnatovsky R. et al. 2024. Study of Interannual Variability of the Winter Mesothermal Temperature Maximum Layer in Southern Baikal. *Water* 16(1):21. DOI: [10.3390/w16010021](https://doi.org/10.3390/w16010021)
- Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. et al. 2009. Baikal neutrino telescope – an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies. *Nuclear Instruments and Methods A* 598: 282–288. DOI: [10.1016/j.nima.2008.08.124](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.124)
- Bathymetric contour map of Lake Baikal. [Karta uklo-nov ozera Bajkal] <http://www.lin.irk.ru/intas/maps.htm> (accessed 19.04.2024). (in Russian)
- Beletsky D., Schwab D.J., McCormick M.J. 2006. Modeling 1998–2003 summer circulation and thermal structure in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research* 111:C10010. DOI: [10.1029/2005JC00322](https://doi.org/10.1029/2005JC00322)
- Boehrer B., Schultze M. 2008. Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics* 46:RG2005. DOI: [10.1029/2006RG000210](https://doi.org/10.1029/2006RG000210)
- Brandão L., Fajardo T., Eskinazi-Sant'Anna E. et al. 2012. Fluctuations of the population of *Daphnia laevis* Birge 1878: A six-year study in a tropical lake. *Brazilian Journal of Biology* 72:479–487. DOI: [10.1590/S1519-69842012000300010](https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000300010)
- Brighenti L.S., Staehr P.A., Gagliardi L.M. et al. 2015. Seasonal Changes in Metabolic Rates of Two Tropical Lakes in the Atlantic Forest of Brazil. *Ecosystems* 18:589–604. DOI: [10.1007/S0021-015-9851-3](https://doi.org/10.1007/S0021-015-9851-3)
- Carpenter S.R., Stanley E.H., Vander Zanden M.J. 2011. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Rev. Environ. Resour* 36: 5–99. DOI: [10.1146/annurev-environ-021810-094524](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524)
- Dokulil M.T., de Eyto E., Maberly S.C. et al. 2021. Increasing maximum lake surface temperature under climate change. *Climatic Change* 165: 56. DOI: [10.1007/S10584-021-03085-1](https://doi.org/10.1007/S10584-021-03085-1)
- Eckert B., Walz N. 1998. Zooplankton succession and thermal stratification in the polymictic shallow Müggelsee (Berlin, Germany): a case for the intermediate disturbance hypothesis? *Hydrobiologia* 387(0): 199–206. DOI: [10.1023/A:1017045927016](https://doi.org/10.1023/A:1017045927016)
- Fedotov A.P., Khanaev I.V. 2023. Annual temperature regime of the shallow zone of Lake Baikal inferred from high resolution data from temperature loggers. *Limnology and Freshwater Biology* 4:119–125. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-4-119](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-4-119)
- Gillis D.P., Minns C.K., Shuter B.J. 2021. Predicting open-water thermal regimes of temperate North American lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 78(7):820–840. DOI: [10.1139/CJFAS-2020-0140](https://doi.org/10.1139/CJFAS-2020-0140)
- Hakanson L., Jansson M. 2002. Principles of Lake Sedimentology. Blackburn: Blackburn Press. DOI: [10.1007/978-3-642-69274-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69274-1)
- Hampton S.E., Izmet`eva L.R., Moore M.V. et al. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake—Lake Baikal. *Siberia. Global Change Biology* 14(8):1947–1958. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)
- Hondzo M., Stefan H.G. 1996. Long-term lake water quality predictors. *Water Research* 30(12):2835–2852. DOI: [10.1016/0043-1354\(95\)00286-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00286-3)
- Izmet`eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 42(1): 6–17. DOI: [10.1016/j.jglr.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006)
- James R. 1971. Prediction of the Thermal Structure of the Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Lake Baikal. Evolution and Biodiversity. 1998. In: Kozhova O.M., Izmet`eva L.R. (ed.). Leiden: Backhuys Publisher. DOI: [10.1002/iroh.199900053](https://doi.org/10.1002/iroh.199900053)
- Minns C.K., Shuter B.J., Davidson A. et al. 2018. Factors influencing peak summer surface water temperature in Canada's large lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 75(7): 1005–1018.
- Minoura K. 2000. Lake Baikal. A Mirror in Time and Space for Understanding Global Change Processes. Amsterdam: Elsevier Science. DOI: [10.1016/B978-0-444-50434-0.X5000-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50434-0.X5000-8)
- Naumenko M.A., Guzivaty V.V. 2022. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 58(1):44–53. DOI: [10.1134/S0001433822010108](https://doi.org/10.1134/S0001433822010108)
- Naumenko M.A., Guzivaty V.V. 2023. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review* 23(3):177–189. DOI: [10.3390/limnolrev23030011](https://doi.org/10.3390/limnolrev23030011)
- O'Brien K.R., Ivey G.N., Hamilton D.P. et al. 2003. Simple mixing criteria for the growth of negatively buoyant phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 48(3): 1326–1337. DOI: [10.4319/lo.2003.48.3.1326](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1326)
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42(24):10773–10781. DOI: [10.1002/2015GL066235](https://doi.org/10.1002/2015GL066235)

Ptak M., Sojka M., Kozłowski M. 2019. The increasing of maximum lake water temperature in lowland lakes of central Europe: case study of the Polish Lakeland. *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology* 55(6): 1-11. DOI: [10.1051/limn/2019005](https://doi.org/10.1051/limn/2019005)

