

Impact of climate change on occurrence and characteristics of coastal upwelling in Listvennichny Bay (Southern Baikal) from 1941 to 2023

Troitskaya E.S.^{1,2,*}, Shimaraev M.N.¹, Aslamov I.A.¹

¹Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

²Irkutsk State University, Karl Marx Str., 1, Irkutsk, 664003, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of analysis about relationship between climate changes and coastal upwellings in Listvennichny Bay (Southern Baikal) from 1941 to 2023. A decrease in both full and partial upwellings has been shown since the late 1950s. In addition, an increase in the proportion of upwelling events in August compared to other months during 1970-2023 were found. It also showed tendencies for longer upwelling durations and greater temperature drops during upwelling after 1970 compared to the previous period. Inferred from the analysis of the ERA5-Land data, it was determined that the cause of the observed changes was a global course of decreasing wind activity and a particular redistribution of the proportion of northerly and southwesterly winds in the Bay during the study period. Two cases of full and intermittent upwellings were described and compared. Possible ecological impacts on the Listvennichny Bay due to the combined effects of increasing anthropogenic pressure and less frequent upwellings have been hypothesized.

Keywords: Baikal, Listvennichny Bay, upwelling, water temperature, wind, climate change

1. Introduction

Upwelling is the organized upward movement of waters toward the surface of a water body. It is one of the mechanisms of vertical water exchange that affects the distribution of physical and chemical parameters of water (temperature, salinity, density, chemical composition, pollutants etc.) as well as biological processes (for example, the life cycles of bacteria, phyto- and zooplankton). It is known that upwelling can develop in the coastal and pelagic zones. Coastal upwelling in large lakes is quite well studied (e.g., Boyarinov and Petrov, 1991; Bell and Eadie, 1983; Corman et al., 2010; Plattner et al., 2006).

The coastal upwelling in Baikal was first described by G. Yu. Vereshchagin about a hundred years ago (1927). He measured water temperature and dissolved oxygen concentrations in the coastal surface waters, which corresponded to the values observed in the pelagic zones at 50-200 m depth. Later, upwellings were identified in the coastal zones of Northern Baikal using NOAA/AVHRR satellite imagery (Semovski et al., 2001). Katz and co-authors (2011) suggested that variability of currents is one of the factors influencing water dynamics in the lake, especially

the development of the coastal upwelling. The first quantitative assessments (water temperature decrease, duration and depth of upwelling development, vertical water velocities) of the coastal upwelling in the Southern Baikal have been obtained relatively recently (Shimaraev et al., 2012).

Some biological studies have reported the effect of upwelling on plankton distribution in Lake Baikal. For example, M.M. Kozhov (1962) observed upwelling in the Maloye More Strait and its adjacent areas of the lake after a strong NW storm on September 4-9, 1951. The water surface temperature dropped from 12-13°C to 7-7.5°C in the Maloye More Strait and to 8-9°C near the eastern shore of Olkhon Island. After this upwelling, plankton “was very sparse and rather equally distributed in the upper 100-meter layer”. In August 1963 (Kozhov et al., 1970), a strong NW wind was over the Southern Baikal near the Bolshiye Koty settlement, in result the water surface temperature decreased to 5-6°C. The zooplankton biomass decreased to 1.2 g/m² compared to the average annual value of 40-50 g/m². Further, E.L. Afanasyeva (1977) also showed that vertical water movements in the upwelling zone could transport nauplii of the copepod *Epishura baikalensis* from deep water layers to the surface.

*Corresponding author.

E-mail address: elena.troitskaya@lin.irk.ru (E.S. Troitskaya)

Received: December 15, 2023; **Accepted:** December 27, 2023;

Available online: December 28, 2023

© Author(s) 2023. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Based on phytoplankton measurements and satellite SeaWiFS observations in 2001-2003, B. Heim et al. (2005) concluded that reductions in concentration of chlorophyll *a* along the eastern shore of the Northern Baikal were associated with upwelling events. Complex studies at the testing site near Cape Elokhin (the western shore of the Northern Baikal) in August 1988 showed that the concentration of chlorophyll *a* could increase after upwelling relaxation (Verbolov et al., 1992).

In the past several decades, Baikal, as well as the entire Northern Hemisphere, has been experiencing changes in the thermal and ice regimes. (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Shimaraev et al., 2002; Todd and Mackay, 2003; Kouraev et al., 2007; Hampton et al., 2008; Shimaraev et al., 2018; Sharma et al., 2021). The under-ice period has been shortened by almost three weeks (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Shimaraev et al., 2002). This resulted in earlier dates of summer stratification and gradual increase of water surface temperature. The transition to winter stratification was shifted correspondingly to later dates (Aslamov et al., 2024). Recent studies of water temperature in individual lake basins (Shimaraev et al., 2009) and water column heat content in the Southern Baikal (Troitskaya et al., 2022) indicate the transformation of the temperature field and redistribution of heat content under climate change conditions. Consequently, this should be reflected in the intensity of vertical heat and water exchange processes in Baikal, which are of particular importance for the littoral, which is the habitat of the largest number of hydrobionts.

The aim of this work was to quantify the characteristics of the coastal upwelling in Listvennichny Bay, and their correlation with the wind activity and climate change for the last 80 years.

2. Materials and methods

Water temperature data obtained in the period of 1941-2023 at the pier of LIN SB RAS in the settlement of Listvyanka, located on the shore of Listvennichny Bay in the Southern Baikal (Fig. 1), were used to identify upwelling events and assess their characteristics. From 1941 to 2005, temperature was measured with a mercury thermometer (accuracy $\pm 0.02^\circ\text{C}$) at 8, 14, and 20 h, from 2006 to the present time with electronic temperature sensors (accuracy $\pm 0.002^\circ\text{C}$, measurement discreteness from 1 s to 2 min). The study analyzes only the period of summer stratification, when the surface water is warmer than the deep layers and upwellings cause a sharp temperature drop, which makes them easier to identify. Daily average water temperatures were used to analyze the development of the coastal upwelling. The start and end dates of upwelling, its duration, and the value of the temperature decrease were determined.

Upwelling was considered in those cases when temperature dropped sharply by one or more degrees and it persisted for more than 3 days. The upwelling start date was taken as the day when the water temperature dropped. The date of its end was considered to be the



Fig.1. Map of Listvennichny Bay and measurement locations (<https://earth.google.com/web> – accessed 29.11.2023). The inset shows the location of Listvennichny Bay in the Southern Baikal.

day when the water surface temperature became close to that before the upwelling. The difference between these dates determines the duration of upwelling. The value of water temperature decrease was calculated as the difference between the water temperature before upwelling and at the moment when it reached the minimum value during upwelling.

Depending on the depth from which the water rises to the surface of a water body, full and partial upwelling events are distinguished. Full upwelling is formed by subthermocline waters rising towards the surface, i.e. hypolimnion waters. The subthermocline waters does not reach the surface at partial upwelling. In this regard, we identified full upwellings, determined their characteristics and analyzed the conditions of their development.

To analyze wind conditions, we used daily data on wind speed and direction from 1954 to 2010 from the Angara River Head meteorological station and from 2011 to the present time from an automatic weather station installed on the pier of LIN SB RAS (Listvyanka settlement). As the distance between them is about 4 km and the morphometric conditions are similar, the wind data series are likely uniform. We determined the directionally stable wind with a speed of at least 3 m/s and a duration of at least 6 h observed during the day before the development of upwelling and on the day of its beginning. The average wind direction and speed at which the upwelling started to develop were then calculated. In 2011-2023, modern data enabled us to determine the maximum values of wind speed at wind gusts.

3. Results

Taking into account the influence of climate on Baikal's ice-thermal regime (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Shimaraev et al., 2002; Todd, Mackay, 2003; Kouraev et al., 2007; Hampton et al., 2008; Shimaraev et al., 2018; Sharma et al., 2021), we divided the available water temperature over the observation period into two intervals: 1941-1969 and 1970-2023. The period of 1941-1969 is characterized by a decrease in water surface temperature, while the period from 1970 to the present is characterized by its increase (Fig. 2). The value of the trends in 1941-1969

was $-0.39^{\circ}\text{C}/10$ years ($r = 0.38$, $p = 0.04$), and it was $+0.26^{\circ}\text{C}/10$ years ($r = 0.38$, $p = 0.009$) in 1970-2023.

A total of 285 upwelling events were identified and treated between May and October 1941-2023. Up to four upwelling events were recorded in each individual month. During the year, 1-3 upwelling events were most often recorded (Fig. 3). The maximum number of upwelling events was 13 within one year (in 1943).

