

Formation features of Lake Baikal hydrometeorological regime in the modern period

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Sinyukovich V.N.^{1*}, Latysheva I.V.², Vologzhina S.J.²,
Loshchenko K.A.², Makukhin V.L.^{1,2}

¹Limnological Institute 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. We analyzed the main features of climate fluctuations near Lake Baikal and water regime components between 1980 and 2023. The analysis indicated climate warming with the highest rates of air temperature rise during the cold season of the year and an increase in climate aridity or a decrease in annual and monthly atmospheric precipitation. During the Southern Hemisphere cyclones and the development of convective or orographic clouds, the spatial heterogeneity of summer atmospheric precipitation increased. In winter, under the dominant influence of the Asian monsoon anticyclone, these differences were minimal. Correlating with climate change, the ratio between the lake's water balance components transformed, determining the features of seasonal and interannual fluctuations in its water level. The inflow of surface waters to the lake and the runoff from it decreased, while the evaporation from the surface of the water body, on the contrary, increased. The heating of the lake's water masses increased, especially at its northern end distinguished by the lower wind activity. Due to the later freezing of the lake and earlier ice breakup (up to 20 days), the ice cover period reduced. We observed climate change in circulation factors at Lake Baikal, including an increase in the activity of migratory cyclogenesis in the cold season of the year and upper-level anticyclogenesis in the warm season, where the frequency of blocking processes also increased. Keywords: air temperature, precipitation, inflow, evaporation, water level.

Keywords: air temperature, precipitation, inflow, evaporation, water level

For citation: Sinyukovich V.N., Latysheva I.V., Vologzhina S.J., Loshchenko K.A., Makukhin V.L. Formation features of Lake Baikal hydrometeorological regime in the modern period // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 611-621. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-611

1. Introduction

An increase in the recurrence of abnormal drought periods and floods characterize the current global warming that is the most intense in the Asian part of Russia (Third evaluation..., 2022). Warming enhances the threat of eutrophication of world water resources (Sinha et al., 2017) and is accompanied by the shrinkage of 53% of lakes worldwide, including humid regions of the planet (Fangfang et al., 2023). In East Siberia and Lake Baikal, where rates of air temperature rise are especially high (Shimaraev et al., 2002; Sutyryna, 2019; Third evaluation..., 2022), the alteration of thermal regime and lake's water balance components increases the risks of disturbances to the normal functioning of the water body ecosystem and requires constant hydrometeorological monitor-

ing. Lake ecosystems with high species diversity and endemics are particularly vulnerable to climate change (Semenova et al., 2024).

Climate change and hydropower development of Lake Baikal implemented since 1956 cause a restructuring of the lake water level regime, affecting both the use of its water resources and the ecological condition in the water body. The results of the assessment of the main meteorological parameters in the Baikal region for the past climatic period (Latysheva et al., 2025) indicated the transformation of circulation factors of climate change in the region, including the trend to increase the contribution of migratory cyclogenesis in the cold season (October-March) and upper-level anticyclogenesis in the warm season (April-May). The frequency of blocking processes increased in the summer months,

*Corresponding author.

E-mail address: sin@lin.irk.ru (V.N. Sinyukovich)

Received: July 31, 2025; **Accepted:** August 15, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



preventing the formation of Mongolian cyclones in the polar upper-level frontal zone, while the probability of more intense summer rainfalls amid higher daytime temperatures also increased (Vologzhina et al., 2024).

This study aims at compiling a description of the current hydrometeorological regime of Lake Baikal and its formation features based on the observation data from the coastal weather stations and materials concerning the lake's water regime, using the information about climatic circulation factors.

2. Study object and methods

Lake Baikal was a study object where the formation of water and climate regimes is affected by a close interaction of large-scale and regional atmospheric processes amid the heterogenous relief manifested in the development of mountain and valley breezes, local processes of cyclo- and anticyclogenesis, orographic clouds on the windward slopes of the mountains, and the drying effect of descending airflows on the leeward slopes.

The study of the climate features of Lake Baikal was based on the statistical processing of the annual and monthly values of air temperature and precipitation for 1980-2023 according to the data from 13 Rosgidromet (Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring) weather stations (Patrony, Kultuk, Baikalsk, Khamar-Daban, Bolshoye Goloustnoye, Elantsy, Barguzinsky Nature Reserve, Bolshoy Ushkany Island, Sarma, Khuzhir, Solnechnaya, Tompa, and Nizhneangarsk) at altitudes ranging from 459 m (Bolshoy Ushkany Island) to 1442 m (Khamar-Daban) above sea level.

The Rosgidromet data on daily mean water levels of Lake Baikal and the information from the Irkutsk Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring about the lake's water balance components were used to assess the water regime characteristics.

Synoptic features of the formation of individual dry and high-water periods were analyzed via assessment of the dynamics of atmospheric processes near the Earth's surface and at the levels of isobaric surfaces, such as AT-850 hPa (1.5 km), AT-700 hPa (3 km), AT-500 hPa (5 km), and AT-300 hPa (9 km), reflecting the conditions of surface and upper-level cyclo- and frontogenesis.

3. Results and discussion

The climate of Lake Baikal and its coast has marine features and is characterized by high intraseasonal and spatial variability due to the combination of orographic, hydrological, circulation, and climatic conditions. During the study period, the mean annual air temperature was positive at most of the observed weather stations, with a maximum value of 0.9 °C at the southern end of the lake (Baikalsk). Negative mean annual air temperatures were typical of the weather stations at the northern end of the lake, such as Barguzinsky Nature Reserve (−2.7 °C) and Bolshoy Ushkany Island (−1.9 °C), as well as at the high-mountain Khamar-Daban station (−1.9 °C).

In the annual distribution of air temperatures, July was the warmest month at most of the stations. In the northern basin of Lake Baikal, it was shifted to August. As a rule, January was the coldest month of the year, except for Baikalsk and Bolshoy Ushkany Island, where this extreme occurred in February. The absolute maximum of air temperature during the study period varied from 23.3 °C (Bolshoy Ushkany Island) to 30.5 °C (Elantsy), and the absolute minimum—from −27.4 °C (Bolshoy Ushkany Island) to −38.3 °C (Barguzinsky Nature Reserve). Annual temperature ranged from 29.5 °C at the high-mountain Khamar-Daban station to 37.3 °C at the Elantsy station.