Rossolimo L.L. 1957. Temperature regime of Lake Baikal. *Temperaturnyj rezhim ozera Bajkal. Trudy Bajkal'skoj limnologicheskoy stancii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR]* (in Russian)

Sharma S., Walker S.C., Jackson D.A. 2008. Empirical modelling of lake water–temperature relationships: a comparison of approaches. *Freshwater Biology* 53:897–911. DOI: [10.1111/j.1365-2427.2008.01943.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.01943.x)

Sherstyankin P.P., Alekseev S.P., Abramov A.M. et al. 2006. Bathymetric electronic map of Lake Baikal. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle [Doklady Earth Sciences]* 408(1):102–107. (in Russian)

Shimaraev M.N. 1977. Elements of the thermal regime of Lake Baikal. Novosibirsk: Nauka. (in Russian)

Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G. et al. 1994. *Physical limnology of Lake Baikal: a review*. Irkutsk and Okayama. Irkutsk: BICER Publishers.

Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Blinov V.V. et al. 2012. Upwellings in Lake Baikal. *Doklady of Earth Sciences* 442:272–276. DOI: [10.1134/S1028334X12020183](https://doi.org/10.1134/S1028334X12020183)

Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Yu. et al. 2018. Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake. *Environmental Research Letters* 13:035006. DOI: [10.1088/1748-9326/aaad75](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad75)

Troitskaya E.S., Shimaraev M.N., Aslamov I.A. 2023. Impact of climate change on occurrence and characteristics of coastal upwelling in Listvennichny Bay (Southern Baikal) from 1941 to 2023. *Limnology and Freshwater Biology* 2023(6):261–274. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-6-261](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-6-261)

Vincent W.F., Gibbs M.M., Dryden S.J. 1984. Accelerated eutrophication in a New Zealand lake: Lake Rotoiti, central North Island. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 18(4): 431–440. DOI: [10.1080/00288330.1984.9516064](https://doi.org/10.1080/00288330.1984.9516064)

Вертикальное распределение годовых максимумов температуры воды в южной прибрежной зоне озера Байкал

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНауменко М.А.¹, Гузиватый В.В.¹, Ловцов С.В.², Троицкая Е.С.³, Буднев Н.М.²

¹ Институт озероведения, Российская академия наук – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия

² Научно-исследовательский институт прикладной физики, ФГБОУО Иркутский государственный университет, б-р Гагарина, 20, Иркутск, 664033, Россия

³ Лимнологический институт, Сибирское отделение Российской академии наук, Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. АБСТРАКТ. Часто экстремальное событие, такое как температурный максимум, оказывает наибольшее влияние на экосистему озера, чем изменения средних условий. Впервые на основе *in-situ* измерений температуры воды с дискретностью 15 минут для периода устойчивой стратификации за одиннадцать лет (с 2005 по 2016 г., кроме 2009 г.) в южной прибрежной зоне озера Байкал с глубиной дна 550 м исследована вертикальная изменчивость годовых максимумов температуры воды (ГМТВ) и даты их наступления. Полученные статистические характеристики четко идентифицируют различные особенности вертикального распределения ГМТВ. Наблюдается значительный временной сдвиг (около 86 суток) между самым верхним горизонтом (около 15 м) и самым нижним 300-метровым горизонтом. Средние максимальные годовые температуры (15°C) снижаются от верхнего горизонта до температуры ~ 4°C на глубине 300 м. Для количественной оценки изменений годового максимума температуры воды были построены эмпирические функции для оценки зависимостей между ГМТВ, датами их наступления и глубиной. Эти зависимости не являются линейными и подтверждены независимыми данными. Они имеют достаточно высокие коэффициенты детерминации.

Ключевые слова: температура воды, годовые максимумы, вертикальное распределение, озеро Байкал

Для цитирования: Науменко М.А., Гузиватый В.В., Ловцов С.В., Троицкая Е.С., Буднев Н.М. Вертикальное распределение годовых максимумов температуры воды в южной прибрежной зоне озера Байкал // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - С. 157-170. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-157

1. Введение

Для получения современных знаний о термической структуре и ее межгодовой изменчивости в крупном озере требуется гораздо больше модельных расчетов и наблюдений, чем имеется на сегодняшний день (Beletsky et al., 2006). Особенно это касается крупного димиктического озера Байкал, имеющего самую большую глубину и самый большой объем пресной воды среди озер мира (Minoura, 2000, Шерстянкин и др., 2006). По данным многих публикаций, известно, что озера мира подвержены изменению климата (Adrian et al., 2009; O'Reilly et al., 2015). Действительно, за последний 30-летний период температура поверхности воды в озерах мира повышается, сокращается период ледостава, изменяется дата начала и продолжительность периода стратификации. Экосистема озера Байкал пре-

терпевает быстрые изменения в локальном и глобальном масштабах (Hampton et al., 2008; Izmet'eva et al., 2016). Вертикальный и горизонтальный обмен теплом и импульсом определяет распределение температуры воды от поверхности до дна. Количественная оценка гидрофизических процессов необходима для понимания изменений многих водных процессов. По этим причинам, а также для мониторинга климатических температурных условий в озерах, знание пространственного и временного распределения температуры озерной воды может быть чрезвычайно ценным (Carpenter et al., 2011).