A total of 129 upwelling events (an average of 4.5 events per year) were recorded for the period of 1941 to 1969, and 157 upwelling events (an average of 2.9 events per year) were detected from 1970 to 2023. Figure 4 shows the frequencies of upwelling events for selected months in two periods. Comparison of the two periods revealed a change in the distribution of upwellings by month: compared to the 1941-1969, 1970-2023 shows a greater concentration of upwelling in August (from 38.0% to 46.5%), neighboring July and September showed minor changes in the number of upwellings, and in all other months the number of upwelling decreased significantly (from 0.8% to 0% in May, from 7.0% to 0.6% in June, and from 7% to 3% in October).

Figure 5 shows the frequency of upwelling events with different durations for the two analyzed periods. With the same average duration of upwellings (7 days), a shift in duration to a greater extent since 1970 was revealed (Fig. 5). In the period of 1941-1969, upwellings lasting 4-6 days were more frequent (57.7%), whereas in the period of 1970-2023, the duration of upwellings increased to 5-8 days (56.1%). The number of upwellings with durations of 10 days or more has increased one and a half times in recent decades (from 11.5% to 17.8%).

The magnitude of water temperature drop during upwelling has also changed. Thus, in 1941-1969 and 1970-2023, the mean values were 4.2 and 5.3°C , and the maximum was 12.0 and 13.5°C , respectively. The pattern of the frequency distribution of upwellings by temperature drops has also undergone a transformation

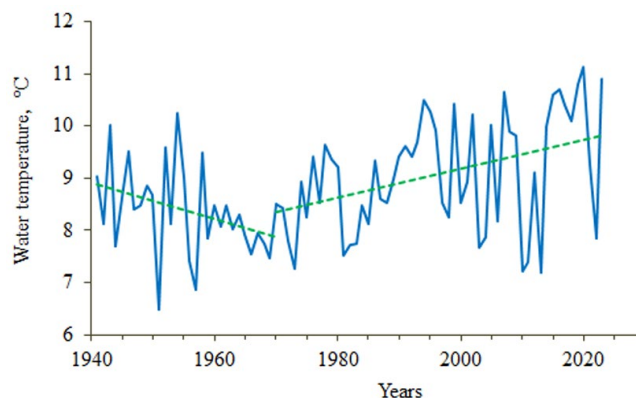


Fig.2. The average values of water temperature for the period of summer stratification at the pier of LIN SB RAS in the Listvyanka settlement for 1941-2023 (solid blue line) and linear trends for 1941-1969 and 1970-2023 (dotted green lines).

(Fig. 6). While, in 1941-1969, 60% of upwellings were characterized by a $1-4^{\circ}\text{C}$ temperature drop, in 1970-2023, 61% of upwellings showed a temperature drop of $3-7^{\circ}\text{C}$.

Analyses of available wind data (since 1954) also enabled us to assess changes in wind characteristics. In 1954-1969 (Fig. 7), upwelling most often developed under N and SW winds (64% of events), and from 1970 under W and SW winds (55% of events). The mean and maximum wind speeds for the considered periods differ a little and are 6 (12) m/s during 1954-1969 and 5 (14) m/s during 1970-2023.

There were 42 full upwelling events identified from 1941 to 2023; of these, 29 occurred from 1941 to 1969 and 13 occurred from 1970 to 2023. The maximum number of full upwelling events 18 and 13 occurred in August and September, respectively, while 7 events were detected in October. Two full upwellings each were recorded in June and July, and one in May. The distribution of full upwelling by decades is shown in Fig. 8.

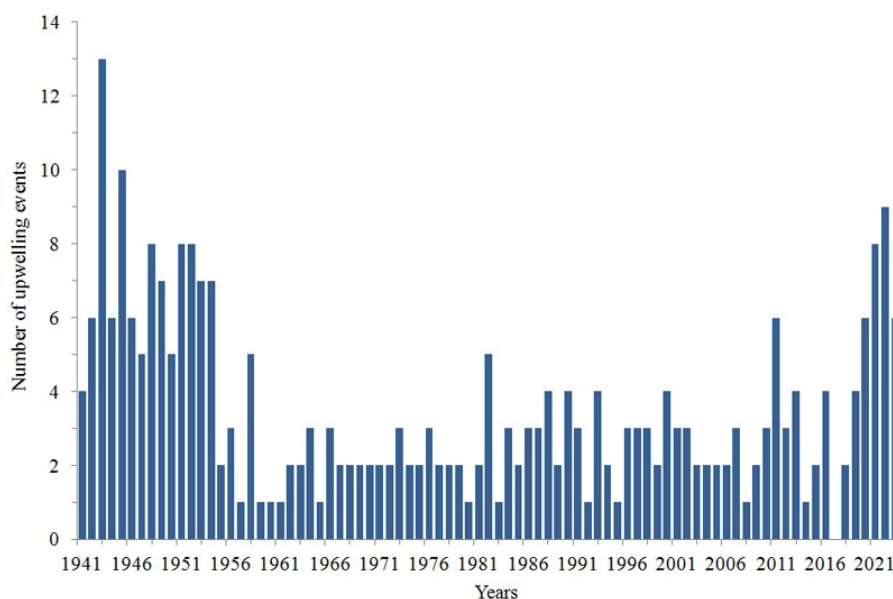


Fig.3. The number of identified upwellings in individual years for 1941-2023.

Analysis of available wind data for 24 total upwelling events showed that full upwellings occurred most often (10 cases) with SW winds blowing at 4-7 m/s. Four events of full upwellings were connected with W winds at wind speeds of 5-9 m/s.

4. Discussion

Thus, we identified summer upwellings in Listvennichny Bay, ranked them by duration, water temperature drop and direction and speed of accompanying winds. Cases of full upwellings were processed individually. The resulting data were divided into two time periods corresponding to observed climatic trends.

Analyzing the morphometry of Listvennichny Bay, it can be concluded that nearshore upwellings can develop under N-NW winds causing the runoff, or due to the Ekman transfer of surface water under W-SW winds and formation of anticyclonic eddy in the bay. At the development of the anticyclonic vortex, there is a sinking of water in its center and a compensating rise of water at the periphery near the bay shores. The analyzed data of winds accompanying upwelling confirm the above assumptions (Fig. 7).

Analysis of upwelling distribution by years showed that until 1960 there was a gradual decrease in the number of upwellings per year. Then, until 2016 their average number remained constant at the rate of about 2.5 upwellings per year, and in the last 8 years there was a certain increase (Fig. 3). Of particular interest was the narrowing of the frequency distribution of upwelling events by month and the concentration of upwellings in August in 1970-2023 (Fig. 4). A redistribution of upwellings toward longer duration and a larger temperature drop after 1970 compared to the previous period was also noted (Fig. 5, 6).

The number of full upwellings has decreased with each decade, from 12 in the 40s to only one in the 2010s. After 2020, no full upwellings have been observed yet.

To understand the possible reasons for these tendencies, it is necessary to analyze how the winds changed during these periods. It should be noted that wind speeds in recent decades have become noticeably lower than in the mid-40s-50s of the last century (Atlas ..., 1977). Comparison of average wind speeds for individual months in 1959-1968 and in 2000-2022 revealed their decrease in June-August by 0.8-1.1 m/s, and by 1.1-2.0 m/s in September-November. Such changes are observed over most territory of Russia (Bulygina et al., 2013) and are probably caused by the rapid warming in the Arctic and a decrease in the poleward temperature gradient which could influence mid-latitude atmospheric circulation and intensity of winds (Coumou et al., 2015).

Since the initial wind data were available only for the upwelling dates, we utilized the well-known reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, in its latest detailed release ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), which aims to summarize the global meteorological monitoring

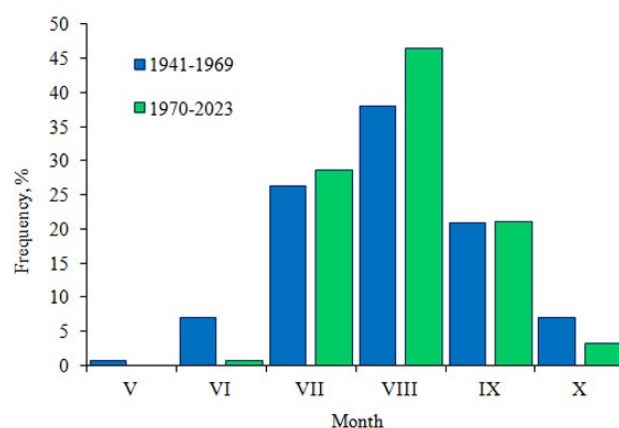


Fig.4. The frequencies of upwelling events for selected months in 1941-1969 and 1970-2023.