Mean annual precipitation for the study years varied from 1381 mm at the high-mountain Khamar-Daban station to 189 mm in Sarma (Fig. 1). Such an abnormally high precipitation at the Khamar-Daban weather station was due to its location not only at a great height but also on the windward slope of the ridge and along the route of moist air masses arriving with the northwesterly wind through the source of the Angara River.

During the year, the maximum amount of atmospheric moisture precipitated mainly in July, except for Sarma, where the annual maximum usually precipitates in August. At the Khamar-Daban station, the maximum precipitation reached 266 mm in July. At the foot of the ridge (Baikalsk), precipitation was also high and amounted to 167 mm. The minimum monthly precipitation most often occurred in February, varying from 22 (Sarma, Bolshoye Goloustnoye, Bolshoy Ushkany Island, and Elantsy) to 32 mm (Khamar-Daban).

The main proportion of annual precipitation fell in summer, varying from 38 (Barguzinsky Nature Reserve) to 67% (Elantsy). The contribution of the autumn months ranged from 16 (Bolshoye Goloustnoye) to 34 % (Barguzinsky Nature Reserve), and that of the winter months—from 4 (at most Baikal stations) to 14% (Barguzinsky Nature Reserve).

The annual precipitation amplitude reached the highest values in Khamar-Daban (234 mm), Baikalsk (153 mm), Kultuk (106 mm), and Patrony (101 mm), and the lowest values—in Sarma (47 mm), Khuzhir (53 mm), and Bolshoye Goloustnoye (54 mm).

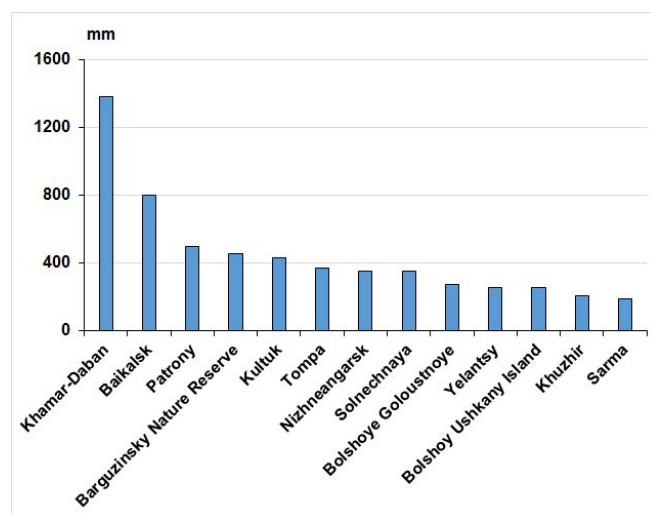


Fig.1. The average annual amount of precipitation at weather stations.

During the study period, climate warming rates at all investigated stations averaged 0.27-0.35 °C/10 years and accompanied by a shift from negative to positive mean annual air temperatures (Table 1). The most significant rise in the mean annual air temperatures has been observed in recent years (2020-2023).

In January and February, the period from 1990 to 1999 was the warmest decade, and that from 1980 to 1989—the coldest decade. The highest warming rate was typical of March (up to 1.2 °C/10 years), and it was the lowest in May (~0.2 °C/10 years). In summer and autumn, as well as in December, mean monthly air temperatures rose at an average rate of 0.3-0.5 °C/10 years.

Warming in the study years was accompanied by a slight decrease in the mean annual precipitation (Fig. 2) at most stations, mainly due to recent years.

The maximum mean annual precipitation was recorded in 1990-2009, and the minimum—in 2010-2023. In 1980-1989 and 2010-2019, the maximum precipitation was observed in January, while in 2000-2009 and 2010-2019, it was observed in February and spring months. The rainiest summer months were in 1980-1989 and 2000-2009, and the autumn months—in 1990-1999 and 2000-2009.

Along with the characterized air temperature fluctuations and humidity conditions, the formation of water balance components in Lake Baikal, its ice and thermal regime, and level that determine the functioning of the entire ecosystem of the lake underwent a certain transformation. At the beginning of the study period, the humidity in the Baikal basin was reduced, causing a low inflow of river waters into the lake (Fig. 3) and leading to an abnormal decrease in its water level (down to 455.27 m a.s.l. in April 1982). Overall, long-term changes in the inflow were rather well correlated with fluctuations in the lake's water level, and thereby with the Angara River runoff. During the study period, the annual inflow to the lake varied from 42.5 (2017) to 93.1 (2021) km³, with an average of 62.8 km³. The observed extremes are absolute for all years since the beginning of the damming of the lake by the Irkutsk Hydroelectric Power Station, and furthermore they have occurred in the past 10 years.

Table 1. Average annual air temperatures (°C) by decades

Station/years	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	2020-2023
Patrony	-1.0	0.1	0.1	0.3	0.9
Kultuk	-0.2	0.7	0.7	0.7	1.1
Baikalsk	0.5	1.2	0.9	0.9	1.3
Khamar-Daban	-2.6	-1.7	-1.7	-1.8	-1.5
Bolshoye Goloustnoye	-0.3	0.7	0.6	0.8	1.1
Yelantsy	-0.4	0.2	0.3	0.6	0.8
Sarma	-0.1	0.6	0.4	0.9	1.1
Khuzhir	-0.4	0.0	0.3	0.7	1.0
Bolshoy Ushkany Island	-1.0	-0.3	-0.6	-0.1	0.1
Solnechnaya	-1.4	-0.6	-0.7	-0.3	-0.4
Barguzinsky Nature Reserve	-3.3	-2.3	-2.8	-2.6	-2.0
Tompa	-2.9	-2.0	-2.0	-1.9	-1.4
Nizhneangarsk	-2.5	-1.5	-1.8	-1.1	-1.0

The runoff from the lake between 1980 and 2023 varied within a close range: from 40.6 km³ in 2016 to 80.6 km³ in 2021, with an average of 57.8 km³. Despite the runoff artificial regulation, its connection with the inflow remains rather close, and the correlation coefficient is 0.68 (0.88 under natural conditions).