Термический режим крупного димиктического озера определяется сезонным ходом поступления тепла к поверхности воды, взаимодействием движущегося слоя воздуха с водой и распространением тепла в глубь озера. Димиктизм озерной

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: m.a.naumenko@mail.ru (М.А. Науменко)

Поступила: 14 мая 2024; Принята: 05 июня 2024;

Опубликована online: 19 июня 2024

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



толщи проявляется в том, что озеро дважды в год перемешивается от поверхности до дна за счет аномалии плотности пресной воды при температуре 3.98°C на поверхности. Обычно между двумя основными событиями перемешивания озеро устойчиво стратифицировано в течение нескольких месяцев. Классическое трехслойное вертикальное распределение температуры формируется, а именно, 1) поверхностный перемешанный слой (эпилимнион), 2) средний слой с большими вертикальными градиентами температуры (металимнион) и 3) придонный слой, который холоднее и плотнее, чем все верхние слои (гиполимнион) (Boehrer and Schultze, 2008).

Обычно годовой максимум температуры поверхностного слоя воды T_{\max} приходится на середину лета. В Байкале, вследствие его огромных размеров, годовые максимумы температуры воды (ГМТВ) у берега наблюдается в конце июля – августе, в открытых частях озера в августе-сентябре. Наибольшие вертикальные градиенты температуры и плотности возникают в период прогрева в металимнионе, за 20–30 дней до достижения максимальной температуры воды на поверхности (Naumenko and Guzivaty, 2022). Затем начинается охлаждение, инициирующее конвективное перемешивание, которое ускоряет углубление эпилимниона, градиенты уменьшаются. Тепло распространяется на нижележащие горизонты, максимумы температуры смещаются на большую глубину, а их значения уменьшаются. В каждую дату проникновение тепла на нижележащие горизонты можно проследить как заглубление годовых максимумов температуры воды от поверхностного слоя до дна на определенной вертикали (Джеймс, 1971; Stepanenko et al., 2018). Осенью, когда тепло достигает дна, происходит переворот (то есть вертикальная изотермия), и температура у дна становится самой высокой за год в большом димиктическом озере.

Сезонные изменения термической стратификации могут влиять на динамику численности фитопланктона и зоопланктона (Eckert and Walz, 1998; Brandão et al., 2012). Вертикальная протяженность эпилимниона (т.е. глубина перемешанного слоя) и величина термического градиента в толще воды влияют на рост планктона и первичную продукцию (Vincent et al., 1984; O'Brien et al., 2003; Brighenti et al., 2015) и тем самым регулируют проникновение света и внутреннюю нагрузку питательных веществ. Таким образом, T_{\max} и время наступления годового пика $t_{T_{\max}}$ на определенной глубине $Z_{T_{\max}}$ влияют на положение максимума концентрации хлорофилла в сезонном ходе параметров экосистемы озера. Поэтому заглубление температурного максимума в стратифицированных озерах можно рассматривать не только как важный гидрофизический процесс, но и как параметр, влияющий на структуру экосистемы. Более того, изменение климатических максимумов может влиять на популяции и сообщества рыб (Gillis et al., 2021).

Очевидно, что знание величины и даты наступления температурных максимумов на различных

глубинах необходимо для понимания изменений многих водных процессов в разных типах озер. Существуют публикации о важности этих экстремальных событий (Sharma et al., 2008; Minns et al., 2018; Ptak et al., 2019; Dokulil et al., 2021) но, к сожалению, они практически касаются только температуры поверхностных вод, за исключением статьи Hondzo and Stefan, 1996, где рассматривается придонная температура.

Публикации о вертикальном распределении годовых максимальных температур в димиктических озерах, в частности в глубоководных районах озера Байкал, отсутствуют. Межгодовая изменчивость температуры и глубины залегания мезотермического максимума температуры в подледный период обсуждается в статье Aslamov et al. (2024). О распределении максимальных температур воды в прибрежной зоне Байкала на глубинах дна 15 м и менее существует только две работы (Россолимо, 1957; Fedotov and Khanaev, 2023). Поэтому целью настоящего исследования было впервые представить данные о годовых максимумах температуры воды T_{\max} с помощью стационарных многолетних высокоточных измерений температуры на разных горизонтах (с 2005 по 2016 г., кроме 2009 г.), относящихся к глубинам дна до 550 м в южной прибрежной зоне Байкала. После анализа массивов данных вертикальных профилей температуры была установлена эмпирическая зависимость между абсолютным годовым максимумом температуры T_{\max} и датой $t_{T_{\max}}$ и глубиной его появления $Z_{T_{\max}}$.

2. Исходные данные и район исследований

Озеро Байкал активно изучается с 1990 года, когда был создан Байкальский международный центр экологических исследований (БИЦЭР). Стационарные многолетние высокоточные измерения температуры проводятся с марта 1999 г. Институтом прикладной физики Иркутского государственного университета совместно со Швейцарским федеральным институтом экологических наук и технологий (EAWAG) и Лимнологическим институтом СО РАН на базе Байкальского нейтринного эксперимента (действующий Байкальский нейтринный телескоп NT200+) (Aynutdinov et al., 2009). Несколько станций были установлены в прибрежной зоне южной части озера.

Мы использовали данные с буйковой станции, расположенной ближе всего к берегу на расстоянии 1,0 км и глубиной дна 550 м (Рис. 1а). Семь температурных логгеров, распределенных между дном озера и глубиной 15 м, регистрировали температурный профиль в течение всего года с интервалом 15 мин на протяжении одиннадцати лет с 2005 по 2016 г. (кроме 2009 г.). Горизонты измерений: 1) от 14.7 до 26.5 м, 2) от 50 до 52.3 м, 3) от 100 до 102.3 м, 4) от 150 до 152.3 м, 5) от 200 до 202.3 м, 6) от 250 до 252.3 м, 7) от 300 до 302.3 м. Характеристики проведенных измерений приведены в Aslamov et al.,

2024. Некоторое различие в глубине расположения логгеров из года в год связано с техническими трудностями при установке. На Рис. 1а показано расположение буйковой станции в Южном Байкале в районе мыса Ивановский с координатами 51°47'22.7" с. ш., 104°24'53.4" в. д.