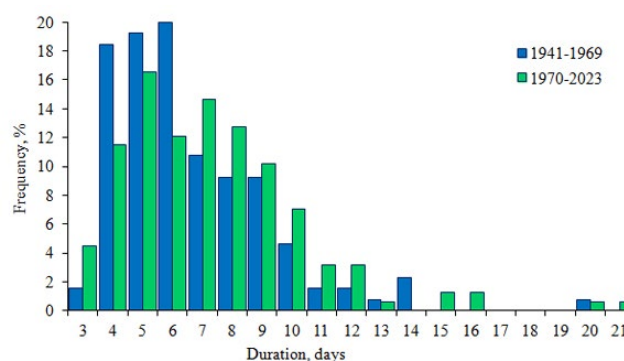


Fig.5. The frequency of upwelling events with different durations for 1941-1969 and 1970-2023.

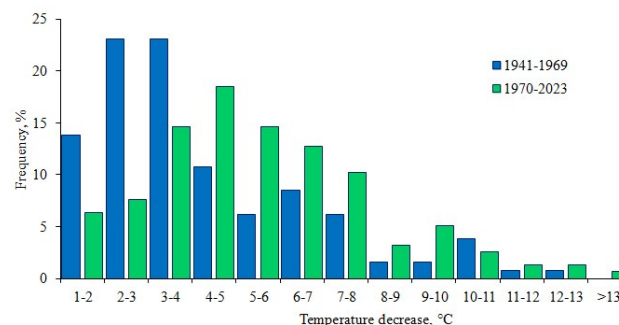


Fig.6. The frequency of upwelling events with different temperature decreases in 1941-1969 and 1970-2023.

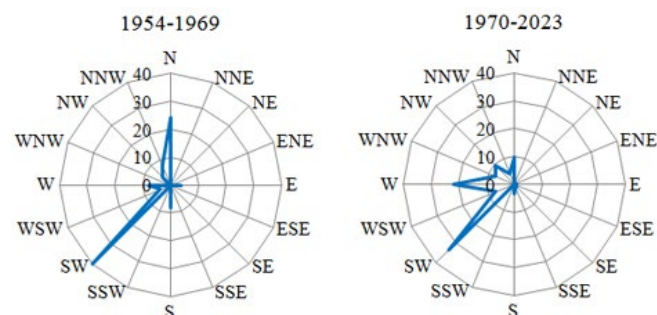


Fig.7. The frequency of upwelling events (%) that developed under winds of a certain direction during two periods.

network based on a four-dimensional variational assimilation system of retrospective data collected in the most complete database (with a grid spacing of 0.1 degree and a temporal resolution of 1 h).

A homogeneous hourly series of winds in Listvyanka from 1950 to 2022 was sampled and obtained. Then a daily averaging was carried out, and the temporal variability of wind frequencies during summer months was plotted for 8 main directions with a step of 45 degrees, as well as the average vector and scalar velocities and wind stability were calculated. Since in recent years there has been an increase in the frequency of upwellings, it was decided to analyze this period separately.

The study of winds for July-September (when most of the upwellings occurs) showed that the average monthly wind speed gradually increases from July to September (2.2, 2.5 and 3 m/s, respectively), wind stability also rises (0.27, 0.33 and 0.52, respectively). At the same time, there is a reorganization of the main wind directions: in July, westerly winds prevail, in August the share of north-westerly winds increases significantly, and by September they become dominant. At the same time, a gradual transformation of the wind rose for August was noted. If in the 50-60s of the last century, westerly winds accounted for 33.5% and north-westerly winds for 20.1% of the total number of winds, then in the last decade, due to climatic changes, the timing of wind reorganization was shifted, and, accordingly, the frequency of occurrence of these winds in August has changed: 28.6% and 29.4%, respectively.

An examination of the proportion of the two main wind directions in August causing upwelling in Listvennichny Bay (Fig. 7) revealed a slight gradual increase in the proportion of northerly winds causing runoff (from 1% in the 1950s, 2% in the 1960s-2010s and 3% in the last decade). The frequency of southwesterly winds also slightly increased (from 2% in the 1950s to 3.1% in the last decade), but dropped to 1.7% during the 1960-2010s, which is likely one of the reasons for the reduced amount of upwellings during this period (Fig. 3).

If one calculates the total frequency of N and SW winds in August for two periods: before 1969 and since 1970, one can note that it increased from 3.6% to 5%, respectively. The observed rise in the proportion of winds causing upwellings coincides with the growth in the number of recorded upwelling events in August 1970-2023 compared to the previous period (Fig. 4). The smaller number of upwellings in July are explained by the fact that this month is characterized by minimum wind speeds for the whole summer-autumn period and minimum wind stability. The share of upwellings in September is also less in spite of the general wind intensification. The reason for this is a significant increase in the stability of north-westerly winds (> 0.5), and a reduced share of SW winds to 2% (compared to 4-5% in August).

The observed redistribution of upwellings towards longer duration and with a larger temperature drop in 1970-2023 compared to the previous period (Figs. 5, 6) has a common reason. This is directly related to the

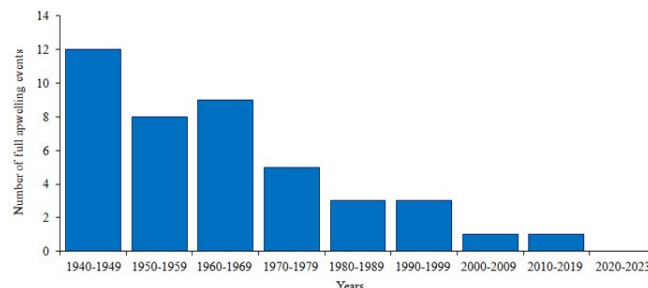


Fig.8. The number of full upwellings by decades.

increasing share of upwellings around August. August is characterized by the warmest water in the littoral, and, accordingly, the upwelling that occurs, with the same temperature of rising waters, will cause a greater temperature drop in August than in other months. And, accordingly, the incoming cold water, due to its high heat capacity, will need much more time to warm up to its initially high temperature values.

The influence of wind parameters on the development of full upwellings can be judged by analyzing the meteorological data during the full upwelling on September 11-21, 2011, when the wind parameters were measured with high discreteness by an automatic weather station. Sustained winds of W-NW direction began in the evening of September 11 and lasted for three days. Wind speeds reached 17 m/s and averaged 8.7 m/s. Water temperature at the beginning of the upwelling was 10.6°C, dropped to 4.0°C by September 15 and after relaxation of the upwelling was 6.8°C on September 21. It should be noted that not only wind strength and duration, but also its stability is necessary for the full upwelling development. For example, on August 16-27, 2023, at the maximum observed western wind speeds (average speed of 14 m/s, gusts up to 35 m/s), the water temperature dropped from 19.4°C to 4°C. However, since the wind decreased and increased again many times during 10 days, water temperature fluctuations from 4 to 10-15°C with a period of 12 to 24 hours were registered, forming a so-called intermittent upwelling. Despite the fact that water from hypolimnion was coming to the surface, the unstable winds did not allow large water masses to be involved in this movement, and the water was immediately replaced by warm surface water at the slightest wind attenuation. Therefore, we did not refer this case to a full upwelling.

The revealed regularities of changes in conditions of the formation and existence of upwellings in Listvennichny Bay allow us to state the following suggestions. On the one hand, reduction in the number of full upwellings should influence the amount of biogens transport from the hypolimnion to the littoral. On the other hand, a decrease in the frequency of upwellings should be accompanied by an increase in the average surface temperature in the coastal zone during the summer season, which increases vertical density gradients in the upper layers and may cause eutrophication of littoral. As a consequence, the sharp growth spike of *Spirogyra* algae in Listvennichny Bay observed in recent years (Kravtsova et al., 2012; Timoshkin et al., 2014; Timoshkin et al., 2018) may

be related to the complex influence of increasing anthropogenic pressure (and rich input of biogens with wastewaters) and climatic changes (Shimaraev and Troitskaya, 2018). The latter, in turn, have a twofold effect on the increase of littoral temperature, both through greater warming due to higher air temperatures and less frequent water exchange (and consequent cooling) with the deep waters of Lake Baikal. Thus, more favorable physical and trophic conditions may be formed, for the development of algae not typical for the littoral of Baikal.

5. Conclusions

As a result of the presented work, we analyzed data on coastal water temperature and winds in Listvennichny Bay. We identified summer coastal upwellings, ranked them by duration, water temperature drops and direction and strength of accompanying winds. The obtained data were divided into two periods corresponding to the observed climatic trends.