The mean annual precipitation that fell on the water surface of Lake Baikal in these years was 12.3 km³, ranging from 9.3 to 16.1 km³. At the same time, despite periodic long periods of drought and negative trends at weather stations, there is little evidence of a long-term decline in the amount of precipitation on the water area of the lake.

Unlike precipitation, evaporation from the lake's water surface increased significantly with warming. In the study years, it averaged 15.5 km³ per year with fluctuations from 11.0 to 19.4 km³ per year.

Notably, long-term fluctuations in inflow and runoff were characterized by a weak downward trend at a rate of ~1.3-1.5 km³/10 years. On the contrary, evaporation was characterized by an upward trend at an average rate of 0.5 km³/10 years.

Fluctuations in the water level of Lake Baikal in 1980-2023 showed extremely low values during the initial period and in 2014-2017, mainly following the changes in the inflow. The above-mentioned minimum water level in 1982 is a record low for all years of lake regulation. The maximum water level of 457.42 m a.s.l. in 1988 is also a record. The lake's water levels beyond standard values (456-457 m) during low-water or high-water periods complicates the use of its water resources.

Air temperature rise at Lake Baikal has affected its thermal regime and the duration of ice phenomena. During the 20th century, the ice cover period has reduced by 18 days (Shimaraev et al., 2002) because of the later freezing of the lake (by 11 days) and earlier ice breakup (by 7 days). A more significant warming in November and December during the freeze-up of the lake (by 1.6 °C) than in April and May during ice breakup (by 0.9 °C) explains such "asymmetry" of shifts. To date, the shift in Lake Baikal freezing and breakup timescales has increased insignificantly owing

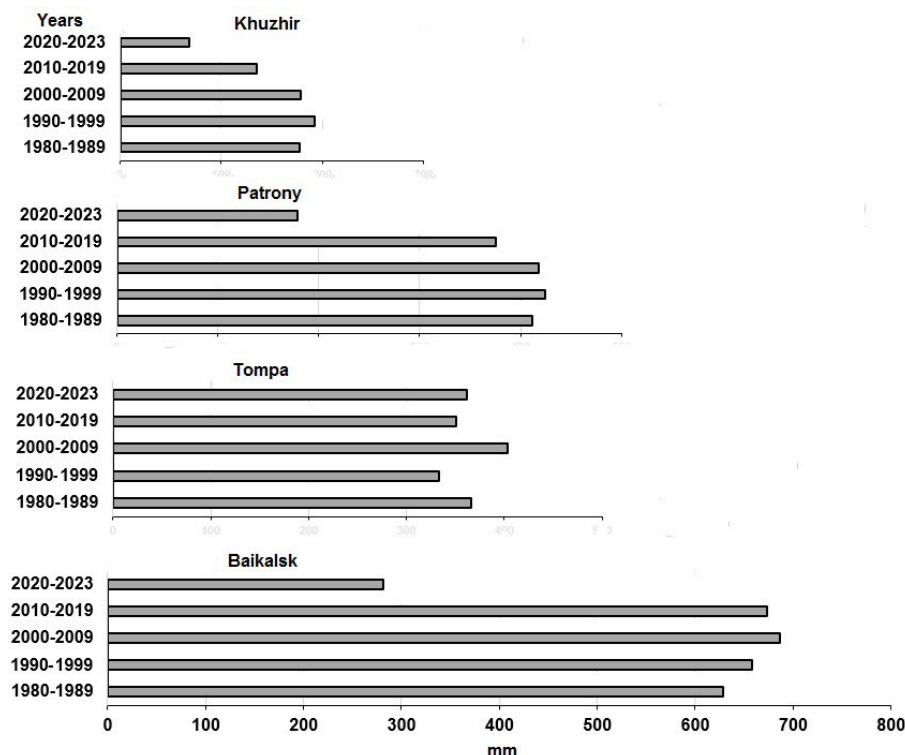


Fig.2. Average annual precipitation at individual stations by decades.

to the decrease in the warming rates in the 1990s. The heating of the lake's water column caused by global warming differs throughout the basins. According to (Shimaraev and Troitskaya, 2018), the surface water temperature rise in the southern basin of Lake Baikal since 1970 averages $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$, whereas in the central basin it reaches $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$, and in the northern basin— $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$. Greater heating of the surface water layer in the northern basin is due to lower wind activity in this part of the lake. Notably,

in 1994-2016, the trend in summer water temperature rise in the northern basin of Lake Baikal was $\sim 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$.

Specific changes in the atmospheric circulation processes determine the indicated features of the fluctuations in the components of the hydrometeorological regime. Among them, the trends of increasing contribution of migratory cyclogenesis in the cold season of the year (October-March) and the upper-level anticyclonogenesis in the warm season (April-May) are the most

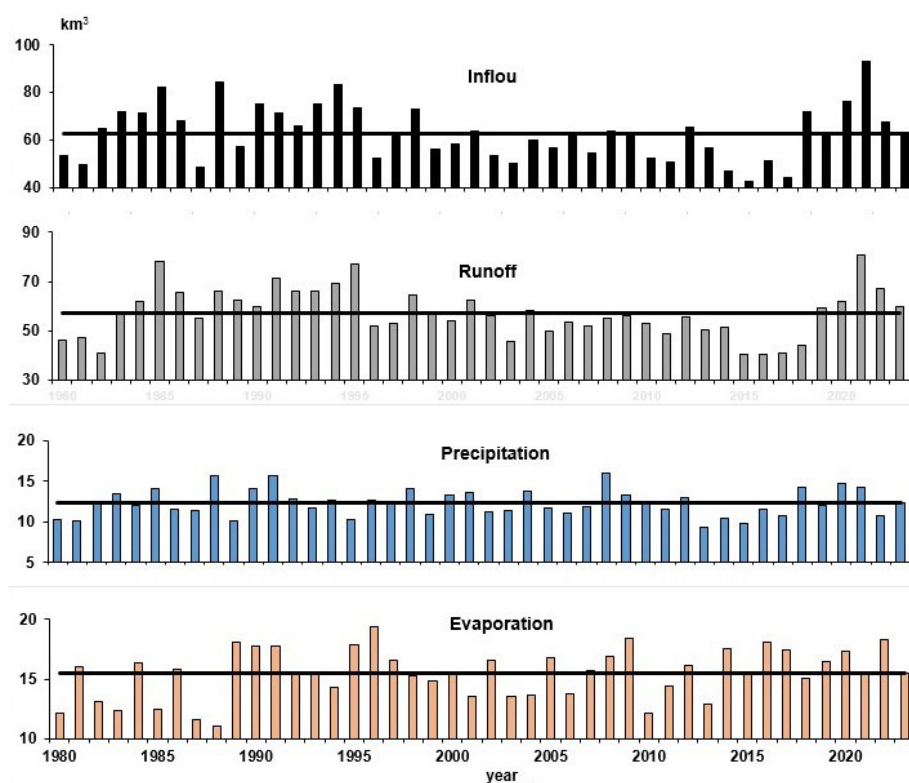


Fig.3. Dynamics of fluctuations of water balance elements. Straight line – average value.