Средний уклон дна в районе станции составляет 33° (Карта уклонов..., 2024), что превышает критическое значение для процессов скольжения (Hakanson and Jansson, 2002). Это означает, что на этом уклоне могут происходить как сползание водных масс, так и перемещение веществ.

Южная часть Байкала имеет ярко выраженные особенности, связанные с влиянием берегов различной высоты и действием ветра в полузамкнутой области озера. По данным Кожовой и Измestьевой (1998), в южной части Байкала сильные северо-западные ветры часто нарушают летнюю стратификацию, вызывая подъем холодных вод вдоль западного побережья и приводя к понижению температуры поверхностных вод до 4 °С с 14° - 16 °С в течение нескольких часов. Сильные ветры могут ускорить перемешивание, и некоторые теплые импульсы, за которыми следует возврат к 4 °С, приводят к исчезновению термоклина. Хорошо перемешанный поверхностный слой образуется в результате прибрежного даунвеллинга, вызванного прибрежным экмановским переносом, создаваемым ветром, дующим параллельно побережью.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Основные особенности вертикального распределения годовых максимумов температуры воды в южной прибрежной зоне

Сроки наступления годового максимума поверхностной температуры $t_{T_{max}}$ являются наиболее активным периодом взаимодействия воздуха и поверхности озера (Naumenko and Guzivaty, 2022). Эти даты являются важными фенологическими индикаторами для оценки долговременных изменений термического режима крупных озер, в частности Байкала. Длительные круглогодичные измерения температуры на определенных горизонтах позволяют точно определить ключевые температуры термического цикла Байкала. Для каждого доступного горизонта (обычно от 15–19 м до 300 м) в южной прибрежной зоне Байкала на основе используемого набора данных были оценены как максимальная температура T_{max} , так и ее дата $t_{T_{max}}$. Это было сделано для периода устойчивой стратификации за одиннадцать лет с 2005 по 2016 год, за исключением 2009 года. На Рис. 1 показан сезонный ход температуры воды для двух лет, характеризующихся самым теплым и самым холодным летним периодом за исследуемый период наблюдений. С увеличением глубины измерений ясно видно изменение температуры от более высоких значений к более низким. Очевидно, что существуют значительные различия в температуре и времени наступления

максимальных температур на двух верхних горизонтах, в то время как на нижних горизонтах эти различия гораздо меньше. Что касается апвеллингов, то их можно распознать по резкому снижению температуры в верхних горизонтах (Troitskaya et al., 2023).

В целом, в каждый год наиболее выраженная форма температурного графика для верхнего слоя озера имеет вид остроконечной вершины. Общеизвестно, что Байкал является типичным димиктическим озером до глубины деятельного слоя 200–300 м, в котором наблюдаются ежегодные сезонные колебания температуры (Шимараев, 1977; Shimaraev et al., 1994; Shimaraev et al., 2012).

Глубинная структура температуры демонстрирует более пологие кривые с коротким периодом максимума. На глубине более 100 м сезонные колебания незначительны (Рис. 1). Статистические характеристики параметров годовых температурных максимумов T_{max} и даты их наступления $t_{T_{max}}$ для прибрежной части Южного Байкала приведены в Таблица 1.

На горизонте около 20 м, наиболее приближенном к поверхности озера, годовые максимальные температуры воды в 2005 – 2016 гг. изменя-

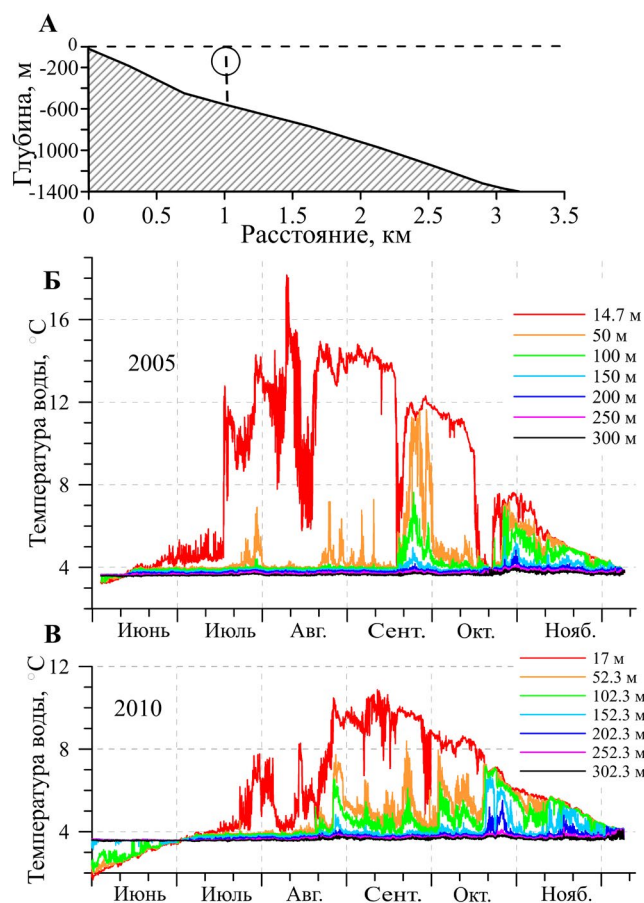


Рис.1. Расположение буйковой станции в Южном Байкале (А) и сезонный ход температуры воды для двух различных по степени прогрева периодов летней стратификации – очень теплого (2005 г.) (Б) и очень холодного (2010 г.) (С).