It was found, that the main winds causing upwelling are from north and southwest directions, which is confirmed by the morphometry of the bay. Analysis of upwellings distribution by years showed that until 1960 there was a gradual decrease in the number of upwellings per year. From 1960 until 2016 the average number of events roughly constant at about 2.5 upwellings per year, with a slight increase in the last 8 years. The maximum number of upwellings (13) was recorded in 1943. The duration of upwellings averages 7 days, with a maximum of 21 days in 1979. Water temperature usually drops by about 5°C, with a maximum of 13.5°C recorded in 2016.

An increase in the proportion of upwellings in August compared to other months during 1970-2023 was found. A redistribution of upwelling events toward their longer duration and greater temperature drops after 1970 compared to the previous period was also revealed. The cause of these changes was the global course of decreasing wind activity associated with observed climatic changes, and a particular redistribution of the proportion of N and SW winds in the bay during the study period.

The number of full upwellings has decreased with each decade, from 12 in the 40s to just one in the 2010s. After 2020, no full upwellings have been observed yet. Two cases of full and intermittent upwellings were described and compared. Possible ecological impacts on the Listvennichny Bay due to the combined effects of increasing anthropogenic pressure and less frequent upwellings have been hypothesized.

6. Acknowledgments

The authors thank all the staff members of the Laboratory of Hydrology and Hydrophysics of LIN SB RAS for their participation in the expeditionary works and data collection as well as for productive discussions of the study results. Special thanks to Ruslan Gnatovsky for preparation of ERA5-Land data for analysis.

The study was carried out within the State Assignment of LIN SB RAS (0279-2021-0004).

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Afanasyeva E.L. 1977. Biology of baikalian Epishura. Novosibirsk: Nauka. (In Russian)
- 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(21):1-19. DOI: [10.3390/w16010021](https://doi.org/10.3390/w16010021)
- Atlas of waves and winds of Lake Baikal: Reference and navigation manual. 1977. Leningrad: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Bell G.L., Eadie B.J. 1983. Variations in the distribution of suspended particles during an upwelling event in Lake Michigan in 1980. *Journal of Great Lakes Research* 9(4):559-567.
- Boyarinov M.P., Petrov P.M. 1991. Thermal regime forming processes of deep fresh water reservoirs. Leningrad: Nauka. (In Russian)
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. 2013. Changes in the wind regime over Russia in the last decades. In: Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov, pp. 156-172.
- Corman J.R., McIntyre P.B., Kuboja B. et al. 2010. Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa. *Limnology and Oceanography* 55(1):214-224. DOI: [10.4319/lo.2010.55.1.0214](https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0214)
- Coumou D., Lehmann J., Beckmann J. 2015. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Science* 348:324-327. DOI: [10.1126/science.1261768](https://doi.org/10.1126/science.1261768)
- 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* 14:1-12. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)
- Heim B., Oberhaensli H., Fietz S. et al. 2005. Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data. *Global and Planet Change* 46: 9-27. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.11.011)
- Katz S.L., Hampton S.E., Izmet'eva L.R. et al. 2011. Influence of long-distance climate teleconnection on seasonality of water temperature in the World's largest lake - Lake Baikal, Siberia. *PLoS ONE* 6(2):e14688. DOI: [10.1371/journal.pone.0014688](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014688)
- Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N. et al. 2007. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: Relation to air temperature, dynamical, and other factors. *Limnology and Oceanography* 52(3):1268-1286. DOI: [10.4319/lo.2007.52.3.1268](https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.3.1268)
- Kozhov M.M. 1962. Biology of Lake Baikal. Moscow: AS USSR Publ. (In Russian)
- Kozhov M.M., Pomazkova G.I., Ustyuzhin Yu.A. 1970. Distribution of zooplankton in Southern Baikal. Proceedings of Biological-Geographical Institute of Irkutsk State University 23(1):87-94. (In Russian)
- Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V. et al. 2012. Disturbances of the Vertical Zoning of Green Algae in the Coastal Part of the Listvennichnyi Gulf of Lake Baikal. *Doklady Biological Sciences* 448:227-229. DOI: [10.1134/S0012496612060026](https://doi.org/10.1134/S0012496612060026)

- Livingstone D.M. 1999. Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44(6):1486-1497. DOI: [10.4319/lo.1999.44.6.1486](https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.6.1486)
- Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J. et al. 2000. Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289:1743-1746. DOI: [10.1126/science.289.5485.1743](https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743)
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data* 13:4349-4383. DOI: [10.5194/essd-13-4349-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021)
- Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G.A. et al. 2006. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data. *Journal of Great Lakes Research* 32:63-76. DOI: [10.3394/0380-1330\(2006\)32\[63:CAFUIJ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[63:CAFUIJ]2.0.CO;2)
- Semovski S.V., Shimaraev M.N., Minko N.P. et al. 2001. Use of satellite observations to study thermal fronts of Lake Baikal. *Earth Observation and Remote Sensing* 16(5):773-787.
- Sharma S., Richardson D.C., Woolway R.I. et al. 2021. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in northern hemisphere lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(10):1-12. DOI: [10.1029/2021JG006348](https://doi.org/10.1029/2021JG006348)
- Shimaraev M., Troitskaya E., Gnatovskii R. 2009. Modern climate changes and deep water temperature of Lake Baikal. *Doklady of Earth Sciences* 427:804-808.
- Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Blinov V.V. et al. 2012. On upwellings in Lake Baikal. *Doklady of Earth Sciences* 442(2):272-276. DOI: [10.1134/S1028334X12020183](https://doi.org/10.1134/S1028334X12020183)
- Shimaraev M.N., Troitskaya E.S. 2018. Current trends in upper water layer temperature in coastal zones of Baikal. *Geography and Natural Resources* 39(4):349-357. DOI: [10.1134/S187537281804008X](https://doi.org/10.1134/S187537281804008X)
- Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova E.A. et al. 2014. Mass development of green filamentous algae of the genera Spirogyra Link and Stigeoclonium Kutz. (CHLOROPHYTA) in the coastal zone of Southern Baikal. *Hydrobiological Journal* (5):15-26.
- Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N. et al. 2018. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *Journal of Great Lakes Research* 44(2):230-244. DOI: [10.1016/j.jglr.2018.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008)
- Todd M.C., Mackay A.W. 2003. Large-scale climate controls on Lake Baikal ice cover. *Journal of Climate* 16:3186-3199. DOI: [10.1175/1520-0442\(2003\)016<3186:LCCOLB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3186:LCCOLB>2.0.CO;2)
- Troitskaya E., Budnev N., Shimaraev M. 2022. Changes in the heat content of water column in the slope area of the southern basin of Lake Baikal in the 21st Century. *Water* 14:348. DOI: [10.3390/w14030348](https://doi.org/10.3390/w14030348)
- Verbolov V.I., Granin N.G., Zhdanov A.A., et al. 1992. Estimation of hydrophysics state of active layer for polygon observation materials on Lake Baikal. *Water Resources* (5):74-86 (In Russian)
- Vereshchagin G.Yu. 1927. Some data on Baikal deep water regime near Marituy. *Trudy of Committee for Lake Baikal Study* 2:77-138. (In Russian)

Влияние изменений климата на возникновение и характеристики прибрежного апвеллинга в заливе Лиственничный (Южный Байкал) с 1941 по 2023 гг.

Троицкая Е.С.^{1,2*}, Шимараев М.Н.¹, Асламов И.А.¹

¹ *Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия*

² *ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», ул. К. Маркса, 1, Иркутск, 664003, Россия*

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты анализа влияния изменений климата на повторяемость и характеристики прибрежных апвеллингов в заливе Лиственничный (Южный Байкал) с 1941 по 2023 гг. С конца 1950-х годов показано уменьшение как полных, так и неполных апвеллингов. Кроме того, обнаружено увеличение доли апвеллингов в августе по сравнению с другими месяцами в течение 1970-2023 гг. Также были обнаружены тенденции к увеличению продолжительности апвеллинга и большим перепадам температуры во время апвеллинга после 1970 г. по сравнению с предыдущим периодом. Из анализа данных ERA5-Land установлено, что причиной наблюдаемых изменений стал глобальный ход снижения ветровой активности и специфическое перераспределение доли северных и юго-западных ветров в заливе в период исследований. Описаны и сопоставлены два случая полного и неполного апвеллингов. Высказано предположение о возможном экологическом воздействии на Лиственничный залив из-за комбинированного воздействия увеличения антропогенной нагрузки и уменьшения частоты апвеллингов.

Ключевые слова: Байкал, Лиственничный залив, апвеллинг, температура воды, ветер, изменения климата

1. Введение

Апвеллинг – это упорядоченное восходящее движение вод к поверхности водоема. Он является одним из механизмов вертикального водообмена и влияет на вертикальное распределение физических и химических параметров водоема (температура воды, соленость, плотность, химический состав воды, загрязняющие вещества), а также на биологические процессы (например, жизненные циклы бактерий, фито- и зоопланктона). Известно, что апвеллинг может развиваться в прибрежных и пелагических областях. Прибрежные апвеллинги достаточно хорошо изучены в крупных озерах мира (например, Бояринов и Петров, 1991; Bell and Eadie, 1983; Corman et al., 2010; Plattner et al., 2006).