obvious for Siberia and Lake Baikal in the past decades. In the winter months, the possibility of Mongolian and Atlantic cyclones with intense and often prolonged heat and cold waves has increased in the south of the Baikal region, enhancing the contrast of weather conditions in the region. The higher frequency of blocking processes in the summer months increasingly prevents the formation of Mongolian cyclones in the polar upper-level frontal zone, where horizontal temperature contrasts weaken thanks to heat advection. Consequently, baroclinity decreases throughout most of the tropospheric thickness as one of the main factors of formation and development of extratropical cyclones. At the same time, due to higher daytime temperatures in summer, more intense rainfall is highly likely (Vologzhina et al., 2024).

4. Conclusion

Current climate features of Lake Baikal based on the data from 13 weather stations around the lake clearly indicate a warming climate with the highest rates of temperature rise during the cold season of the year, especially in March (up to 1.2 °C/10 years). At the same time, annual and monthly atmospheric precipitation has reduced in recent years.

Correlating with the precipitation regime and temperature conditions, the variability of surface water inflow to the lake has increased, particularly in the recent decade, including the absolute maximum and minimum inflow values for all time since the damming of the lake by the Irkutsk Hydroelectric Power Station. During the study years, the inflow of surface waters to the lake and the runoff from it slightly decreased, while the evaporation from the surface of the water body, on the contrary, increased.

The water-level regime of Lake Baikal in 1980-2023 mainly corresponded to changes in the inflow and, in some years, was beyond the established range (456-457 m).

Together with air temperature, heating of the lake's water masses increased, especially at its northern end distinguished by the lower wind activity. The ice cover period has reduced due to later freezing of the lake and earlier ice breakup (up to 20 days).

The indicated features of the fluctuations in the components of the hydrometeorological regime are obviously affected by corresponding changes in the circulation climate-forming factors at Lake Baikal. Among them, the trends of increasing contribution of migratory cyclogenesis in the cold season of the year (October-March) and upper-level anticyclogenesis in the warm season (April-May) are the most obvious in the past decades. The frequency of blocking processes increased in the summer months, determining prolonged dry periods and more intense daily maximums of heavy rainfall.

If the observed trends in the atmospheric heat and moisture near Lake Baikal maintain, the alteration of the water regime, as well as ice and thermal regime, will continue, changing the rates of various intrabasin processes and habitat conditions of Baikal biota.

Acknowledgements

The study is carried out within the State Assignment of LIN SB RAS No. 0279-2021-0004.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Fangfang Y., Livneh B., Rajagopalan B. et al. 2023. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Sciens* 380 (6646): 743–749. DOI: [10.1126/science.abo2812](https://doi.org/10.1126/science.abo2812)
- Latysheva I.V., Loshchenko K.A., Vologzhina S.Zh. et al. 2025. Regional features of the modern climatic period in the Irkutsk region. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o Zemle"* [Bulletin of the Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"] 51: 19–36. DOI: [10.26516/2073-3402.2025.51.19](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.19) (in Russian)
- Semenova E.I., Soroka A.O., Nedbaev I.S. 2024. Spatial differentiation of forests of the constituent entities of the Russian Federation based on the author's methodology for assessing the level of adaptation to climate change. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering journal] 1 (53): 16–34. DOI: [10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2) (in Russian)
- Shimaraev M.N., Kuimova L.N., Sinyukovich V.N. et al. 2002. Climate and hydrological processes in the lake basin Baikal in the twentieth century. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology] 3: 71–78. (in Russian)
- Shimaraev M.N., Troitskaya E.S. 2018. Trends in the change in the temperature of the upper water layer in the coastal areas of Lake Baikal in the modern period. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources] 4: 95–104. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(95-104\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(95-104)) (in Russian)
- Sinha E., Michalak A.M., Balaji V. 2017. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science* 357: 405–408. DOI: [10.1126/science.aan2409](https://doi.org/10.1126/science.aan2409)
- Sutyryna E.N. 2019. Modern trends in changing climatic conditions within the catchment area of Lake Baikal. *Vestnik ZabGU* [Bulletin of ZabSU] 25 (5): 49–55. DOI: [10.21209/2227924520192554955](https://doi.org/10.21209/2227924520192554955) (in Russian)
- Third assessment report of climate change and its impacts on the territory of the Russian Federation. 2022. Saint Petersburg: High technology. (in Russian)
- Vologzhina S.Zh., Gekova A.V., Latysheva I.V. et al. 2024. Spatio-temporal and geoecological features of the temperature regime in the Irkutsk region in the modern climatic period. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science] 11: 22–29. DOI: [10.17513/use.38328](https://doi.org/10.17513/use.38328) (in Russian)

Особенности формирования гидрометеорологического режима озера Байкал в современный период



Синюкович В.Н.^{1*}, Латышева И.В.², Вологжина С.Ж.²,
Лощенко К.А.², Макухин В.Л.^{1,2}

¹ Лимнологический институт, Сибирское отделение Российской академии наук, 2 Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

² Иркутский государственный университет, Карла Маркса, 1, Иркутск, 664003, Россия

АННОТАЦИЯ. Проанализированы основные особенности колебаний климата в районе оз. Байкал и элементов водного режима озера за 1980-2023 гг. Отмечено потепление климата с наиболее высокими темпами роста температур воздуха в холодный период года, а также усиление его засушливости, или уменьшение годовых и месячных сумм атмосферных осадков. В периоды выхода южных циклонов и развития термической и орографической облачности наблюдается рост пространственной неоднородности выпадения летних атмосферных осадков. В зимнее время при господствующем влиянии Азиатского антициклона данные различия становятся минимальными. В соответствии с климатическими изменениями трансформируется соотношение между компонентами водного баланса озера, определяя особенности сезонных и межгодовых колебаний его уровня. Для притока поверхностных вод в озеро и стока из него за рассматриваемые годы характерно некоторое снижение, в то время как испарение с поверхности водоема, наоборот, увеличилось. Повысился прогрев водных масс озера, в особенности его северной оконечности, отличающейся более низкой ветровой активностью. За счет более поздних сроков замерзания озера и более раннего освобождения ото льда до 20 дней сократился период ледостава. Отмечены климатические изменения циркуляционных факторов на Байкале, в том числе рост активности подвижного циклогенеза в холодный период года и высотного антициклогенеза – в теплый, где также возросла повторяемость блокирующих процессов.