Таблица 1. Статистические характеристики параметров годовых температурных максимумов и даты их наступления

Параметры	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇
Годовая максимальная температура, °C							
Минимум	10.87	8.39	6.93	5.49	4.41	3.94	3.84
Максимум	18.15	16.04	10.35	7.29	6.11	5.37	4.18
Диапазон	7.28	7.65	3.42	1.80	1.70	1.43	0.34
Среднее	15.00	11.06	8.34	6.16	5.14	4.34	3.99
СКО	2.64	2.20	1.32	0.56	0.55	0.41	0.11
Дата возникновения годового максимума температуры, сутки							
Минимум	Авг.6	Авг.16	Сент.23	Окт.3	Окт.12	Окт.12	Окт.12
Максимум	Сент.16	Окт.8	Нояб.2	Нояб.19	Нояб.24	Нояб.25	Дек.17
Диапазон	41	54	40	46	44	44	66
Среднее	Авг.22	Сент.19	Окт.10	Окт.28	Нояб.5	Нояб.10	Нояб.16
СКО	14	15	13	15	14	15	19

Примечание: Z₁ соответствует глубине измерения от 14.7 до 26.5 м, Z₂ – от 50 до 52.3 м, Z₃ – от 100 до 102.3 м, Z₄ – от 150 до 152.3 м, Z₅ – от 200 до 202.3 м, Z₆ – от 250 до 252.3 м, Z₇ – от 300 до 302.3 м.

лись от 10.9 °C в 2010 г. до 18.2 °C в 2005 г. (Рис.1). Средние максимальные годовые температуры снижаются от 15 °C для верхнего горизонта до 4 °C на глубине 300 м. На той же глубине наблюдалась наименьшая изменчивость максимальных температур воды. Межгодовой диапазон изменений температуры воды резко уменьшался с глубиной, примерно в 20 раз по сравнению с верхним горизонтом, так же как и стандартное отклонение СКО (Таблица 1).

Таблица 1 показывает, что дата годового температурного максимума на самом верхнем горизонте варьирует от 6 августа (2012 г.) до 16 сентября (2013 г.). Разница в датах $t_{T_{max}}$ составляет около полутора месяцев при средней дате 22 августа.

В среднем наступление максимумов $t_{T_{max}}$ от горизонта к горизонту варьировало от 28 дней между верхними горизонтами и уменьшалось до пяти дней от 250 до 300 м.

Однако в 2013 году разница между датами максимумов на соседних горизонтах была наибольшей за весь одиннадцатилетний период и составила около 52 дней.

Разница между датами максимумов на самом верхнем и самом нижнем горизонтах составила в среднем 86 дней, с максимумом в 111 дней в 2016 году. Это явление подтверждает неравномерность поступления тепла на глубину от года к году, связанную с различиями погодных условий, интенсивностью процессов вертикального перемешивания, устойчивостью стратификации и степенью прогрева верхнего слоя воды.

Стандартные отклонения $t_{T_{max}}$ велики и почти одинаковы на всех горизонтах (13–19 дней), что указывает на большой разброс дат.

Семь наборов данных для каждого исследуемого горизонта за одиннадцать лет позволяют проиллюстрировать, как изменялась годовая максимальная температура воды в зависимости от дня года с линейной зависимостью для каждого горизонта (Рис. 2).

Видно, что на трех верхних горизонтах (до 100м) наблюдается значимое снижение максимальной температуры с увеличением даты. Это означает, что чем позже наступает максимум температуры, тем его величина меньше. Начиная с горизонта 150 м, эта закономерность прекращается, и независимо от даты максимальная температура остается постоянной. Это подтверждает вывод о том, что на эти глубины проникает ничтожно малое количество тепла с поверхности. Очевидно, что изменение максимальной температуры с глубиной носит ярко выраженный нелинейный характер.

Что касается климатических тенденций, то за одиннадцатилетний период исследования мы не обнаружили существенных тенденций ни для одного из показателей: ни для T_{max} , ни для $t_{T_{max}}$.

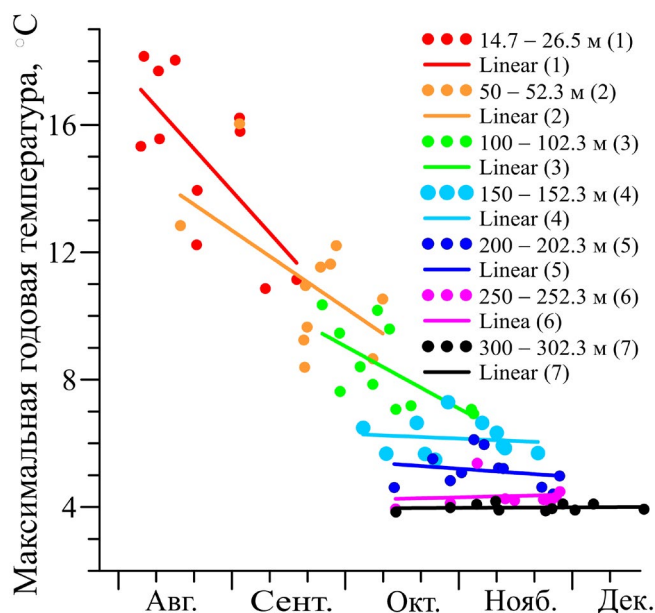


Рис.2. Годовые максимальные температуры воды в зависимости от дня года с линейной зависимостью для каждого горизонта.