На Байкале прибрежный апвеллинг впервые описал Г.Ю. Верещагин около ста лет назад (1927). Он измерил температуру воды и концентрации растворенного кислорода в прибрежных поверхностных водах, которые соответствовали значениям, наблюдаемым в пелагических областях на глубине 50-200 м. Позднее апвеллинги были обнаружены в

прибрежных районах Северного Байкала по спутниковыми снимками NOAA / AVHRR (Semovski et al., 2001). Katz S.L. с соавторами (2011) предположили, что изменчивость струйных течений является одним из факторов, влияющим на динамику вод в озере, в частности, на развитие прибрежного апвеллинга. Первые количественные оценки (понижение температуры воды, продолжительность и глубина развития апвеллинга, вертикальные скорости вод) прибрежных апвеллингов в Южном Байкале были получены относительно недавно (Шимараев и др., 2012).

Влияние апвеллинга на распределение планктона в Байкале сообщалось в некоторых биологических исследованиях. Например, М.М. Кожов (1962) наблюдал апвеллинг в проливе Малое Море и прилегающих районах озера после сильного NW шторма 4-9 сентября 1951 г. Температура поверхности воды понизилась с 12-13° до 7-7.5°С в проливе Малое Море и до 8-9°С у восточного берега острова Ольхон. После апвеллинга планктон «был очень редок, и относительно равномерно распределен в верхнем 100-метровом слое» (1962). В августе

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: elena.troitskaya@lin.irk.ru (Е.С. Троицкая)

Поступила: 15 декабря 2023; **Принята:** 27 декабря 2023;
Опубликована online: 28 декабря 2023

© Автор(ы) 2023. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



1963 г. (Кожов и др., 1970) сильный NW ветер над акваторией Южного Байкала привел к подъему глубинных вод вблизи пос. Большие Коты. Температура поверхности воды понизилась до 5-6°C. Биомасса зоопланктона снизилась до 1,2 г/м² по сравнению со среднегодовым значением 40-50 г/м². Позже Э.Л. Афанасьева (1977) также показала, что вертикальные движения воды в зоне апвеллинга могут переносить науплии копепода эпишуры *Epi-shura baikalensis* из глубинных слоев воды на ее поверхность. На основе измерений фитопланктона и спутниковых SeaWiFS наблюдений в 2001-2003 гг. Heim B. с соавторами (2005) пришли к выводу, что уменьшения концентрации хлорофилла *a* вдоль восточного берега Северного Байкала были связаны с апвеллингами. Комплексные исследования на полигоне в районе мыса Елохин (западный берег Северного Байкала) в августе 1988 г. показали, что концентрация хлорофилла *a* может увеличиваться после релаксации апвеллинга (Верболов и др., 1992).

В последние несколько десятилетий на Байкале, как и во всем Северном полушарии отмечаются изменения ледово-термического режима (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Шимараев и др., 2002; Todd and Mackay, 2003; Kouraev et al., 2007; Hampton et al., 2008; Шимараев и др., 2018; Sharma et al., 2021). Сроки ледостава сократились почти на три недели (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Шимараев и др., 2002). Это привело к сдвигу сроков установления летней стратификации на более ранние даты и увеличению температуры поверхности воды. Сроки перехода к зимней стратификации соответственно сдвинулись на более поздние даты (Aslamov et al., 2024). Недавние исследования температуры воды в отдельных котловинах озера (Shimaraev et al., 2009) и теплосодержания водной толщи в Южном Байкале (Troitskaya et al., 2022) указывают на трансформацию поля температуры и перераспределение запасов тепла в условиях изменения климата. Следовательно, это должно отражаться на интенсивности процессов вертикального тепло- и водообмена в Байкале. Особое значение изменения температурного режима и процессов вертикального тепло- и водообмена приобретают для литорали, где обитает наибольшее количество гидробионтов.

Целью данной работы было определение количественных характеристик прибрежного апвеллинга, развивающегося в заливе Лиственничный, и их связи с ветром и изменениями климата в последние 80 лет.

2. Материалы и методы

Для выявления случаев апвеллинга и оценки его характеристик были использованы данные о температуре воды, полученные в 1941-2023 гг. у пирса ЛИН СО РАН в п. Листвянка, расположенном на берегу Лиственничного залива в Южном Байкале (Рис. 1). В 1941-2005 гг. температура измерялась ртутным термометром (точность $\pm 0,02^\circ\text{C}$) в 8, 14



Рис.1. Карта Лиственничного залива и мест проведения измерений (<https://earth.google.com/web> – дата обращения 29.11.2023). На врезке указано местоположение Лиственничного залива в Южном Байкале.

и 20 ч., с 2006 г. по настоящее время электронными датчиками температуры (точность $\pm 0,002^\circ\text{C}$, дискретность измерений от 1 с до 2 мин). В исследовании анализируется только период летней стратификации, когда поверхностные воды теплее глубинных слоев и апвеллинги вызывают резкий перепад температур, что облегчает их идентификацию. Для анализа случаев развития прибрежного апвеллинга использовались среднесуточные значения температуры воды. Определялись даты начала и окончания апвеллинга, его продолжительность и величина понижения температуры.

Апвеллингом считались случаи, когда температура резко понижалась на один или более градусов и сохранялась в течение трех и более дней. За дату начала апвеллинга принимался день, когда температура воды резко понижалась, за дату его окончания, когда температура воды на поверхности становилась близкой к таковой до апвеллинга. Продолжительность апвеллинга определялась как разница между датами начала и окончания апвеллинга. Величина понижения температуры воды рассчитывалась как разница между температурой воды перед началом апвеллинга и в момент, когда она достигала минимального значения во время апвеллинга.

В зависимости от того, с какой глубины поднимаются воды на поверхность водоема, выделяют полный и неполный апвеллинг. Полный апвеллинг характеризуется выходом подтермоклинных вод на поверхность, т.е. вод гипolimниона. При неполном апвеллинге процесс подъема вод есть, но подтермоклинные воды не достигают поверхности. В связи с этим нами были отдельно выделены полные апвеллинги, определены их характеристики и проанализированы условия их развития.

Чтобы проанализировать ветровые условия, использовались суточные данные о скорости и направлении ветра за 1954-2010 гг. с метеостанции Исток Ангары, с 2011 г. по настоящее время – с автоматической метеостанции, установленной на пирсе ЛИН СО РАН (пос. Листвянка). Так как расстояние между ними составляет около 4 км и морфометрические условия близки, ряд данных по ветру был принят однородным. По исходным данным определялся устойчивый по направлению ветер со скоростью не менее 3 м/с и продолжительностью не

менее 6 ч., наблюдавшийся в течение суток до даты развития апвеллинга и в день начала его развития. Затем рассчитывались средние направление и скорость ветра, при котором начинал развиваться апвеллинг. В 2011-2023 гг. современные данные позволили определить максимальные значения скорости ветра при его порывах.

3. Результаты

С учетом влияния климата на ледово-термический режим Байкала (Livingstone, 1999; Magnuson et al., 2000; Шимараев и др., 2002; Todd, Mackay, 2003; Kouraev et al., 2007; Hampton et al., 2008; Шимараев и др., 2018; Sharma et al., 2021), имеющиеся данные по температуре воды за весь период наблюдений были разбиты на два временных интервала: 1941-1969 и 1970-2023 гг. Период 1941-1969 гг. характеризуется понижением температуры поверхности воды, а период с 1970 г. по настоящее время – ее повышением (Рис. 2). Величина трендов в 1941-1969 гг. составила $-0,39^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($r = 0,38$, $p = 0,04$), а в 1970-2023 гг. – $+0,26^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($r = 0,38$, $p = 0,009$).

В мае-октябре 1941-2023 гг. были выявлены 285 случаев апвеллинга. В каждом отдельном месяце регистрировалось до четырех апвеллингов. В течение одного года чаще всего фиксировалось 1-3 апвеллинга (Рис. 3). Максимальное количество апвеллингов составило 13 случаев в 1943 году.