Ключевые слова: температура воздуха, атмосферные осадки, речной приток, испарение, уровень

Для цитирования: Синюкович В.Н., Латышева И.В., Вологжина С.Ж., Лощенко К.А., Макухин В.Л. Особенности формирования гидрометеорологического режима озера Байкал в современный период // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 611-621. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-611

1. Введение

Текущее глобальное потепление, которое наиболее интенсивно происходит в азиатской части России (Третий оценочный..., 2022), характеризуется ростом повторяемости аномальных засушливых периодов и наводнений. Потепление усиливает угрозу эвтрофикации мировых водных ресурсов (Sinha et al., 2017) и сопровождается усыханием 53 % озер по всему миру, в том числе и во влажных регионах планеты (Fangfang et al., 2023). В Восточной Сибири и на Байкале, где темпы роста температуры воздуха особенно велики (Шимараев и др., 2002; Сутырина, 2019; Третий оценочный..., 2022), перестройка термического режима и элементов водного баланса озера повышают риски нару-

шения условий нормального функционирования экосистемы водоема и требуют постоянного гидрометеорологического мониторинга. Именно озерные экосистемы с большим видовым разнообразием и эндемиками отличаются высокой уязвимостью к изменениям климата (Семенова и др., 2024).

Меняющиеся климатические условия и гидроэнергетическое регулирование Байкала, осуществляемое с 1956 г., сопровождаются перестройкой уровня режима озера, осложняя как проблемы использования его водных ресурсов, так и экологическую ситуацию на водоеме. Результаты оценки основных метеорологических параметров на территории Прибайкалья за последний климатический период (Латышева и др., 2025) указывают и на трансформацию циркуляционных факторов измене-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: sin@lin.irk.ru (В.Н. Синюкович)

Поступила: 31 июля 2025; **Принята:** 15 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



ний климата в регионе, в том числе на тенденцию усиления вклада подвижного циклогенеза в холодный период года (октябрь-март) и высотного антициклогенеза в теплый (апрель-май). Отмечается рост повторяемости блокирующих процессов в летние месяцы, препятствующих образованию монгольских циклонов на полярной ветви высотной фронтальной зоны, при одновременном увеличении вероятности выпадения более интенсивных летних ливневых осадков на фоне более высоких дневных температур (Вологжина и др., 2024).

Целью настоящего исследования является составление характеристики современного гидрометеорологического режима оз. Байкал и особенностей его формирования на основе данных наблюдений прибрежных метеорологических станций и материалов по водному режиму озера, с привлечением сведений о климатических циркуляционных факторах.

2. Объект и методы исследования

Объект исследования – озеро Байкал, где в формировании водного и климатического режимов сказывается тесное взаимодействие крупномасштабных и региональных атмосферных процессов на фоне неоднородного рельефа, проявляющегося в развитии горно-долинной и бризовой циркуляции, локальных процессов цикло- и антициклогенеза, орографических форм облаков на наветренных склонах гор и иссушающего эффекта нисходящих потоков на подветренных склонах.

Изучение климатических особенностей озера Байкал осуществлялось на основе статистической обработки годовых и среднемесячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков за 1980-2023 гг. по данным 13 метеорологических станций Росгидромета (Патроны, Култук, Байкальск, Хамар-Дабан, Большое Голоустное, Еланцы, Баргузинский заповедник, Большой Ушканий остров, Сарма, Хужир, Солнечная, Томпа, Нижнеангарск), расположенных на высотах от 459 (Большой Ушканий остров) до 1442 м (Хамар-Дабан) над уровнем моря.

Для оценки характеристик водного режима использованы данные Росгидромета по ежедневным средним уровням воды оз. Байкал, а также сведения Иркутского УГМС по элементам водного баланса озера.

Синоптические особенности формирования отдельных засушливых и многоводных периодов анализировались по оценке динамики атмосферных процессов у поверхности Земли и на уровнях изобарических поверхностей АТ-850 гПа (1.5 км), АТ-700 гПа (3 км), АТ-500 гПа (5 км) и АТ-300 гПа (9 км), отражающих условия приземного и высотного цикло- и фронтогенеза.

3. Результаты и обсуждение

Климат озера Байкал и его побережья имеет черты морского и характеризуется высокой внутрисезонной и пространственной изменчивостью,

обусловленной совокупностью сочетаний орографических, гидрологических, циркуляционных и климатических условий. В исследуемый период среднегодовая температура воздуха на большинстве рассматриваемых метеорологических станций была положительной с максимальным значением 0.9 °C на южной оконечности озера (Байкальск). Отрицательные среднегодовые температуры воздуха характерны для метеостанций северной оконечности – Баргузинский заповедник (–2.7 °C), Большой Ушканий остров (–1.9 °C), а также высокогорной станции Хамар-Дабан (–1.9 °C).

В годовом распределении температур воздуха самым теплым месяцем на большинстве рассматриваемых станций является июль. На северном Байкале он смещен на август. Самым холодным месяцем года, как правило, является январь, за исключением Байкальска и Большого Ушканьего острова, где данный экстремум приходится на февраль. Абсолютный максимум температуры воздуха в рассматриваемый период варьирует от 23.3 °C (Большой Ушканий остров) до 30.5 °C (Еланцы), а абсолютный минимум от –27.4 °C (Большой Ушканий остров) до –38.3 °C (Баргузинский Заповедник). Годовая амплитуда температуры изменяется в пределах от 29.5 °C на высокогорной станции Хамар-Дабан до 37.3 °C на станции Еланцы.