3.2. Эмпирическая зависимость изменения максимальной температуры по времени и глубине

В южной части Байкала максимальная температура в верхнем слое достигается в июле-августе. На глубинах более 200 м максимум температуры приходится на октябрь-декабрь. Мы предполагаем, что для каждого конкретного димиктического озера (или некоторой его области) годовые экстремальные температуры могут быть функцией глубины. Очевидно, что если летнее вертикальное распределение температуры стабильно, то максимальная температура будет монотонно уменьшаться с глубиной за счет проникновения тепла с поверхности и горизонтального обмена (Naumenko and Guzivaty, 2022). Мы задаемся вопросом, с какой скоростью происходит это заглубление и есть ли корреляции между величиной максимума, его глубиной и временем возникновения. Для количественной оценки изменений ГМТВ использовались ранее разработанные аппроксимационные формы эмпирических функций, которые позволили найти три зависимости, а именно

$$T_{\max} = F(h)$$

$$Z_{T_{\max}} = F(t)$$

$$T_{\max} = F(t)$$

где h – глубина, м, t – сутки от начала года.

Формы эмпирических зависимостей и коэффициенты детерминации R^2 приведены в Таблице 2 и на Рис. 3.

Очевидно, что каждая зависимость имеет нелинейный характер (Рис.3). Эмпирические зависимости описывают от 66 до 87% изменчивости исследуемых параметров.

Для построения эмпирических зависимостей мы использовали значения, найденные только для восьми лет (2005–2011, 2015–2016), что составило 54 значения для каждой выборки. На Рис. 3 оранжевым цветом выделены значения для трех оставшихся лет (2012–2014). Они были использованы для проверки зависимостей как независимые данные. Очевидно, что они лежат в тех же границах, что и данные, использованные для построения зависимостей. Независимые наблюдаемые данные сравнивались с данными, оцененными по трем эмпирическим зависимостям. Среднеквадратичные ошибки (RMSE) составили 1.3 °C, 49 м, 1.9 °C соот-

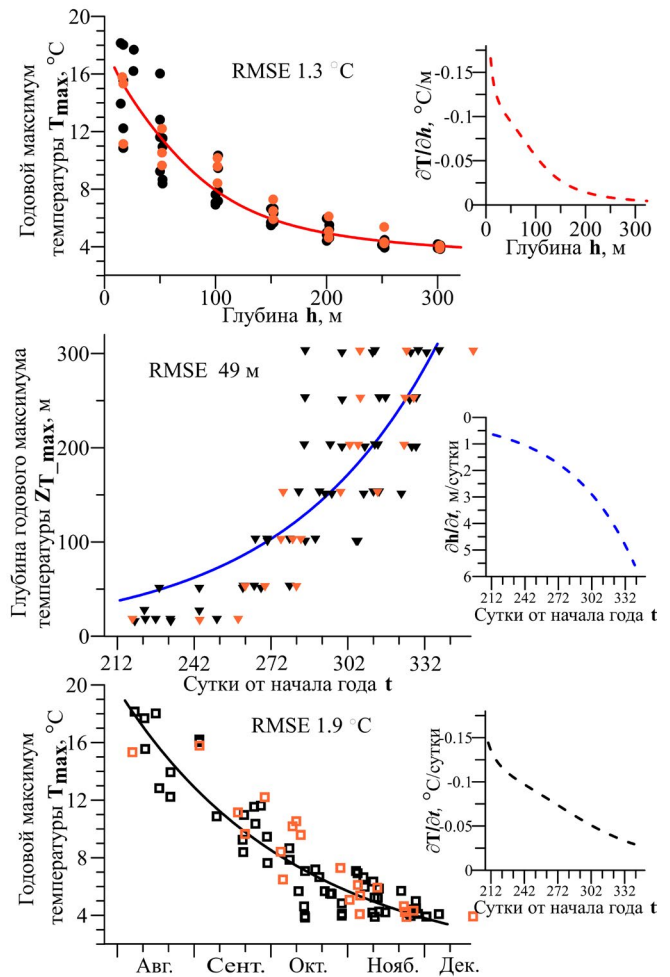


Рис.3. Эмпирические зависимости для оценки величины годового максимума температуры воды, его глубины и времени наступления (левая панель). На правой панели показаны скорости изменения тех же параметров.

ветственно. Следует отметить, что ошибка по глубине довольно велика. Это связано с большим разбросом даты $t_{T_{\max}}$ по исследуемым горизонтам.

Дифференцирование полученных зависимостей позволяет оценить скорости изменения изучаемых параметров. В связи с нелинейностью зависимостей для изучаемого периода сезонного охлаждения южной части Байкала наибольшая изменчивость максимальных годовых температур со временем T_{\max} / t наблюдалась в начале августа сразу после начала регулярного конвективного перемешивания на глубине до 50 м (Рис. 3, правый верхний и нижний графики). В это же время скорость углубления T_{\max} / h также максимальна.