Всего за период с 1941 по 1969 г. зарегистрировано 129 апвеллингов (в среднем 4,5 случая в год), а с 1970 по 2023 г. – 157 апвеллингов (в среднем 2,9 случая в год). На рис. 4 показана повторяемость апвеллингов за отдельные месяцы двух периодов. Сравнение периодов выявило изменение распределения апвеллингов по месяцам: по сравнению с 1941-1969 гг., 1970-2023 гг. показывает большую концентрацию апвеллингов в августе (с 38,0% до 46,5%), соседние июль и сентябрь показали незначительные изменения по числу апвеллингов. Во все

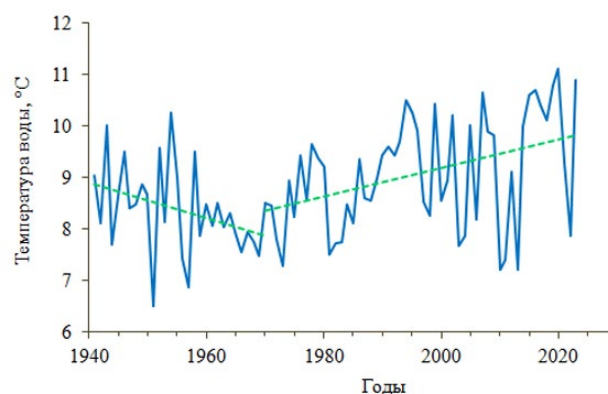


Рис.2. Средние за период прямой стратификации значения температуры воды на пирсе ЛИН СО РАН в п. Листвянка в 1941-2023 гг. (сплошная синяя кривая) и линейные тренды в 1941-1969 и 1970-2023 гг. (пунктирные зелёные кривые).

остальные месяцы число апвеллингов существенно снизилось (с 0,8% до 0% в мае, с 7,0% до 0,6% в июне и с 7% до 3% в октябре).

На рисунке 5 показана частота событий апвеллинга с различной продолжительностью для двух анализируемых периодов. При одинаковой средней продолжительности апвеллингов (7 сут) выявлено смещение продолжительности в большую сторону, начиная с 1970 г. (Рис. 5). В 1941-1969 гг. чаще наблюдались апвеллинги с продолжительностью 4-6 сут (57,7%), в то время как в 1970-2023 гг. продолжительность апвеллингов увеличилась до 5-8 сут (56,1%). В последние десятилетия в полтора раза выросло количество апвеллингов с продолжительностью 10 сут и более (с 11,5 до 17,8%).

Изменилась и величина понижения температуры воды во время апвеллинга. Так, в 1941-1969 и 1970-2023 гг. средние ее значения составили 4,2 и 5,3 $^{\circ}\text{C}$, максимальные 12,0 и 13,5 $^{\circ}\text{C}$, соответственно. Претерпел изменения и характер распределения повторяемости апвеллингов по понижениям темпе-

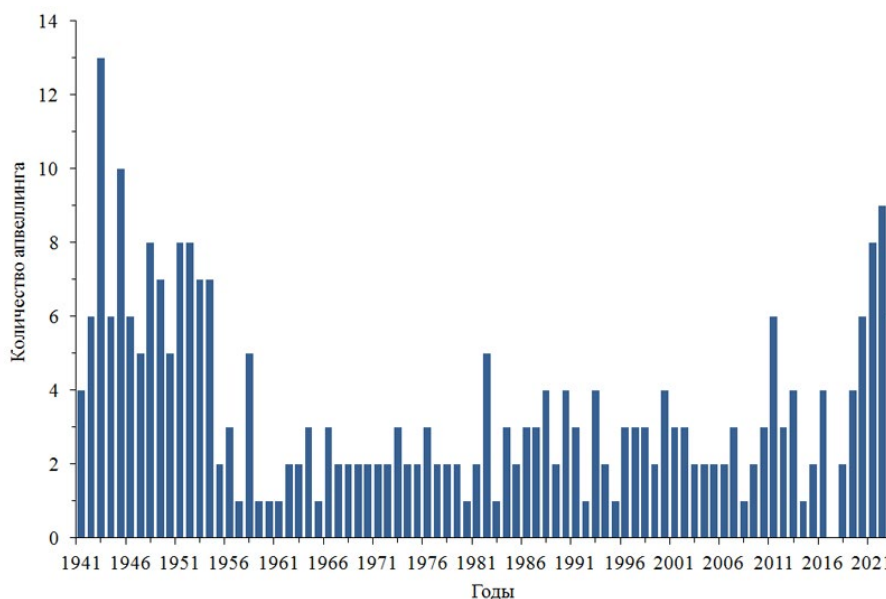


Рис.3. Количество выделенных апвеллингов в разные годы 1941-2023 гг.

ратуры (рис. 6). Если 1941-1969 гг. 60% случаев апвеллинга характеризовались понижением температуры на 1-4°C, то 1970-2023 гг. в 61% случаев апвеллинга температура воды понижалась на 3-7°C.

Анализ имеющихся данных о ветре (с 1954 г.) позволяет также оценить изменения характеристик ветра. В 1954-1969 гг. (Рис. 7) апвеллинги чаще всего развивались при ветрах N и SW направлений (64% случаев), начиная с 1970 г. – W и SW направлений (55% случаев). Средние и максимальные скорости ветра за рассматриваемые периоды несколько отличаются и составляют 6 (12) м/с в 1954-1969 и 5 (14) м/с в 1970-2023 гг.

В 1941-2023 гг. выявлено 42 полных апвеллинга. Из них 29 случаев приходятся на период с 1941 по 1969 гг., и 13 – на 1970-2023 гг. Наибольшее количество полных апвеллингов произошло в августе и сентябре – 18 и 13, соответственно, в октябре выявлено 7 случаев. В июне и июле зафиксировано по два полных апвеллинга. Один полный апвеллинг наблюдался в мае. Распределение полных апвеллингов по десятилетиям приведено на рис. 8.

Анализ имеющихся данных о ветре для 24 полных апвеллингов показал, что они развивались чаще всего (10 случаев) при SW ветре со скоростями 4-7 м/с. Четыре случая полных апвеллингов были связаны с W ветрами со скоростями 5-9 м/с.

4. Обсуждение

Таким образом, мы выделили летние апвеллинги в Ливенничном заливе, ранжировали их по продолжительности, понижению температуры воды, направлению и скорости сопутствующих ветров. Случаи полных апвеллингов рассматривались отдельно. Полученные данные были разделены на два временных периода, соответствующих наблюдаемым климатическим тенденциям.

Анализируя морфометрию залива Ливенничный, можно сделать вывод, что прибрежные апвеллинги могут развиваться под действием NNW ветров, вызывающих сгон, либо за счет экмановского переноса поверхностных вод при WSW ветрах и образовании антициклонического вихря в заливе. При развитии антициклонического вихря происходит опускание воды в его центре и компенсирующий подъем воды на периферии у берегов залива. Проанализированные данные по ветру, вызывающему апвеллинг, подтверждают высказанные предположения (Рис. 7).

Анализ распределения апвеллингов по годам показал, что до 1960 г. наблюдалось постепенное уменьшение числа апвеллингов в году. Затем до 2016 г. их среднее количество оставалось постоянным и составляло около 2,5 апвеллингов в год, а в последние 8 лет наблюдался некоторый рост (Рис. 3). Особый интерес вызвало сужение распределения повторяемости апвеллингов по месяцам и концентрация апвеллингов в августе в 1970-2023 гг. (Рис. 4). Отмечено также перераспределение апвеллингов в сторону большей продолжительности и большего

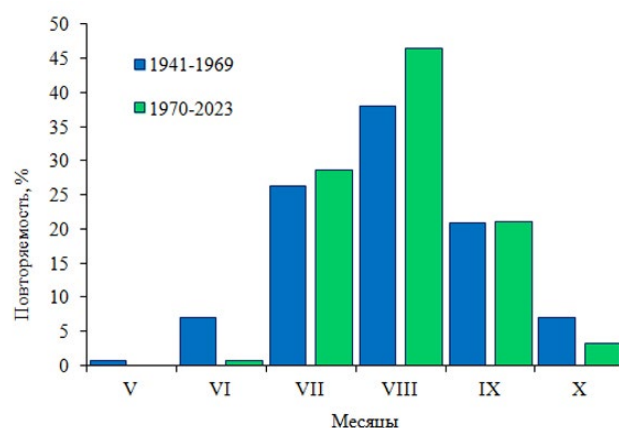


Рис.4. Повторяемость апвеллинга в отдельные месяцы в 1941-1969 и 1970-2023 гг.

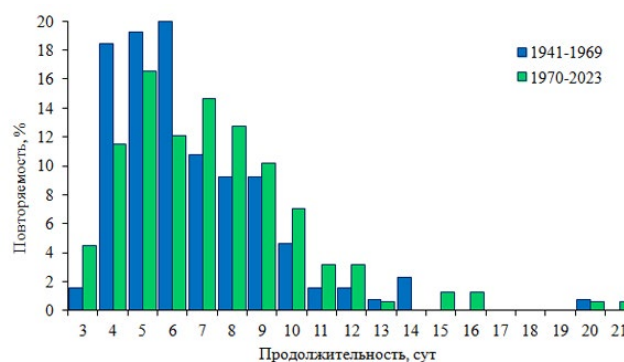


Рис.5. Повторяемость апвеллингов разной продолжительности в 1941-1969 и 1970-2023 гг.