Среднегодовое количество атмосферных осадков за рассматриваемые годы варьирует от 1381 мм на высокогорной станции Хамар-Дабан до 189 мм в Сарме (Рис. 1). Столь anomalно высокое выпадение осадков на метеостанции Хамар-Дабан обусловлено не только ее большой высотой, но и расположением на наветренном склоне хребта и на пути движения влажных воздушных масс, поступающих при северо-западном ветре через исток Ангары.

В течение года максимальное количество атмосферной влаги выпадает преимущественно в июле, за исключением Сармы, где годовой максимум обычно приходится на август. В июле максимум осадков на станции Хамар-Дабан достигает 266 мм. У подножия хребта (Байкальск) количество осадков также велико и составляет 167 мм.

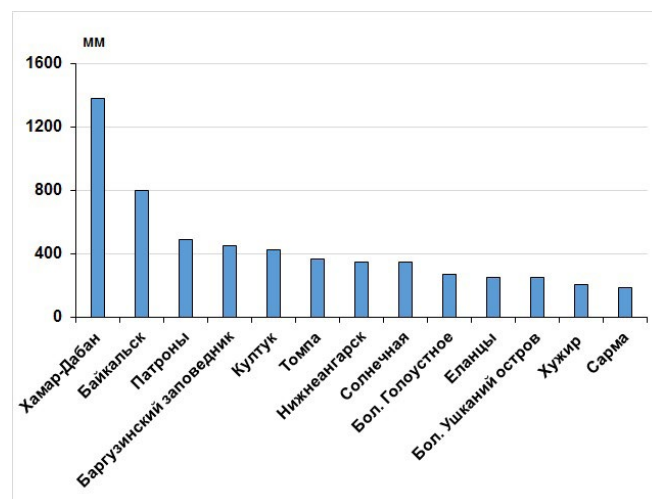


Рис.1. Среднегодовые суммы атмосферных осадков на метеостанциях.

Минимальные месячные суммы осадков чаще всего приходятся на февраль и варьируют от 22 (Сарма, Большое Голоустное, Большой Ушканий остров, Еланцы) до 32 мм (Хамар-Дабан).

Основная доля годового выпадения атмосферных осадков приходится на летний период, изменяясь от 38 (Баргузинский заповедник) до 67 % (Еланцы). Вклад осенних месяцев составляет от 16 (Большое Голоустное) до 34 % (Баргузинский заповедник), а зимних - от 4 (на большинстве байкальских станций) до 14 % (Баргузинский заповедник).

Годовая амплитуда сумм атмосферных осадков наибольших значений достигает в Хамар-Дабане (234 мм), Байкальске (153 мм), Култук (106 мм) и Патронах (101 мм), а наименьших - в Сарме (47 мм), Хужире (53 мм) и Большом Голоустном (54 мм).

В исследуемый период темпы потепления климата на всех исследуемых станциях в среднем составляют 0.27-0.35 °C/10 лет, сопровождаясь сменой отрицательных среднегодовых значений температуры воздуха на положительные (Таблица 1). Особенно заметное повышение среднегодовых температур воздуха наблюдается в последние годы (2020-2023 гг.).

В январе-феврале самым теплым десятилетием является период 1990–1999 гг., а самым холодным 1980–1989 гг. Для марта характерна самая высокая скорость потепления (до 1.2 °C/10 лет), а в мае самая низкая (~ 0.2 °C/10 лет). В летне-осенний период и в декабре повышение среднемесячных температур воздуха происходит со средней скоростью 0.3–0.5 °C/10 лет.

Потепление в рассматриваемые годы сопровождается незначительным уменьшением среднегодовых сумм выпавших осадков (Рис. 2) на большинстве станций в основном за счет последних лет.

Максимальное среднегодовое количество выпадения влаги приходится на 1990-2009, а минимальное – на 2010-2023 гг. В январе максимальное количество осадков наблюдалось в 1980-1989 и 2010-2019 гг., а в феврале и в весенние месяцы – в 2000-2009 и 2010-2019 гг. Летом наиболее дожд-

ливыми были 1980-1989 и 2000-2009 гг., осенью – 1990-1999 и 2000-2009 гг.

В соответствии с охарактеризованными колебаниями температуры воздуха и условиями увлажнения определенную трансформацию претерпевает и формирование элементов водного баланса оз. Байкал, его ледово-термического режима и уровня, определяющих функционирование всей экосистемы озера. В самом начале расчетного периода увлажненность в бассейне Байкала была пониженной, что стало причиной низкого притока речных вод в озеро (Рис. 3) и привело к аномальному снижению его уровня (до 455.27 м ТО в апреле 1982 г.). В целом многолетние изменения притока достаточно хорошо согласуются с колебаниями уровня озера, а через них и со стоком р. Ангары. В расчетный период годовой приток в озеро изменялся от 42.5 (2017 г.) до 93.1 (2021 г.) км³ при среднем значении 62.8 км³. Отмеченные экстремумы являются абсолютными за все годы с начала зарегулирования озера плотиной Иркутской ГЭС, а кроме того, приходятся на последние 10 лет.

Сток из озера в период 1980-2023 гг. изменялся в близких пределах – от 40.6 км³ в 2016 г. до 80.6 км³ в 2021 г. при средней величине 57.8 км³. Несмотря на искусственное регулирование стока его связь с притоком остается достаточно тесной и по коэффициенту корреляции составляет 0.68 (в естественных условиях 0.88).

Среднее годовое количество выпавших на водную поверхность Байкала осадков за указанные годы составляет 12.3 км³ с размахом колебаний от 9,3 до 6,1 км³. При этом, несмотря на периодические продолжительные засушливые периоды и отрицательные тренды по метеостанциям, многолетняя тенденция снижения сумм выпавших осадков на акваторию озера практически не выражена.

Испарение с водной поверхности озера, в отличие от осадков, с потеплением заметно возрастает. Его среднее значение за рассматриваемые годы составляет 15.5 км³ в год с колебаниями от 11.0 до 19.4 км³ в год.