Таблица 2. Эмпирические коэффициенты для зависимостей, разработанных для параметров годовых максимальных температур воды

Зависимости	Формула	Коэффициенты			
		a	b	c	R ²
$T_{\max} = F(h)$	$a * \text{Exp}(b * \text{ArcTan}(\text{Log}(h/1000) + c))$	6.91	-0.72	2.11	0.87
$Z_{T_{\max}} = F(t)$	$a ** (t/100) + c$	5.47	-	0	0.66
$T_{\max} = F(t)$	$a * \text{POW}((t/100), b) * \text{Exp}(c * (t/100))$	351.46	-0.67	-1.12	0.87

На Рис.3, правый центральный график, показана скорость заглупления $Z_{T_{\max}} / t$ с течением времени. Минимальная скорость $Z_{T_{\max}} / t$ наблюдается в начале августа около 0.5 м/сут, затем она увеличивается до 6 м/сут в начале декабря.

Таким образом, впервые полученные эмпирические зависимости позволяют оценить фоновую сезонную эволюцию вертикального распределения величин ГМТВ южной части озера Байкал и скорость изменения этих параметров.

4. Заключение

Проанализированы натурные измерения температуры воды с дискретностью 15 минут для периода устойчивой стратификации в южной прибрежной зоне озера Байкал с глубиной дна 550 м за одиннадцать лет с 2005 по 2016 г., кроме 2009 г. Впервые на основе использованного набора данных определены абсолютные годовые максимумы температуры T_{\max} и время их наступления $t_{T_{\max}}$ на семи горизонтах. Оценены статистические характеристики этих параметров. Следует отметить, что эти характеристики будут меняться в зависимости от глубины дна и удаленности от берега озера. T_{\max} на верхнем горизонте соответствует данным о максимальной температуре поверхности воды в Листвянке (Fedotov and Khanaev, 2023). В отличие от мелководной зоны Байкала максимальные температуры не наблюдаются одновременно на всех горизонтах. Между самым верхним горизонтом (~20 м) и самым нижним (~300 м) наблюдаются значительные временные сдвиги около 86 дней.

Годовой максимум температуры заглупляется, уменьшаясь по величине от поверхности до глубины 300 м, где T_{\max} достигает температуры ~4 °С. Были получены эмпирические уравнения для аппроксимации вертикального распределения годовых экстремальных температур воды с глубиной, которые можно использовать в качестве репера для анализа возможных климатических вариаций. Полученные зависимости являются нелинейными. Они проверены на независимых данных. Большая часть вариаций экстремальной температуры воды в озере может быть объяснена вертикальным теплообменом, который зависит от глубины.

Определены скорости изменения годового максимума температуры с глубиной. Максимальная скорость изменения наблюдается сразу после начала сезонного охлаждения поверхности воды и свободной вертикальной конвекции. Скорость заглупления максимума является мерой вертикального проникновения тепла на глубину и может служить гидрофизической характеристикой озера Байкал. Эти выводы соответствуют аналогичным результатам для Ладожского озера (Naumenko and Guzivaty, 2023). Dokulil et al. (2021) указывают на существенное увеличение годовых максимальных температур поверхности европейских озер. Полученные нами результаты являются подтверждением существования фоновых эмпирических зависимостей, необхо-

димых для выявления особенностей региональных изменений климата.

Благодарности

Финансовое обеспечение исследований было осуществлено главным образом за счет средств федерального бюджета на выполнение государственного задания FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений». Исходные данные были предоставлены Лимнологическим институтом СО РАН в рамках госзадания ЛИН СО РАН (0279-2021-0004), а результаты были совместно обсуждены на основе государственного задания Минобрнауки FZZE-2023-0004.

Авторы благодарят коллег из EAWAG (Швейцария) за совместные полевые работы и сбор данных и членов коллаборации «Байкал» за помощь в проведении экспедиционных работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H. et al. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54(6):2283–2297. DOI: [10.4319/lo.2009.54.6 part 2.2283](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.part.2.2283)
- Aslamov I., Troitskaya E., Gnatovsky R. et al. 2024. Study of Interannual Variability of the Winter Mesothermal Temperature Maximum Layer in Southern Baikal. *Water* 16(1): 21. DOI: [10.3390/w16010021](https://doi.org/10.3390/w16010021)
- Aynutdinov V., Avrorin A., Balkanov V. et al. 2009. Baikal neutrino telescope – an underwater laboratory for astroparticle physics and environmental studies. *Nuclear Instruments and Methods A* 598:282–288. DOI: [10.1016/j.nima.2008.08.124](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.124)
- Beletsky D., Schwab D., McCormick M. 2006. Modeling 1998–2003 summer circulation and thermal structure in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research* 111:C10010. DOI: [10.1029/2005JC00322](https://doi.org/10.1029/2005JC00322)
- Boehrer B., Schultze M. 2008. Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics* 46: RG2005. DOI: [10.1029/2006RG000210](https://doi.org/10.1029/2006RG000210)
- Brandão L., Fajardo T., Eskinazi-Sant'Anna E. et al. 2012. Fluctuations of the population of *Daphnia laevis* Birge 1878: A six-year study in a tropical lake. *Brazilian Journal of Biology* 72: 479–487. DOI: [10.1590/S1519-69842012000300010](https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000300010)
- Brighenti L.S., Staehr P.A., Gagliardi L.M. et al. 2015. Seasonal Changes in Metabolic Rates of Two Tropical Lakes in the Atlantic Forest of Brazil. *Ecosystems* 18: 589–604. DOI: [10.1007/S0021-015-9851-3](https://doi.org/10.1007/S0021-015-9851-3)
- Carpenter S.R., Stanley E.H., Vander Zanden M.J. 2011. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environmental Resources* 36: 5–99. DOI: [10.1146/annurev-environ-021810-094524](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524)
- Dokulil M.T., de Eyto E., Maberly S.C. et al. 2021. Increasing maximum lake surface temperature under climate change. *Climatic Change* 165: 56. DOI: [10.1007/S10584-021-03085-1](https://doi.org/10.1007/S10584-021-03085-1)