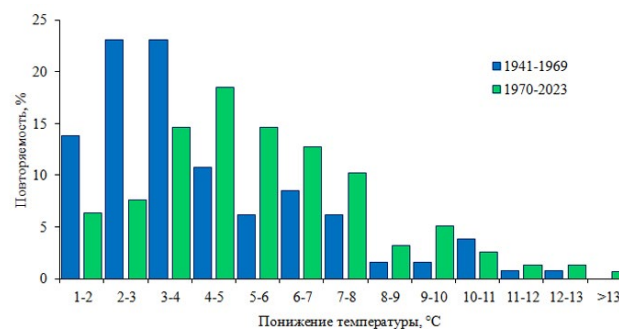


Рис.6. Повторяемость величины понижения температуры воды при апвеллинге в 1941-1969 и 1970-2023 гг.

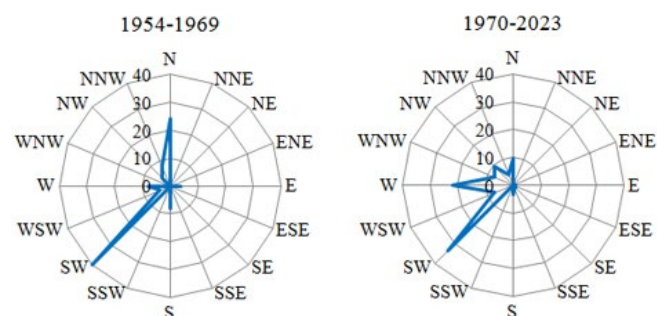


Рис.7. Повторяемость апвеллингов (%), развивающихся при ветрах определенного направления в течение двух периодов.

понижения температур после 1970 г. по сравнению с предыдущим периодом (Рис. 5, 6).

Число полных апвеллингов уменьшалось с каждым десятилетием: с 12 в 1940-х гг. до одного в 2010-х гг. После 2020 г. полные апвеллинги пока не наблюдались.

Чтобы выяснить возможные причины этих тенденций, необходимо проанализировать, как менялся ветер в эти периоды. Следует отметить, что скорости ветра в последние десятилетия стали заметно ниже, чем в середине 40-50-х годов прошлого века (Атлас ..., 1977). Сравнение средних скоростей ветра по отдельным месяцам 1959-1968 гг. и 2000-2022 гг. выявило их уменьшение в июне-августе на 0,8-1,1 м/с, в сентябре-ноябре – на 1,1-2,0 м/с. Подобные изменения наблюдаются на большей части территории России (Bulygina et al., 2013) и, вероятно, вызваны ускоренным потеплением в Арктике и уменьшением градиента температуры между экватором и полюсом, что отражается на среднеширотной атмосферной циркуляции и интенсивности ветров (Coumou et al., 2015).

Поскольку первоначальные данные о ветре были доступны только для дат апвеллинга, мы использовали известный реанализ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды в его последнем подробном выпуске ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), целью которого является объединение глобальной сети метеорологического мониторинга на основе четырехмерной вариационной системы ассимиляции ретроспективных данных, собранных в наиболее полной базе данных (с шагом сетки 0,1° и временным разрешением 1 час).

Были отобраны однородные часовые ряды ветров в Листвянке с 1950 по 2022 гг. Выполнено суточное осреднение и проанализирована временная изменчивость повторяемости ветров в летние месяцы по 8 основным направлениям с шагом 45°, а также рассчитаны средние векторные и скалярные скорости и устойчивость ветра. Поскольку в последние годы наблюдается увеличение повторяемости апвеллингов, было решено проанализировать этот период отдельно.

Изучение ветров за июль-сентябрь (когда происходит большая часть апвеллингов) показало, что среднемесячная скорость ветра постепенно возрастает с июля по сентябрь (2,2, 2,5 и 3 м/с, соответственно), повышается и устойчивость ветра (0,27, 0,33 и 0,52, соответственно). При этом происходит смена основных направлений ветров: в июле преобладают ветры W направления, в августе значительно увеличивается доля ветров NW направления, а к сентябрю они становятся доминирующими. При этом отмечена постепенная трансформация розы ветров за август. Если в 50-60-е гг. прошлого века W ветры составляли 33,5%, а северо-западные – 20,1% от общего числа ветров, то в последнее десятилетие из-за климатических изменений сроки перестройки ветров сместились, и, соответственно, изменилась повторяемость этих ветров в августе: 28,6% и 29,4% соответственно.

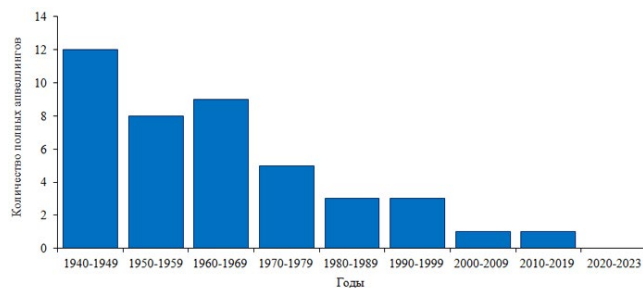


Рис.8. Количество полных апвеллингов по десятилетиям.

Изучение доли двух основных направлений ветров в августе, вызывающих апвеллинг в Лиственничном заливе (Рис. 7), выявило незначительное постепенное увеличение доли северных ветров, вызывающих сгон (с 1% в 1950-е гг. до 2% в 1960-2020-е гг. и 3% за последнее десятилетие). Повторяемость SW ветров также несколько увеличилась (с 2% в 1950-е гг. до 3,1% в последнее десятилетие), но была понижена до 1,7% в течение 1960-2010-х гг., что, вероятно, является одной из причин уменьшения количества апвеллингов в этот период (Рис.3).

Если подсчитать суммарную повторяемость N и SW ветров в августе за два периода: до 1969 г. и с 1970 г., то можно отметить, что она увеличилась с 3,6% до 5%, соответственно. Наблюдаемый рост доли ветров, вызывающих апвеллинги, совпадает с ростом числа зарегистрированных апвеллингов в августе 1970-2023 гг. по сравнению с предыдущим периодом (Рис. 4). Меньшее количество апвеллингов в июле объясняется тем, что для этого месяца характерны минимальные скорости ветра за весь летне-осенний период и минимальная устойчивость ветра. Доля апвеллингов в сентябре также меньше, несмотря на общее усиление ветра. Причиной этого является значительное увеличение устойчивости NW ветров (>0,5), а также снижение доли SW ветров до 2% (по сравнению с 4-5% в августе).

Наблюдаемое перераспределение апвеллингов в сторону большей продолжительности и с большим понижением температуры в 1970-2023 гг. по сравнению с предыдущим периодом (Рис. 5, 6) имеет общую причину. Это напрямую связано с увеличением доли апвеллингов в августе. Август характеризуется самой теплой водой литорали, и, соответственно, возникающий апвеллинг при одинаковой температуре поднимающихся вод вызовет большее понижение температуры в августе, чем в другие месяцы. И, соответственно, поступающей холодной воде из-за своей высокой теплоемкости потребуется гораздо больше времени, чтобы прогреться до своих изначально высоких значений температуры.

О влиянии параметров ветра на развитие полных апвеллингов можно судить, анализируя метеорологические данные во время полного апвеллинга 11-21 сентября 2011 г., когда параметры ветра измерялись с высокой дискретностью автоматической метеостанцией. Устойчивый ветер WNW

направления начался вечером 11 сентября и продолжался три дня. Скорость ветра достигала 17 м/с и составляла в среднем 8,7 м/с. Температура воды в начале апвеллинга была 10,6°C, к 15 сентября понизилась до 4,0°C, а после релаксации апвеллинга 21 сентября составила 6,8°C. Следует отметить, что не только сила и продолжительность ветра, но и его устойчивость необходима для развития полного апвеллинга. Например, 16-27 августа 2023 г. при максимальных наблюдаемых скоростях W ветра (средняя скорость 14 м/с, порывы до 35 м/с) температура воды упала с 19,4°C до 4°C. Однако, поскольку ветер многократно уменьшался и снова усиливался в течение 10 дней, были зарегистрированы колебания температуры воды от 4 до 10-15°C с периодом от 12 до 24 ч. образуя так называемый перемежающийся апвеллинг. Несмотря на то, что вода из гипolimниона выходила на поверхность, неустойчивые ветры не позволяли вовлечь в это движение большие водные массы, и при малейшем ослаблении ветра вода немедленно заменялась теплой поверхностной водой. Поэтому мы не отнесли данный случай к полному апвеллингу.