Таблица 1. Среднегодовые температуры воздуха (°C) по десятилетиям

Станция/годы	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	2020-2023
Патроны	-1.0	0.1	0.1	0.3	0.9
Култук	-0.2	0.7	0.7	0.7	1.1
Байкальск	0.5	1.2	0.9	0.9	1.3
Хамар-Дабан	-2.6	-1.7	-1.7	-1.8	-1.5
Большое Голоустное	-0.3	0.7	0.6	0.8	1.1
Еланцы	-0.4	0.2	0.3	0.6	0.8
Сарма	-0.1	0.6	0.4	0.9	1.1
Хужир	-0.4	0.0	0.3	0.7	1.0
Бол. Ушканий остров	-1.0	-0.3	-0.6	-0.1	0.1
Солнечная	-1.4	-0.6	-0.7	-0.3	-0.4
Баргузинский Заповедник	-3.3	-2.3	-2.8	-2.6	-2.0
Томпа	-2.9	-2.0	-2.0	-1.9	-1.4
Нижеангарск	-2.5	-1.5	-1.8	-1.1	-1.0

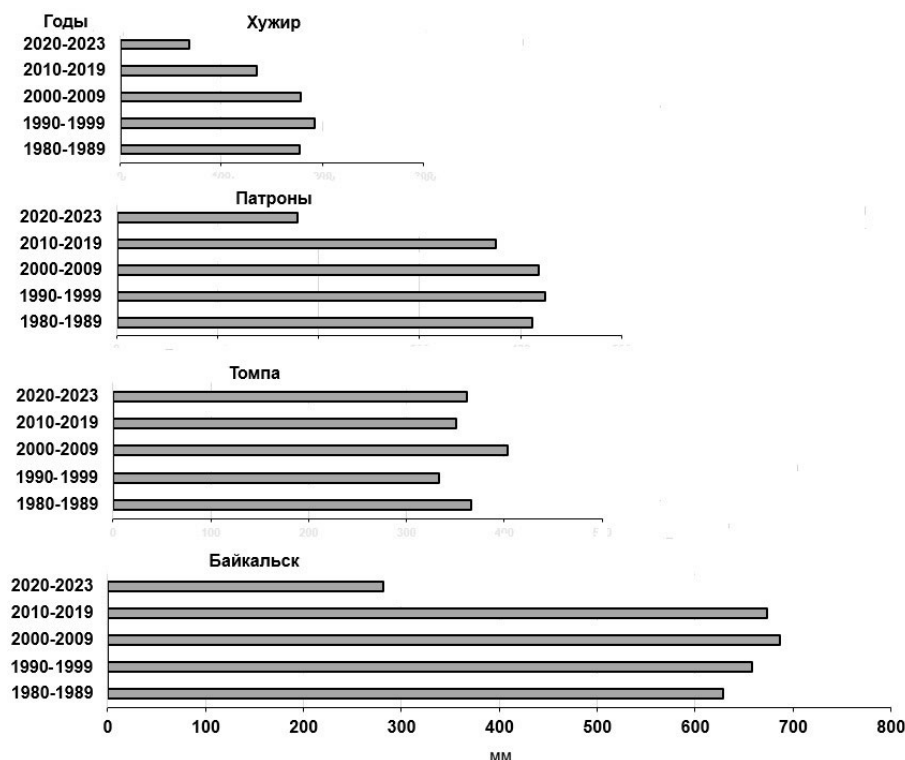


Рис.2. Средние годовые сумма осадков на отдельных станциях по десятилетиям.

Следует отметить, что для многолетних колебаний притока и стока характерна слабая тенденция снижения со скоростью около $1.3-1.5 \text{ км}^3$ за 10 лет. Испарению же, наоборот, присуща тенденция роста со средней скоростью 0.5 км^3 за 10 лет.

Колебания уровня Байкала в 1980-2023 гг., в основном следуя изменениям притока, характеризуются крайне низкими значениями в начальный период и в 2014-2017 гг. Упомянутая выше минимальная отметка уровня 1982 г. является рекордно низкой за все годы зарегулирования озера.

Рекордным является и максимальный уровень 1988 г., составляющий 457.42 м. Выход уровня озера в маловодные и многоводные периоды за пределы нормативных значений (456-457 м) осложняет проблемы использования его водных ресурсов.

Повышение температуры воздуха на Байкале отразилось на тепловом режиме озера и сроках ледовых явлений. В течение XX века период ледостава сократился на 18 суток (Шимараев и др., 2002) за счет более поздних сроков замерзания озера (на 11 суток) и более раннего освобождения

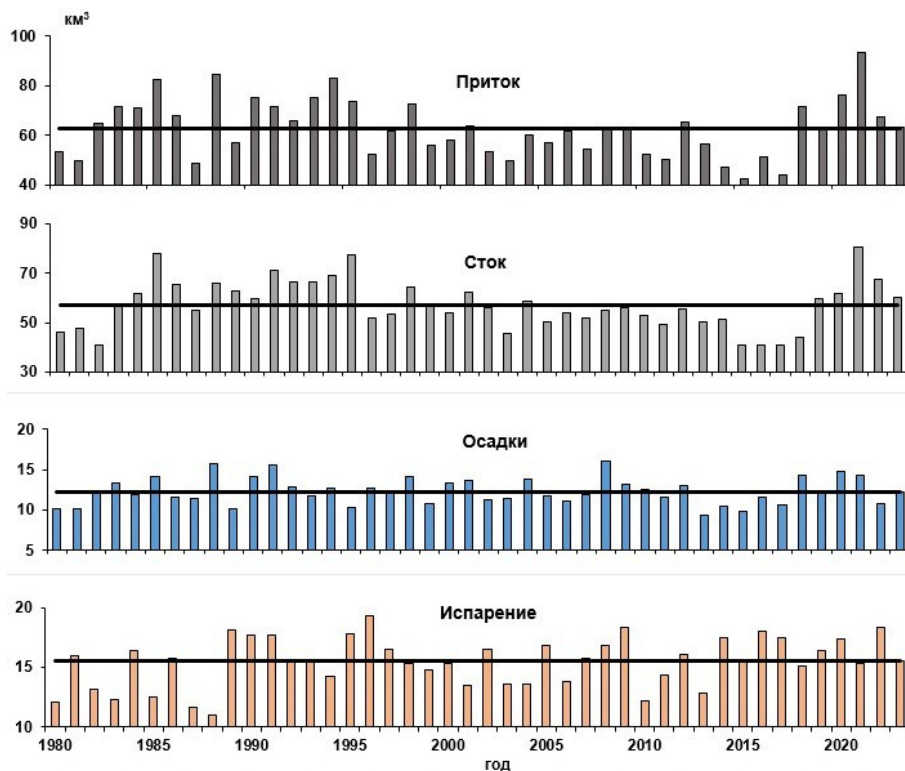


Рис.3. Динамика колебаний элементов водного баланса. Прямая линия – среднее значение.