- Eckert B., Walz N. 1998. Zooplankton succession and thermal stratification in the polymictic shallow Müggelsee (Berlin, Germany): a case for the intermediate disturbance hypothesis? *Hydrobiologia* 387(0):199–206. DOI: [10.1023/A:1017045927016](https://doi.org/10.1023/A:1017045927016)
- Fedotov A.P., Khanaev I.V. 2023. Annual temperature regime of the shallow zone of Lake Baikal inferred from high resolution data from temperature loggers. *Limnology and Freshwater Biology* 4:119–125. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-4-119](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-4-119)
- Gillis D.P., Minns C.K., Shuter B.J. 2021. Predicting open-water thermal regimes of temperate North American lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 78(7): 820–840. DOI: [10.1139/CJFAS-2020-0140](https://doi.org/10.1139/CJFAS-2020-0140)
- Hakanson L., Jansson M. 2002. Principles of Lake Sedimentology. Blackburn: Blackburn Press. DOI: [10.1007/978-3-642-69274-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69274-1)
- Hampton S.E., Izmet'eva L.R., Moore M.V. et al. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake—Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14(8): 1947–1958. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)
- Hondzo M., Stefan H.G. 1996. Long-term lake water quality predictors. *Water Research* 30(12): 2835–2852. DOI: [10.1016/0043-1354\(95\)00286-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00286-3)
- Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 42(1): 6–17. DOI: [10.1016/j.jglr.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006)
- Lake Baikal. Evolution and Biodiversity. 1998. In: Kozhova O.M., Izmet'eva L.R. (ed.). Leiden: Backhuys Publisher. DOI: [10.1002/iroh.199900053](https://doi.org/10.1002/iroh.199900053)
- Minns C.K., Shuter B.J., Davidson A. et al. 2018. Factors influencing peak summer surface water temperature in Canada's large lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 75(7): 1005–1018.
- Minoura K. 2000. Lake Baikal. A Mirror in Time and Space for Understanding Global Change Processes. Amsterdam: Elsevier Science. DOI: [10.1016/B978-0-444-50434-0.X5000-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50434-0.X5000-8)
- Naumenko M.A., Guzivaty V.V. 2022. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga). *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 58(1): 44–53. DOI: [10.1134/S0001433822010108](https://doi.org/10.1134/S0001433822010108)
- Naumenko M.A., Guzivaty V.V. 2023. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review* 23(3): 177–189. DOI: [10.3390/limnolrev23030011](https://doi.org/10.3390/limnolrev23030011)
- O'Brien K.R., Ivey G.N., Hamilton D.P. et al. 2003. Simple mixing criteria for the growth of negatively buoyant phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 48(3): 1326–1337. DOI: [10.4319/lo.2003.48.3.1326](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.1326)
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42(24): 10773–10781. DOI: [10.1002/2015GL066235](https://doi.org/10.1002/2015GL066235)
- Ptak M., Sojka M., Kozłowski M. 2019. The increasing of maximum lake water temperature in lowland lakes of central Europe: case study of the Polish Lakeland. *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology* 55(6): 1-11. DOI: [10.1051/limn/2019005](https://doi.org/10.1051/limn/2019005)
- Sharma S., Walker S.C., Jackson D.A. 2008. Empirical modelling of lake water–temperature relationships: a comparison of approaches. *Freshwater Biology* 53: 897–911. DOI: [10.1111/j.1365-2427.2008.01943.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.01943.x)
- Shimaraev M.N., Verbolov V.I., Granin N.G. et al. 1994. Physical limnology of Lake Baikal: a review. Irkutsk and Okayama. Irkutsk: BICER Publishers.
- Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Blinov V.V. et al. 2012. Upwellings in Lake Baikal. *Doklady of Earth Sciences* 442: 272–276. DOI: [10.1134/S1028334X12020183](https://doi.org/10.1134/S1028334X12020183)
- Stepanenko V.M., Repina I.A., Artamonov A.Yu. et al. 2018. Mid-depth temperature maximum in an estuarine lake. *Environmental Research Letters* 13: 035006. DOI: [10.1088/1748-9326/aaad75](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaad75)
- Troitskaya E.S., Shimaraev M.N., Aslamov I.A. 2023. Impact of climate change on occurrence and characteristics of coastal upwelling in Listvennichny Bay (Southern Baikal) from 1941 to 2023. *Limnology and Freshwater Biology* 6: 261–274. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-6-261](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-6-261)
- Vincent W.F., Gibbs M.M., Dryden S.J. 1984. Accelerated eutrophication in a New Zealand lake: Lake Rotoiti, central North Island. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 18(4): 431–440. DOI: [10.1080/00288330.1984.9516064](https://doi.org/10.1080/00288330.1984.9516064)
- Джеймс Р. 1971. Прогноз термической структуры океана. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Карта уклонов озера Байкал. <http://www.lin.irk.ru/intas/maps.htm> (дата обращения 19.04.2024)
- Россолимо Л.Л. 1957. Температурный режим озера Байкал. Труды Байкальской лимнологической станции АН СССР, т. XVI. Москва: Изд-во АН СССР.
- Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М. и др. 2006. Батиметрическая электронная карта озера Байкал. Доклады Академии Наук 408(1): 102–107.
- Шимараев М.Н. 1977. Элементы теплового режима озера Байкал. Новосибирск: Наука.