Выявленные закономерности изменения условий формирования и существования апвеллингов в Лиственничном заливе позволяют высказать следующие предположения. С одной стороны, уменьшение количества полных апвеллингов должно повлиять на объем транспорта биогенов из гипolimниона в литораль. С другой стороны, уменьшение повторяемости апвеллингов должно сопровождаться повышением средней поверхностной температуры в прибрежной зоне в летний сезон, что увеличивает вертикальные градиенты плотности в верхних слоях и может вызвать эвтрофикацию литорали. Как следствие, наблюдаемый в последние годы резкий всплеск роста водорослей *Spirogyra* в заливе Лиственничный (Кравцова и др., 2012; Тимошкин и др., 2014; Timoshkin et al., 2018) может быть связан с комплексным влиянием возрастающей антропогенной нагрузки (и богатого поступления биогенов со сточными водами) и климатических изменений (Шимараев и Троицкая, 2018). Последние, в свою очередь, оказывают двоякое влияние на повышение температуры литорали: как за счет большего потепления из-за более высоких температур воздуха, так и за счет менее частого водообмена (и, как следствие, меньшего охлаждения) с глубинными водами оз. Байкал. Таким образом, могут сформироваться более благоприятные физические и трофические условия для развития водорослей, не характерных для литорали Байкала.

5. Выводы

В итоге представленной работы были проанализированы данные о температуре прибрежной воды и ветрах в заливе Лиственничный. Выявлены летние прибрежные апвеллинги, ранжированы по продолжительности, понижению температуры воды, направлению и силе сопутствующих ветров. Полученные данные были разделены на два

периода, соответствующие наблюдаемым климатическим тенденциям.

Установлено, что основные ветры, вызывающие апвеллинг, имеют N и SW направления, что подтверждается морфометрией залива. Анализ распределения апвеллингов по годам показал, что до 1960 г. наблюдалось постепенное уменьшение числа апвеллингов в год. С 1960 по 2016 год среднее количество событий было примерно постоянным и составляло около 2,5 апвеллингов в год и в последние 8 лет наблюдается их небольшое увеличение. Максимальное количество апвеллингов (13) отмечено в 1943 г. Продолжительность апвеллингов в среднем составляет 7 сут, максимальная – 21 сут (в 1979 г.). Температура воды обычно падает примерно на 5°C, максимальный перепад составил 13,5°C в 2016 г.

Обнаружено увеличение доли апвеллингов в августе по сравнению с другими месяцами в период 1970-2023 гг. Выявлено также перераспределение апвеллингов в сторону их большей продолжительности и больших перепадов температуры после 1970 г. по сравнению с предыдущим периодом. Причиной этих изменений стал глобальный ход снижения ветровой активности, связанный с наблюдаемыми климатическими изменениями, а также особое перераспределение доли N и SW ветров в заливе в период исследований.

Число полных апвеллингов уменьшалось с каждым десятилетием: с 12 в 1940-х гг. до всего одного в 2010-х. После 2020 года полные апвеллинги пока не наблюдались. Описаны и сопоставлены два случая полного и перемежающегося апвеллингов. Высказано предположение о возможном экологическом воздействии на залив Лиственничный из-за комбинированного воздействия увеличения антропогенной нагрузки и уменьшения частоты апвеллингов.

Благодарности

Авторы благодарят всех сотрудников Лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИИ СО РАН за участие в экспедиционных работах и сборе данных, а также за продуктивное обсуждение результатов исследований. Особая благодарность Руслану Гнатовскому за подготовку данных ERA5-Land для анализа.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ЛИИ СО РАН (0279-2021-0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

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(21):1-19. DOI: [10.3390/w16010021](https://doi.org/10.3390/w16010021)

- Bell G.L., Eadie B.J. 1983. Variations in the distribution of suspended particles during an upwelling event in Lake Michigan in 1980. *Journal of Great Lakes Research* 9(4):559-567.
- Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. 2013. Changes in the wind regime over Russia in the last decades. In: *Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A. I. Voeikov*, pp. 156-172.
- Corman J.R., McIntyre P.B., Kuboja B. et al. 2010. Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa. *Limnology and Oceanography* 55(1):214-224. DOI: [10.4319/lo.2010.55.1.0214](https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.1.0214)
- Coumou D., Lehmann J., Beckmann J. 2015. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Science* 348:324-327. DOI: [10.1126/science.1261768](https://doi.org/10.1126/science.1261768)
- 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* 14:1-12. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)
- Heim B., Oberhaensli H., Fietz S. et al. 2005. Variation in Lake Baikal's phytoplankton distribution and fluvial input assessed by SeaWiFS satellite data. *Global and Planet Change* 46: 9-27. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2004.11.011](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.11.011)
- Katz S.L., Hampton S.E., Izmet'eva L.R. et al. 2011. Influence of long-distance climate teleconnection on seasonality of water temperature in the World's largest lake - Lake Baikal, Siberia. *PLoS ONE* 6(2):e14688. DOI: [10.1371/journal.pone.0014688](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014688)
- Kouraev A.V., Semovski S.V., Shimaraev M.N. et al. 2007. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: Relation to air temperature, dynamical, and other factors. *Limnology and Oceanography* 52(3):1268-1286. DOI: [10.4319/lo.2007.52.3.1268](https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.3.1268)
- Livingstone D.M. 1999. Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44(6):1486-1497. DOI: [10.4319/lo.1999.44.6.1486](https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.6.1486)
- Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J. et al. 2000. Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289:1743-1746. DOI: [10.1126/science.289.5485.1743](https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743)
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data* 13:4349-4383. DOI: [10.5194/essd-13-4349-2021](https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021)
- Plattner S., Mason D.M., Leshkevich G.A. et al. 2006. Classifying and forecasting coastal upwellings in Lake Michigan using satellite derived temperature images and buoy data. *Journal of Great Lakes Research* 32:63-76. DOI: [10.3394/0380-1330\(2006\)32\[63:CAFUII\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[63:CAFUII]2.0.CO;2)
- Semovski S.V., Shimaraev M.N., Minko N.P. et al. 2001. Use of satellite observations to study thermal fronts of Lake Baikal. *Earth Observation and Remote Sensing* 16(5):773-787.
- Sharma S., Richardson D.C., Woolway R.I. et al. 2021. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in northern hemisphere lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(10):1-12. DOI: [10.1029/2021JG006348](https://doi.org/10.1029/2021JG006348)
- Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N. et al. 2018. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *Journal of Great Lakes Research* 44(2):230-244. DOI: [10.1016/j.jglr.2018.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008)
- Todd M.C., Mackay A.W. 2003. Large-scale climate controls on Lake Baikal ice cover. *Journal of Climate* 16:3186-3199. DOI: [10.1175/1520-0442\(2003\)016<3186:LCCOLB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3186:LCCOLB>2.0.CO;2)
- Troitskaya E., Budnev N., Shimaraev M. 2022. Changes in the heat content of water column in the slope area of the southern basin of Lake Baikal in the 21st Century. *Water* 14:348. DOI: [10.3390/w14030348](https://doi.org/10.3390/w14030348)
- Атлас волнения и ветра озера Байкал: Справочное и навигационное пособие. 1977. Ленинград: Гидрометеоздат.
- Афанасьева Э.Л. 1977. Биология байкальской эпишуры. Новосибирск: Наука.
- Бояринов П.М., Петров М.П. 1991. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука.
- Верболов В.И., Гранин Н.Г., Жданов А.А. и др. 1992. Оценка гидрофизического состояния деятельного слоя по материалам полигонных наблюдений на Байкале. *Водные ресурсы* (5):74-86.
- Верещагин Г.Ю. 1927. Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритуя. *Труды Комиссии по изучению оз. Байкал* 2:77-138.
- Кожов М.М. 1962. Биология озера Байкал. М: Изд-во АН СССР.
- Кожов М.М., Помазкова Г.И., Устюжин Ю.А. 1970. Распределение зоопланктона в Южном Байкале. *Известия Биолого-географического института при Иркутском университете*. 23(1):87-94.
- Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В. и др. 2012. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия. *Доклады Академии наук (Общая биология)* 447(2):227-229.
- Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В. и др. 2012. Об апвеллингах в озере Байкал. *Доклады Академии наук (Науки о земле)* 442(5):696-700.
- Шимараев М.Н., Троицкая Е.С. 2018. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период. *География и природные ресурсы* (4):95-104. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(95-104\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(95-104))
- Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А. и др. 2014. Массовое развитие зелёных нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) в прибрежной зоне Южного Байкала. *Гидробиологический журнал* (5):15-26.