ото льда (на 7 суток). Такая «асимметрия» сдвигов объясняется более значимым потеплением в ноябре-декабре при установлении ледостава озера (на 1.6 °C), чем в апреле-мае во время его разрушения (на 0.9 °C). К настоящему времени смещение сроков замерзания и вскрытия Байкала увеличилось незначительно из-за снижения темпов потепления в 1990-х гг. Прогрев же водной толщи озера на фоне потепления протекает в отдельных котловинах по-разному. По данным (Шимараев и Троицкая, 2018) повышение поверхностной температуры воды в Южном Байкале с 1970 г. в среднем составляет 0.32 °C за 10 лет, тогда как в средней котловине этот показатель достигает 0.50, а в северной 0.54 °C/10 лет. Более значительный прогрев поверхностного слоя воды в северной котловине обусловлен более низкой ветровой активностью в этой части озера. Следует отметить, что в 1994-2016 гг. тренд летней температуры воды в Северном Байкале составлял около 1.4 °C/10 лет.

Рассмотренные особенности колебаний элементов гидрометеорологического режима озера вызваны определенными изменениями циркуляционных процессов в атмосфере. Для Сибири и Байкала наиболее заметными среди них в последние десятилетия являются тенденции усиления вклада подвижного циклогенеза в холодный период года (октябрь-март) и высотного антициклогенеза в теплый период (апрель-май). В зимние месяцы на юге Прибайкалья увеличилась вероятность выходов монгольских и атлантических циклонов с интенсивными и нередко продолжительными волнами тепла и холода, усиливающими контрастность погодных условий в регионе. Возросшая повторяемость блокирующих процессов в летние месяцы все чаще препятствует образованию монгольских циклонов на полярной ветви высотной фронтальной зоны, где благодаря адвекции тепла ослабевают горизонтальные температурные контрасты. Как следствие, уменьшается бароклинность в значительной толще тропосферы как один из основных факторов формирования и развития внетропических циклонов. В то же время на фоне более высоких дневных температур летом возрастает вероятность выпадения более интенсивных ливневых осадков (Воложнина и др., 2024).

4. Заключение

Современные климатические особенности оз. Байкал по данным 13 метеорологических станций вокруг озера однозначно свидетельствуют о потеплении климата с наиболее высокими темпами роста температур в холодный период года, в особенности в марте (до 1.2 °C/10 лет). Одновременно с этим в последние годы происходит уменьшение годовых и месячных сумм атмосферных осадков.

В соответствии с режимом выпадения осадков и температурными условиями усилилась вариабельность притока поверхностных вод в озеро, в особенности в последние 10 лет, на которые приходятся абсолютные максимальные и минимальные

значения приточности за все время с начала зарегулирования озера плотинной Иркутской ГЭС. Для притока поверхностных вод в озеро и стока из него за рассматриваемые годы характерно некоторое снижение, в то время как испарение с поверхности водоема, наоборот, увеличилось.

Уровенный режим Байкала в 1980-2023 гг. в основном соответствовал изменениям притока и в отдельные годы сопровождался выходом отметок уровня за пределы установленного метрового диапазона (456-457 м).

Вместе с температурой воздуха повысился прогрев водных масс озера, в особенности его северной оконечности, отличающейся меньшей ветровой активностью. За счет более поздних сроков замерзания озера и более раннего его освобождения ото льда до 20 дней сократился период ледостава.

Отмечаемые особенности колебаний элементов гидрометеорологического режима озера обусловлены, очевидно, соответствующими изменениями циркуляционных климатообразующих факторов на Байкале. К наиболее заметным из них в последние десятилетия относятся тенденции усиления вклада подвижного циклогенеза в холодный период года (октябрь-март) и высотного антициклогенеза в теплый период (апрель-май). Возросла повторяемость блокирующих процессов в летние месяцы, определяющая продолжительные засушливые периоды и более интенсивные суточные максимумы ливневых осадков.

При сохранении наблюдаемых тенденций в изменениях тепло- и влагосодержания атмосферы вблизи оз. Байкал, очевидно, будет продолжаться перестройка водного и ледово-термического режимов озера, изменяющих скорость различных внутриводоемных процессов и условия обитания байкальской биоты.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ЛИН СО РАН по теме № 0279-2021-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Воложнина С.Ж., Гекова А.В., Латышева И.В. и др. 2024. Пространственно-временные и геоэкологические особенности температурного режима в Иркутской области в современный климатический период. Успехи современного естествознания 11: 22–29. DOI: [10.17513/use.38328](https://doi.org/10.17513/use.38328)

Латышева И.В., Лощенко К.А., Воложнина С.Ж. и др. 2025. Региональные особенности современного климатического периода в Иркутской области. Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле» 51: 19–36. DOI: [10.26516/2073-3402.2025.51.19](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.51.19)

Семенова Е.И., Сорока А.О., Недбаев И.С. 2024. Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата. Лесотехнический журнал 1 (53): 16–34. DOI: [10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2)

Сутырина Е.Н. 2019. Современные тенденции изменения климатических условий в пределах водосбора оз. Байкал. Вестник ЗабГУ 25 (5): 49–55. DOI: [10.21209/2227924520192554955](https://doi.org/10.21209/2227924520192554955)

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. 2022. Санкт-Петербург: Научно-технологические технологии.

Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н. и др. 2002. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии. Метеорология и гидрология 3: 71–78.

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))

Fangfang Y., Livneh B., Rajagopalan B. et al. 2023. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Sciens* 380 (6646): 743–749. DOI: [10.1126/science.abo2812](https://doi.org/10.1126/science.abo2812)

Sinha E., Michalak A.M., Balaji V. 2017. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science* 357: 405–408. DOI: [10.1126/science.aan2409](https://doi.org/10.1126/science.aan2409)